

УДК 504.054:662.756.3+665.71:551.558.74(045)

## РОЗРАХУНОК ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИКИДІВ ДЕЯКИХ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ТРАДИЦІЙНИХ ТА АЛЬТЕРНАТИВНИХ АВІАЦІЙНИХ ПАЛИВ

С. В. Бойченко, д-р техн. наук, проф.; А. В. Яковлева; \*Г. О. Наумчук

Національний авіаційний університет

\*anna\_naumchuk@bk.ru

*Дослідженню екологічні проблеми, пов'язані з використанням палив для повітряно-реактивних двигунів. Розглянуто та проаналізовано викиди основних компонентів відпрацьованих газів, що утворюються в результаті використання традиційних та альтернативних авіаційних палив. Особливу увагу приділено оцінюванню негативного впливу процесів використання нафтових палив для повітряно-реактивних двигунів на сучасний стан навколишнього середовища. Показано можливість зниження викидів деяких відпрацьованих газів повітряних суден на прикладі авіаційних біопалив, отриманих з рослинної жирівмісної сировини. Вказано на потенційний позитивний ефект від застосування біопалив для авіації.*

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

*This article is devoted to investigation of the environmental problems associated with the use of fuels for air-jet engines. The main components of the exhaust emissions of gases that result from the use of traditional and alternative aviation fuels are considered and analyzed. Particular attention is paid to assessment of the negative impact of the use of petroleum fuels for air-jet engines on the current state of the environment. The possibility of reducing emissions of certain exhaust gases from aircrafts using aviation biofuels is shown at the example of fuels obtained from vegetable oil-containing feedstock. The paper indicated the potential positive effect of the use of biofuels for aviation.*

**Keywords:** jet engines, jet fuel, environmental characteristics, fumes, toxicity, energy, greenhouse effect, greenhouse gases.

### Вступ

Глобальна зміна клімату — одна з найгостріших екологічних проблем, що постала сьогодні. Підписання Рамкової Конвенції ООН про зміну клімату представниками 150 країн свідчить про те, що зміна клімату є нагальною загрозою екології Землі та економічному розвитку людства.

За даними доповіді Міжнародної групи експертів з питань зміни клімату, зростання температури за останні сто років становило  $0,74 \pm 0,18$  °C. При цьому рівень потепління, що спостерігається протягом останніх 50 років, викликаний людською діяльністю, а саме викидом газів від згоряння викопних палив.

### Постановка проблеми

Авіація є джерелом більш ніж 2 % світової емісії CO<sub>2</sub> — основного парникового газу та інших компонентів, що негативно впливають як на здоров'я людини, так і на глобальні зміни клімату на планеті [1]. За деякими прогнозами, до 2050 р. повітряний транспорт буде джерелом 20 % усіх шкідливих речовин, що викидаються у

світі. У зв'язку з цим низка міжнародних організацій, таких як ICAO, IATA, висувають вимоги щодо підвищення екологічності цивільної авіації, мінімізації її впливу як на довкілля, так і на здоров'я населення. На думку вчених це питання має вирішуватися зменшенням викидів парникових газів, таких як CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> та інших, а також зниженням токсичності відпрацьованих газів повітряних суден (ПС) [2].

### Аналіз досліджень і публікацій

Експерти ООН та вчені академії наук країн «Великої вісімки» дійшли висновку, що однією з причин зміни клімату, є парниковий ефект, зумовлений викидами вуглекислого газу і метану [3].

Однією з основних причин парникового ефекту є нагромадження вуглекислого газу в атмосфері. Вуглекислий газ діє в атмосфері, як скло в оранжерей: він пропускає сонячну радіацію й не випускає назад у космос інфрачервоне (теплове) випромінювання Землі. В той же час вуглекислий газ діє як потужний

поглинач земного випромінювання, що у противному випадку розсіювалося б у космічному просторі. Отже, поглинаючи сонячну радіацію й не віддаючи цю енергію випромінювання Землі, двоокис вуглецю спричиняє нагрівання атмосфери.

Нині концентрація  $\text{CO}_2$  в атмосфері становить приблизно 400 ppm. Це у два рази більше, ніж до початку промислової революції XVIII ст. До 2050 р., за даними вчених, концентрація  $\text{CO}_2$  в атмосфері може досягти 500 ppm. [3].

У зв'язку зі збільшенням вмісту  $\text{CO}_2$  в атмосфері, з одного боку, а також з вичерпністю запасів нафти та інших корисних копалин, з іншого, сьогодні більш актуальним стає пошук і розробка альтернативних технологій отримання палив для ПРД з відновлюваної сировини [4].

На сьогодні низкою розвинених країн вже зроблено перші кроки у цьому напрямі. Так, багатьма відомими авіакомпаніями світу вже здійснено польоти літаків з використанням альтернативного палива. Урядами багатьох країн оголошено національні програми, що скеровані на виробництво та упровадження біопалив у авіацію.

**Мета даної роботи** — розрахунок і порівняльний аналіз викидів деяких відпрацьованих газів ПС під час використання традиційних та альтернативних палив для ПРД.

### Основна частина

Як один із варіантів вирішення даної проблеми вченими було запропоновано розроблення та упровадження альтернативних авіаційних палив.

На разі у світі вже існує досить велике різноманіття альтернативних видів авіаційного палива. Зазвичай їх класифікують відповідно до сировини, з якої їх отримують. Сьогодні вчені виділяють п'ять груп альтернативних палив:

- палива на основі нетрадиційної нафтової сировини (сланці, бітумінозні піски);
- синтетичні палива, виготовлені з вугілля, природного газу та біомаси ФТ-процесом;
- палива на основі спиртів (етанол, бутанол);
- палива на основі рослинних олій та тваринних жирів (біодизель, біокеросин, гідрогенізовані рослинні олії);
- палива на основі олій, вироблених у процесі життєдіяльності мікрободоростей [2].

Проте не усі види палива з цього переліку є відновлюваними.

Так, палива, отримані з нетрадиційної нафтової сировини, вугілля, природного газу, є альтернативою традиційній нафті, але також видобуваються з надр землі.

Відповідно реалізація технологій переробки як природного газу, так і вугілля призводить до значних викидів  $\text{CO}_2$  і деяких інших речовин [1; 4; 5]. За даними праці [4], в процесі виробництва альтернативного палива для ПРД із природного газу об'єм парникових газів є у 1,8 разу, а з вугілля в 2–2,4 разу вищим, ніж у результаті переробки нафти. Крім того, використання бітумінозного вугілля як сировини супроводжується викидами  $\text{CH}_4$ , що також є парниковим газом. Водночас, у процесі згоряння палива, отриманого з природного газу, викиди сірки відсутні [4; 5].

Одними з перших видів відновлюваної сировини були застосовані олії ріпаку, сої, пальмова, кокосова олії та деякі інші. Щоб отримати палива з кращими експлуатаційними властивостями, олії та тваринні жири переетерифікують із метанолом, етанолом або бутанолом, перетворюючи складні ефіри гліцерину на відповідні естери нижчих спиртів і високомолекулярних кислот.

Особливістю більшості альтернативних видів палива є використання природної, поновлюваної, найчастіше рослинної сировини.

В цьому випадку не порушується загальний баланс вуглекислого газу в природі. Це пояснюється тим, що рослини, які використовують як сировину, споживають вуглекислий газ необхідний їм для розвитку з атмосфери.

Рис. 1 і 2 схематично демонструють як впливає використання палив на основі викопних енергоресурсів та відновлюваних видів сировини на зміну балансу  $\text{CO}_2$  в атмосфері.

Крім того, існує думка, що використання авіаційних біопалив дозволяє знизити токсичність відпрацьованих газів літаків. У першу чергу це пов'язано з відсутністю в біопаливах гетероатомних сполук, таких як сірка та інших, що негативно впливають на якість відпрацьованих газів.



Рис. 1. Використання палива на основі викопної сировини

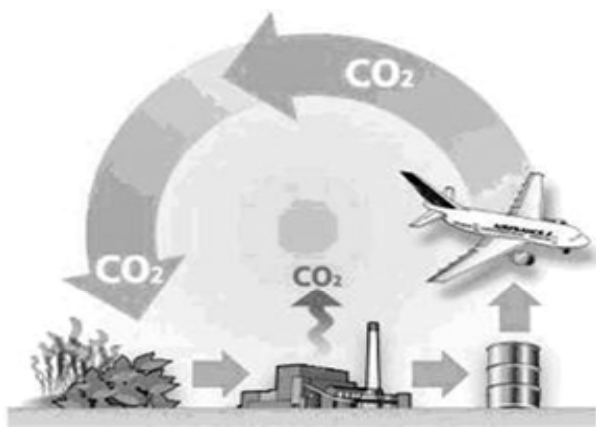


Рис. 2. Використання палива на основі рослинної сировини

Виходячи з припущення, що згоряння палив на основі рослинної біомаси не збільшує вміст  $\text{CO}_2$  в атмосфері, вважаємо за необхідність розрахувати та порівняти викиди парникових газів від традиційних і альтернативних палив.

**Розрахунок викидів деяких відпрацьованих газів від традиційних і альтернативних палив.**

Біокеросин — це суміш традиційного нафтового керосину та біокомпонента в певних концентраціях. Як біокомпонент використовуються продукти переестерифікації рослинних олій.

Для нашого розрахунку використовувалось традиційне паливо для ПРД марки ТС-1 нафтового походження та біокомпоненти на основі метилових естерів жирних кислот (МЕЖК) та етилових естерів жирних кислот (ЕЕЖК) ріпакової олії.

Методика розрахунку викидів основних компонентів відпрацьованих газів ПДР полягає у складанні рівняння стеріохімічної кількості кисню, необхідної для згоряння 1 кг палива. Для складання такого рівняння необхідно знати хімічний та елементарний склад традиційного палива та біокомпонентів. Для визначення хімічного складу біокомпонентів було використано результати їх хроматографічного аналізу (табл. 1, 2). Статистичні дані про хімічний та елементарний склад нафтового палива для ПРД (табл. 3) було взято з робіт [8; 9].

Таблиця 1

Розрахунок складу МЕЖК за результатами хроматографічного аналізу

№ з/п	Назва сполуки	Хімічна формула	Вміст, кислот, %	С	Н	О
1	МЕ тетрадеканової кислоти	$\text{C}_{15}\text{H}_{30}\text{O}_2$	0,024	0,0432	0,00726	0,0077
2	МЕ гексадеценної кислоти	$\text{C}_{17}\text{H}_{32}\text{O}_2$	0,200	0,408	0,0645	0,0639
3	МЕ гексадеканової кислоти	$\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2$	6,200	12,659	2,125	1,983
4	МЕ гептадеценної кислоти	$\text{C}_{17}\text{H}_{36}\text{O}_2$	0,047	0,096	0,017	0,0150
5	МЕ октадеценної (олеїнової) кислоти	$\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$	52,60	12,038	19,086	16,826
6	МЕ октадекадієнової (лінолевої) кислоти	$\text{C}_{19}\text{H}_{34}\text{O}_2$	21,110	48,175	7,234	6,573
7	МЕ октадекатрієнової (ліноленової) кислоти	$\text{C}_{19}\text{H}_{32}\text{O}_2$	7,200	16,431	2,322	2,3
8	МЕ ектадеканової (стеаринової) кислоти	$\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$	1,900	4,336	0,689	0,607
9	МЕ нонадеценної кислоти	$\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_2$	1,118	2,686	0,428	0,358
10	МЕ нонадеканової кислоти	$\text{C}_{20}\text{H}_{40}\text{O}_2$	0,245	0,589	0,099	0,078
11	МЕ ненасиченої кислоти $\text{C}_{20}$	$\text{C}_{22}\text{H}_{42}\text{O}_2$	0,145	0,383	0,061	0,046
12	МЕ ейкозенової кислоти	$\text{C}_{21}\text{H}_{40}\text{O}_2$	1,251	3,155	0,504	0,400
13	МЕ ейкозанової кислоти	$\text{C}_{21}\text{H}_{42}\text{O}_2$	0,454	1,145	0,192	0,145
14	МЕ генейкозенової кислоти	$\text{C}_{22}\text{H}_{42}\text{O}_2$	4,200	11,098	1,779	1,343
15	МЕ генейкозанової кислоти	$\text{C}_{22}\text{H}_{44}\text{O}_2$	0,124	0,328	0,055	0,036
16	МЕ ненасиченої кислоти $\text{C}_{22}$	$\text{C}_{24}\text{H}_{48}\text{O}_2$	0,091	0,262	0,043	2,910
17	МЕ ненасиченої кислоти $\text{C}_{22}$	$\text{C}_{24}\text{H}_{48}\text{O}_2$	0,122	0,351	0,059	0,039
18	МЕ 13-докозенової (ерукової) кислоти	$\text{C}_{23}\text{H}_{44}\text{O}_2$	2,500	6,906	1,108	0,799
19	МЕ докозанової кислоти	$\text{C}_{23}\text{H}_{44}\text{O}_2$	0,216	0,598	0,096	0,069
20	МЕ тетракозенової кислоти	$\text{C}_{25}\text{H}_{48}\text{O}_2$	0,087	0,261	0,042	0,028
21	МЕ тетракозанової кислоти	$\text{C}_{25}\text{H}_{50}\text{O}_2$	0,087	0,261	0,043	0,028
22	Інші МЕ		0,079	0,096	0,041	0,025
	Сума			230,305	36,095	34,679
	Склад МЕЖК, %	100	76,493	11,988	11,519	

Таблиця 2

## Розрахунок складу ЕЕЖК за результатами хроматографічного аналізу

№ з/п	Назва сполуки	Хімічна формула	Вміст кислот, %	С	Н	О
1	ЕЕ тетрадеканової кислоти	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	0,024	0,046	0,0077	0,0077
2	ЕЕ гексадеценаної кислоти	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	0,200	0,432	0,0685	0,0639
3	ЕЕ гексадеканової кислоти	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	6,200	13,404	2,249	1,984
4	ЕЕ гептадеценаної кислоти	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	0,047	0,102	0,018	0,0150
5	ЕЕ октадеценаної (олеїнової) кислоти	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	52,60	12,6345	20,146	16,826
6	ЕЕ октадекадієнової (лінолевої) кислоти	C <sub>20</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	21,110	50,710	7,659	6,573
7	ЕЕ октадекатрієнової (ліноленової) кислоти	C <sub>20</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	7,200	17,281	2,467	2,3
8	ЕЕ ектадеканової (стеаринової) кислоти	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	1,900	4,564	0,728	0,607
9	ЕЕ нонадеценаної кислоти	C <sub>22</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	1,118	2,6954	0,450	0,358
10	ЕЕ нонадеканової кислоти	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	0,245	0,647	0,104	0,078
11	ЕЕ ненасиченої кислоти C <sub>20</sub>	C <sub>23</sub> H <sub>44</sub> O <sub>2</sub>	0,145	0,400	0,064	0,046
12	ЕЕ ейкозенової кислоти	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	1,251	3,306	0,529	0,400
13	ЕЕ ейкозанової кислоти	C <sub>22</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	0,454	1,199	0,192	0,145
14	ЕЕ генейкозенової кислоти	C <sub>23</sub> H <sub>44</sub> O <sub>2</sub>	4,200	11,60	1,862	1,343
15	ЕЕ генейкозанової кислоти	C <sub>23</sub> H <sub>46</sub> O <sub>2</sub>	0,124	0,343	0,055	0,036
16	ЕЕ ненасиченої кислоти C <sub>22</sub>	C <sub>25</sub> H <sub>50</sub> O <sub>2</sub>	0,091	0,273	0,046	2,910
17	ЕЕ ненасиченої кислоти C <sub>22</sub>	C <sub>25</sub> H <sub>50</sub> O <sub>2</sub>	0,122	0,366	0,061	0,039
18	ЕЕ 13-докозенової (ерукової) кислоти	C <sub>24</sub> H <sub>46</sub> O <sub>2</sub>	2,500	7,207	1,159	0,799
19	ЕЕ докозанової кислоти	C <sub>24</sub> H <sub>46</sub> O <sub>2</sub>	0,216	0,622	0,100	0,069
20	ЕЕ тетракозенової кислоти	C <sub>26</sub> H <sub>50</sub> O <sub>2</sub>	0,087	0,271	0,044	0,028
21	ЕЕ тетракозанової кислоти	C <sub>26</sub> H <sub>52</sub> O <sub>2</sub>	0,087	0,271	0,045	0,028
22	Інші ЕЕ		0,079	0,096	0,041	0,025
	Сума			242,18	38,095	34,679
	Склад ЕЕЖК %		100	76,893	11,095	11,012

Таблиця 3

## Елементарний склад палив для ПДР

Вид палива	Вміст елементів, %. мас			
	Н	С	О	S
Паливо для ПДР м. ТС-1	84,975	14	–	0,025
Біокомпонент МЕЖК	76,493	11,988	11,519	0,0066
Біокомпонент ЕЕЖК	76,893	11,095	11,012	0,0085

На основі даних хроматографічного аналізу МЕЖК та ЕЕЖК визначається вміст вуглецю С (атомна маса 12,011), водню Н (атомна маса 1,00794) і кисню О (атомна маса 15,994) за формулою[4]:

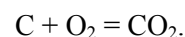
$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=n} C_i \cdot A_i \cdot k_i,$$

де  $C_i$  — вміст атомів вуглецю, водню і кисню в  $i$ -й кислоті;  $A_i$  — атомна маса вуглецю, водню і кисню;  $k_i$  — масова концентрація  $i$ -ї кислоти в метиловому ефірі.

Отже, знаючи зміст у маслі сумарного вуглецю, водню і кисню, визначаємо масову частку кожного компонента, що відповідає складу МЕЖК та ЕЕЖК.

Розрахувавши сумарний вміст С, Н і О, можна визначити кількість повітря, яке необхідне для повного згоряння 1 кг палива складу  $C + H + O = 1,000$ . Оскільки основними хімічними компонентами палив є вуглець, водень, кисень та сірка, рівняння будуть мати такий вигляд:

для вуглецю:



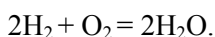
Знаючи молекулярну масу кисню  $O_2$  отримуємо:

$$12 \text{ кг(C)} + 32 \text{ кг(O}_2\text{)} = 44 \text{ кг(CO}_2\text{)};$$

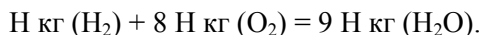
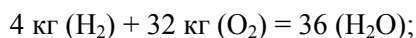
тоді  $C \text{ кг(C)} + (8/3) C \text{ кг(O}_2\text{)} = 11/3 C \text{ кг.}$

Таким чином, для згоряння однієї частини вуглецю необхідно  $8/3$  частин кисню.

Аналогічно розраховуємо викиди водяної пари виходячи з рівняння

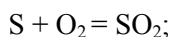


Звідси

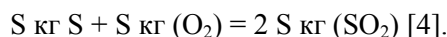


Отже, для згорання однієї частини водню необхідно вісім частин кисню.

Реакція повного згорання сірки має вигляд:



поділивши на 32 отримаємо:



За результатами хроматографічного аналізу було розраховано сумарний вміст С, Н та О в біокомпонентах МЕЖК та ЕЕЖК (табл. 4).

Згідно з методикою розраховували та порівнювали викиди парникових газів під час спалювання традиційних і альтернативних палив.

Таблиця 4

**Викиди парникових газів при згорянні традиційного палива для ПРД та біокомпонентів**

Вид палива	Маса викидів, кг		
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
Паливо для ПДР марки ТС-1	3,117	1,261	0,0005
Біокомпонент МЕЖК	2,805	1,079	0,000132
Біокомпонент ЕЕЖК	2,819	0,99	0,00017

Проаналізувавши отриманні результати у вигляді графіків, було встановлено, що викиди парникових газів по трьох показниках більші від палива марки ТС-1, ніж від біокомпонентів МЕЖК/ЕЕЖК (рис. 3–5).

**Видики SO<sub>2</sub> під час спалювання традиційного палива та біокомпонентів**

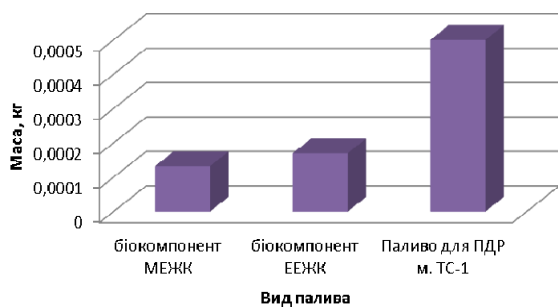


Рис. 3. Викиди SO<sub>2</sub> під час спалювання традиційних палив для ПРД та біокомпонентів

**Викиди H<sub>2</sub>O під час спалювання традиційного палива та біокомпонентів.**

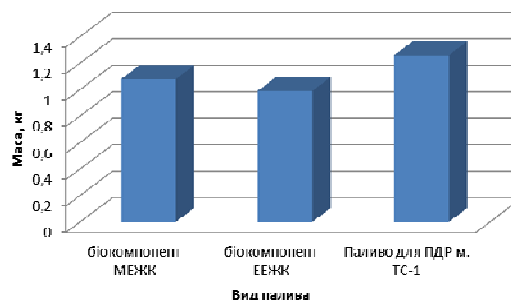


Рис. 4. Викиди H<sub>2</sub>O під час спалювання традиційних палив для ПРД та біокомпонентів

**Викиди CO<sub>2</sub> при спалюванні традиційного палива і біокомпонентів**

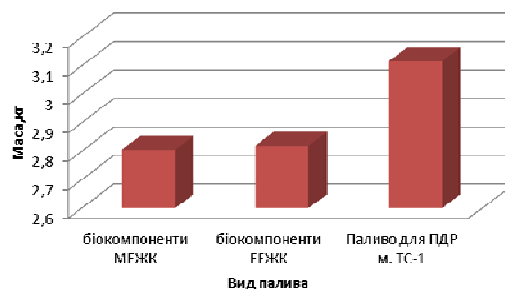


Рис. 5. Викиди CO<sub>2</sub> під час спалювання традиційних палив для ПРД та біокомпонентів

Така залежність викидів безпосередньо пов'язна з вмістом елементів у самому паливі.

Маса викидів CO<sub>2</sub> майже у 1,5 разу більша від палива марки ТС-1 порівняно з біокомпонентами МЕЖК/ЕЕЖК. Це пов'язано з тим, що елементарний вміст С у традиційному паливі становить 14 % маси, а у альтернативному 11,988 % маси.

З одного боку, менший вміст С у біопаливі позитивно впливає на екологію навколишнього середовища, але водночас негативно на теплоту згорання (чим менший вміст С у паливі, тим менша температура згорання).

### Висновок

У статті наведено інформацію про одну із найгостріших екологічних проблем, а саме глобальну зміну клімату. Безпосередній вплив на зміну клімату чинить і авіація, адже є джерелом більш ніж на 2 % світової емісії CO<sub>2</sub> основного парникового газу та інших компонентів.

У зв'язку з цим вважали за необхідне розрахувати масу викидів парникових газів під час спалювання традиційних та альтернативних палив. У результаті отриманих результатів був зроблений висновок, що найбільший внесок викидів парникових газів в атмосферу буде здійснюватись від палива для ПДР марки ТС-1.

Викиди CO<sub>2</sub> від спалювання традиційного палива майже в 1,5 разу більші, ніж від альтернативних палив.

На нашу думку, запровадження в Україні альтернативних палив для ПДР є перспективним з огляду на можливість вирішення зазначених екологічних проблем.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Hileman, J. I.* Near-Term Feasibility of Alternative Jet Fuels / J. I. Hileman, H. M. Wong, I. Waitz — Santa Monica, California: RAND Corporation. — 2009. — 120 p.
2. *Яковлева А. В.* Застосування біопалив для повітряно-реактивних двигунів з метою покращення їх екологічних характеристик / А. В. Яковлева, С. В. Бойченко // *Авиационно-космическая техника и технология.* — Харьков «ХАИ». 2012. — № 7(94). — С. 60–64.
3. *Сайко В. Ф.* Землеробство в контексті змін клімату / В. Ф. Сайко // *Збірник наукових праць ННЦ Інститут землеробства УААН.* — К., 2008. — Спец. вип. — С. 3–14.
4. *Яковлева А. В.* Причинно-следственная связь производства авиационных топлив и современного состояния окружающей среды / А. В. Яковлева, С. В. Бойченко // *Monografia №3 “Systems and means of motor transport” Seria: Transport.* — 2012. — С. 239–246.
5. *Васильев И. П.* Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля : монография / И. П. Васильев. — Луганск : изд-во ВНУ им. В. Даля, 2009. — 240 с.
6. *Яновский Л. С.* Основы авиационной химмотологии / Л. С. Яновский, В. П. Дмитренко, Н. Ф. Дубровкин. — М. : МАТИ. — 2005. — 680 с.
7. *Ергин Д.* Добыча: Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть / Д. Ергин. — М. : Альпина Паблишер. — 2011. — 960 с.
8. *Братков А. А.* Химмотология ракетных и реактивных топлив / А. А. Братков, Е. П. Серегин, А. Ф. Горенков. — М. : Химия. — 1987. — 304 с.
9. *Бейко О. А.* Химия и технология горючего, смазочных материалов и специальных жидкостей. Методы получения реактивных топлив / О. А. Бейко, С. К. Лопатенко, В. Ф. Новикова. — К. : КИИГА. — 1982. — 64 с.
10. *Газ природний, палива та оливи* / М. П. Андрієшин, Я. С. Марчук, С. В. Бойченко, Л. А. Рябоконт. — Одеса : Астропринт. — 2010. — 232 с.

Стаття надійшла до редакції 18.12.2014