

УДК 681.3:665.669(045)

С. О. ПУЗІК, О. С. ПУЗІК, В. Ф. ОПАНАСЕНКО, В. Б. МЕЛЬНИК

Національний авіаційний університет, Україна

ПРИЧИНИ ТА КРИТЕРІЇ ОБВОДНЕННЯ ПАЛИВ

Досліджено фазові переходи води у паливах. Проаналізовано перебіг випаровування, конденсації та замерзання води. Визначено критерії, що впливають на вміст води в паливі в різних станах. Запропоновано характеристики для моделювання фазових переходів води у паливах.

Ключові слова: розчинена вода, атмосферний тиск, відносна вологість атмосферного повітря, випаровуваність, тиск насиченої пари, коефіцієнт дифузії.

Вступ. Для підтримання високого рівня безпеки польотів повітряних суден (ПС) авіаційні норми стають жорсткішими. Кондиційність палив є необхідною вимогою для безпечного виконання польоту ПС. Під визначення придатності авіапалив до заправлення аналізують відповідність показників його паспорту і особливу увагу звертають на наявність води та механічних домішок. В той час, коли забруднення видаляються фільтрами для забезпечення одного з дев'ятнадцяти класів чистоти, вода, згідно з вимогами нормативних документів має бути відсутньою в паливі. Але неможливість повністю відділити воду існуючими технічними засобами зумовила виникнення нормативного значення у 30 г води на тону палива, або 0,003 % тобто 30 частинок на мільйон. Додаткову складність створює існування води в паливі в твердому (лід), рідкому (вода) і газоподібному (водяна пара) станах. Крім того, розчинившись у паливі, вода потрапляє у його міжмолекулярний простір [1].

Здійснення польоту на великих висотах відбувається за низьких температур. В таких умовах перевищення нормативних значень загального вмісту води в паливі може зумовити фазовий перехід молекул води з рідкого стану у кристали льоду. Найнебезпечнішою є кристалізація розчиненої та вільної води, що утворилася з інею на стінках баків ПС [2]. Забивання фільтрів паливної системи ПС і, як наслідок, перекриття надходження палива до двигунів може призвести, як до виникнення аварійної ситуації, так і до катастроф. Таким чином, для дослідження причин виникнення та кількісного визначення води, що перебуває в різних станах, у паливі необхідно дослідити її фазові переходи. Тому актуальним є питання формування критеріїв обводнення палив.

Метою даної роботи є дослідження критеріїв обводнення палив.

Основна частина. Основним джерелом надходження в палива є вода яка знаходиться в атмосфері. Біля 71 % земної поверхні займають водойми. Приблизно 3 % маси земної води нашої планети знаходиться в атмосфері. В атмосферу вода надходить в результаті: випаровування з поверхонь водоймищ; виділення живими організмами; вулканічної діяльності промислового виробництва та згоряння. Атмосферна вода в одному і тому ж просторі може бути одночасно у всіх трьох станах: газоподібному (водяна пара), рідкому (вода, краплі туману, дощу), твердому (лід, сніг) [3]. Три стани речовини і перехід із одного стану в інший показано на рис. 1 [4]. Процес переходу льоду (твердий стан) у воду (рідкий стан) називають плавленням, перехід води в лід замерзанням (затвердінням). В результаті випаровування вода переходить в газоподібний стан (пара). Процес переходу водя-

ної пари в рідкий стан називається конденсацією, в твердий (лід, сніг) — сублімацією. Перехід із твердого стану в газоподібний (пара) і, навпаки, із газоподібного в твердий може відбуватись без утворення рідкої фази. Наприклад, купа снігу та льоду з часом зменшуються й зникають при від'ємній температурі.

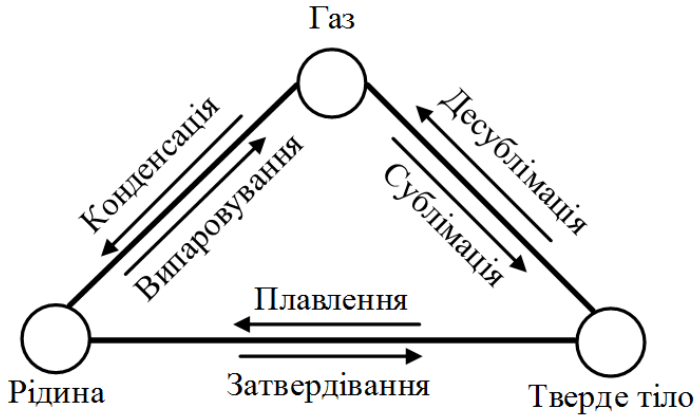


Рис. 1. Стан речовини

Зміна атмосферного тиску обумовлює місцеві випаровування палива в системі та підкоряється закону Бернуллі для ділянки системи без втрат:

$$p = p_{\text{стат}} + p_{\text{д}} = p_{\text{стат}} + \rho_{\text{пал}} \frac{V_{\text{пал}}^2}{2},$$

де p – тиск, Па; $p_{\text{ст}}$ – статичний тиск, Па; $p_{\text{д}}$ – динамічний тиск, Па; $V_{\text{пал}}$ – швидкість витікання палива, м/с; $\rho_{\text{пал}}$ – густина палива, кг/м³.

Статичний тиск, від якого залежить інтенсивність та випаровування в потоці палива

$$p_{\text{стат}} = p - \rho_{\text{пал}} \frac{V_{\text{пал}}^2}{2}.$$

За певних швидкостей протікання статичний тиск може за своїм абсолютним значенням наблизитись до величини тиску насиченої пари $p_{\text{н.п.}}$. При $p_{\text{н.п.}} = p_{\text{стат}}$ рідина закипає, в паливі різко прискорюється випаровування.

З підвищенням температури розчинність води у всіх нафтопродуктах збільшується згідно з емпіричним рівнянням [5]:

$$\lg g_{\text{в}} = a - \frac{b}{T},$$

де $g_{\text{в}}$ – розчинність води при даній температурі, %; T – температура, К; a і b – константи для даного нафтопродукту.

Залежність між вмістом розчиненої води в нафтопродукті та відносною вологістю повітря підкоряється закону Генрі [7]:

$$g_{\text{в}} = g_{\text{в0}} \psi \frac{p_{\text{пов}}}{p} \left(\frac{T}{T_0} \right)^n,$$

де $g_{\text{в}}$ – максимальна розчинність води при заданих умовах, %; $g_{\text{в0}}$ – максимальна розчинність води в паливі при $\psi = 1$ (100 %-ій вологості повітря) $p = 0,1$ МПа і

$T_0 = 293$ К, %; $p_{\text{пов}}$ – тиск повітря в надпаливному просторі; ψ – відносна вологість повітря, %; n – показник степеню для реактивних палив.

Таким чином, концентрація води в паливі прямо залежить від відносної вологості атмосферного повітря. Температура палива зазвичай відрізняється від температури повітря, тому перехід молекул води з нафтопродукту в повітря та назад відбувається швидко, а перепад температур між паливом та атмосферним повітрям значно впливає на зміну концентрації води. Тиск повітря в надпаливному просторі $p_{\text{пов}}$ залежатиме від атмосферного тиску, збільшення якого призводить до зростання концентрації води в паливах. Швидкість зміни концентрації води в паливах залежить від дифузії молекул води на межі поділу фаз повітря-нафтопродукт та власне у паливі [6].

Одним з критеріїв обводнення пропонується вважати випаровуваність, яка характеризує швидкість переходу речовини з рідкої фази в пару. Випаровуваність палив залежить від фракційного складу та тиску насиченої пари $p_{\text{н.п.}}$, від зовнішніх (теплообмін з навколишнім середовищем, швидкість руху газу відносно краплі концентрації пари палива) та внутрішніх факторів (температури краплі, теплоємності, теплопровідності, теплоти пароутворення). Випаровуваність води в паливі буде залежати не лише від фізичних параметрів води, а й від всіх перелічених характеристик палива.

Швидкість випаровування в загальному випадку це – кількість пари, що утворюється з одиниці поверхні рідини за одиницю часу. Швидкість випаровування палива $\frac{dm_{\text{пал}}}{d\tau}$ визначається швидкістю підведення теплоти:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \alpha_{\text{пал}} S_{\text{пал}} (T_{\text{г}} - T_{\text{пал}}), \quad (1)$$

де $\alpha_{\text{пал}}$ – коефіцієнт передачі тепла від газу до палива; $S_{\text{пал}}$ – поверхня палива, що межує з газом, мм^2 ; $T_{\text{г}}$ – температура газу, К; $T_{\text{пал}}$ – температура палива, К.

Припускаючи, що тепло, підведене до палива, витрачається на його випаровування, отримаємо $dm_{\text{пал}} \frac{dQ}{\gamma}$, де γ – теплота пароутворення. Тоді (1) набуде вигляду:

$$dm_{\text{пал}} = \frac{\alpha_{\text{пал}} S_{\text{пал}}}{\gamma} (T_{\text{г}} - T_{\text{пал}}) d\tau, \quad (2)$$

або

$$dm_{\text{пал}} = S_{\text{пал}} \rho_{\text{пал}} dh, \quad (3)$$

де dh – зменшення шару палива по нормалі до його поверхні.

Тоді (2) набуває вигляду

$$\rho_{\text{пал}} dh = \frac{\alpha_{\text{пал}}}{\gamma} (T_{\text{г}} - T_{\text{пал}}) d\tau. \quad (4)$$

Якщо випаровування палива з діаметром краплі $d_{\text{к}} \rightarrow 0$ $\alpha_{\text{пал}} = \frac{2\lambda}{d_{\text{к}}}$, де $\lambda_{\text{теп}}$ – коефіцієнт теплопровідності. Отримуємо:

$$dh = \frac{2\lambda_{\text{теп}}(T_{\text{г}} - T_{\text{пал}})}{d_{\text{к}}\rho_{\text{пал}}\gamma} d\tau. \quad (5)$$

Розв'язуючи (5) відносно τ , отримуємо рівняння для визначення часу випаровування краплі

$$\tau = \frac{d_{\text{к}}^2 \rho_{\text{пал}} \gamma}{4\lambda_{\text{теп}}(T_{\text{г}} - T_{\text{пал}})} \quad (6)$$

З (6) випливає, що час випаровування краплі лінійно залежить від густини палива та пропорційно від квадрату її діаметра. Швидкість випаровування визначається за рівнянням:

$$\frac{dm_{\text{пал}}}{d\tau} = \frac{p_{\text{н.п.о}} - p_{\text{н.п.}}}{p_{\text{п}}} DK_{\text{д}}, \quad (7)$$

де $p_{\text{н.п.о}}$ – тиск насиченої пари палива при температурі насичення, Па; $p_{\text{н.п.}}$ – парціальний тиск насиченої пари палива, Па; $p_{\text{п}}$ – парціальний тиск повітря в середовищі, у яке відбувається випаровування, Па; D – коефіцієнт дифузії; K – коефіцієнт пропорційності для процесу дифузії молекул води в паливі.

З (7) випливає, що швидкість випаровування визначається двома основними характеристиками: коефіцієнтом дифузії та тиском насиченої пари, які розглянемо детальніше.

Коефіцієнт дифузії D визначає швидкість, з якою пара палива дифундує у повітря. В загальному випадку значення D збільшується зі зростанням температури та зниженням тиску середовища, в яке відбувається дифузія, відповідно до рівняння:

$$D = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 \frac{p_0}{p},$$

де T_0 , p_0 , D_0 – відповідно вихідні температура, К, тиск, Па, та коефіцієнт дифузії, p і T – задані умови.

У випадку збільшення швидкості руху повітря $V_{\text{пов}}$ відносно поверхні палива величина D збільшується пропорційно $\sqrt{V_{\text{пов}}}$.

Тиском насиченої пари називають тиск пари в стані термодинамічної рівноваги з рідиною, що випаровується. Тиск насиченої пари є індивідуальною характеристикою речовини, що залежить від переліку факторів, обумовлених впливом зовнішнього середовища. До таких факторів належить температура, відношення між паровою та рідкою фазами, розчинений газ в паливі (рис. 2) [7] тощо.

Залежність тиску насиченої пари авіапалив від відношення об'ємів парової та рідкої фаз пояснюється тим, що в першу чергу випаровуються фракції палива, які мають найбільший тиск насиченої пари, в той час як у рідкій частині, що залишилась, збільшується концентрація з нижчим тиском. Чим більше об'єм парової фази, тим сильнішим є згаданий ефект (табл. 1).

Таким чином, основним джерелом обводнення палив є атмосферна волога, що міститься в повітрі у вигляді водяної пари.

Висновки:

Основним джерелом обводнення палив є вода, що знаходиться в атмосфері. Атмосферна вода може бути одночасно у всіх трьох станах.

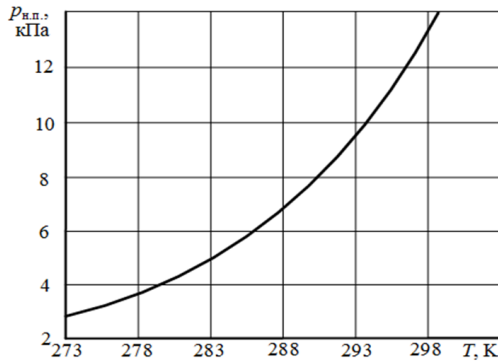


Рис. 2 Залежність тиску насиченої пари палива від температури

Таблиця 1

Кількість вологи в 1 м³ повітря залежно від температури

Температура, К	233	253	273	278	283	288	293	303
Вміст води, г/м ³	0,1	1,6	4,8	6,7	9,4	12,5	19,0	35
Вміст води по об'єму, %	0,01	0,22	0,6	0,86	1,1	1,56	2,3	4,4

Зміна атмосферного тиску обумовлює місцеві випаровування палива та підпорядковується Закону Бернуллі.

Залежність між вмістом розчинної води в паливі та відносною вологістю повітря підпорядковується закону Генрі.

Одним із критеріїв обводнення пропонується вважати випаровуваність, яка характеризує швидкість переходу води із рідкої фази в пару. Швидкість випаровування визначається двома основними характеристиками: коефіцієнтом дифузії та тиском насиченої пари.

Список літератури

1. ДСТУ 3372–96 Система технічного обслуговування і ремонту авіаційної техніки. Організація гарантійного обслуговування авіаційної техніки. Основні положення.
2. ГОСТ 29064–91. Топлива для газотурбинних и поршневых двигателей. Экспресс методы контроля качества. – Введ. 1992–01–07. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 11 с.
3. Пузік С.О. Технологічні процеси з пально-мастильними матеріалами: підручник / С.О. Пузік, Є. О. Баканов, В.І. Терьохін, В.Ф. Опанасенко // – К.: Вид-во нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2002. – 256 с.
4. Никонов К.В. Очистка нефтепродуктов от воды: учебное пособие / К.В. Никонов, Г.А. Никитин. – К.: КИИГА, 1987. — 76 с.
5. Totten George E. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing / George E. Totten, Steven R Westbrook, Rajesh J Shah. – Glen Burnie, MD, 2003. – 1101 p.
6. Пузік О.С. Контроль обводнення авіаційних палив за допомогою гідродинамічної кавітації: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту / Пузік Олексій Сергійович. – К., 2014. –20 с.
7. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки. Підручник / В. Б. Струтинський. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 612 с.

S. O. PUZIK, O. S. PUZIK, V. F. OPANASENKO, V. B. MELNYK

FUELS WATERING CAUSES AND CRITERIAS

This article shows results of the exploration of the fuels watering reasons. The first problem which was recognised is analysis of the water in fuels phase transition. The exploration has revealed that vapor pressure is mostly informative criteria of fuels watering, if reason is water in few conditions. Another problem which article shows is imperfections of investigated characteristics for phase's changes in fuel. It was analyzed characteristics of dissolved water in fuels. Article shows that the most rational for fuel watering diagnosing is character of water evaporation which shows velocity of phase transfer from water to vapor.

Keywords: dissolved water, pressure, relative humidity of air, vapor pressure, diffusion coefficient.

Пузік Сергій Олексійович – канд. техн. наук, професор Національного авіаційного університету, s.puzik@email.ua.

Пузік Олексій Сергійович – канд. техн. наук, oleksii.puzik@online.ua.

Опанасенко Володимир Федорович – канд. екон. наук, syretc@gmail.com.

Мельник Володимир Борисович – канд. техн. наук, доцент кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, melnikvb408@gmail.com.