

УДК 517.956.27:620.171.3(045)

DOI: 10.18372/0370-2197.4(105).19392

В.О. ПОВГОРОДНІЙ, О.С. БАБНЯК

*Національний авіаційний університет, Україна***ОЦІНКА ЯКОСТІ БІОПАЛИВА, ЯКЕ ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ В АВІАЦІЇ**

У статті проведено аналіз стану біопаливної енергетики України, розглянуто шляхи виробництва біодизелю, біоетанолу та біогазу, описано фізико-хімічні показники та показники якості біопалива в тому числі, яке застосовується в авіації. Показано, що одним із пріоритетних шляхів мінімізації впливу авіації на довкілля є упровадження альтернативних палив. Розглянуто та обґрунтовано перспективні види відновлюваної рослинної сировини, що є найбільш доцільними для виробництва авіаційних біопалив в Україні. Таким чином, використання авіаційних біопалив з вмістом біодобавок на основі рослинних олій дозволяє досягти низку позитивних ефектів: скоротити використання невідновлюваної нафтової сировини, необхідної для виробництва авіаційних палив; знизити кількість викидів відпрацьованих газів, поліпшити деякі експлуатаційні характеристики авіаційних біопалив, знизити енергозалежність України завдяки використанню власної відновлюваної сировини для виробництва авіаційних біопалив; сприяти розвитку сільського господарства, галузей хімічної технології, авіапаливозабезпечення та нафтоперероблення; сприяти підвищенню статусу нашої держави на міжнародному рівні через підтримку політики міжнародних організацій у авіації щодо екологізації авіації через упровадження альтернативних авіаційних палив

Ключові слова: біопаливо, авіація, октанове число, показник якості, функція Харінгтона, етанол, бутанол.

Вступ. Сучасний стан використання біопалив в авіаційній галузі. За визначенням біопаливо виготовляється з природних поновлюваних матеріалів, тому його застосування має істотно менший вплив на екологічну ситуацію на планеті. Споживаючи лише 3% видобутих енергетичних ресурсів авіація завдає значних збитків навколишньому середовищу. Саме турбота про навколишнє середовище стала причиною низки серйозних рішень в галузі цивільної авіації, зокрема щодо виробництва та використання альтернативного авіаційного палива [1-5]. Для застосування в авіації альтернативне паливо має бути не тільки порівняно дешевим, але і подібним за своїми фізико-хімічними характеристиками до нафтового авіаційного палива. У такому випадку для переходу авіапарку на нові види палива не доведеться проводити заміну або модернізацію двигунів, що загрожує додатковими витратами, в тому числі і на створення таких двигунів [6,7]. Найперспективнішим напрямом розвитку біопалива взагалі сьогодні є створення комбінованих сумішей з компонентів рослинного та нафтового. Іншими словами, з різноманітної рослинної сировини виробляється компонент палива, що має непогані, але недостатні для використання в авіації характеристики. Такий компонент додається до нафтової фракції, а також вводиться комплекс присадок. Завдяки ефективному процесу згорання така суміш може бути успішно використана як альтернатива традиційному нафтовому авіаційному паливу [8, 9].

Постійне вичерпання нафтових ресурсів заставляє людство залучувати нові джерела енергії та нові види енергозберігаючих біотехнологій і сировини. Тому

актуальним питанням сьогодення є вдосконалення паливно-енергетичної бази нашої країни та впровадження нових видів палива на основі біомаси.

Аналіз існуючих досліджень. Як і бензини, які використовуються в автомобілях, авіаційні бензини є сумішшю компонентів, які одержуються внаслідок різних технологічних процесів [2]. Базовими фракціями бензинів є: бензин прямої перегонки нафти, бензин каталітичного реформінга, бензин каталітичного крекінга. Основні високооктанові компоненти – алкілат, технічний ізооктан, толуол, піробензол і алкілбензол, етилова рідина. До авіаційних бензинів висувають більш жорсткі вимоги щодо якості та умов їх застосування. Проблема альтернативних видів палива активно висвітлюється в працях багатьох українських вчених [8, 9], які наголошують на необхідності їхнього виробництва, розвитку наукових досліджень, розробці нормативної та технічної бази тощо. Згідно з чинним законодавством України передбачено використання таких альтернативних видів рідкого палива, що можуть замінити використання авіаційного керосину: біоетанол – це спирт етиловий зневоднений, денатурований, виготовлений з біологічно відновлюваної сировини; біометанол – метанол, що виробляється з біомаси та використовується у якості біопалива; біо-ЕТБЕ – етил-трет-бутиловий ефір, виготовлений шляхом синтезу на основі біоетанолу; біопаливом вважається біо- етил-трет-бутиловий ефір з об’ємною концентрацією 47 %; біо-МТБЕ – метил-трет-бутиловий ефір – паливо, що виробляється на основі біометанолу. Біопаливом вважається біо-метил-трет-бутиловий ефір з об’ємною концентрацією 36%.

Взагалі, крім згаданих видів рідкого біопалива можливе також використання й інших оксигенвмісних сполук, які забезпечують більш повне згоряння палива з ароматичними компонентами і підвищують октанове число бензину. Оксигенвмісні сполуки мають миючі й антидетонаційні властивості, у деякій мірі знижують емісію оксиду вуглецю і зменшують витрату палива. Останнім часом знайшли застосування як оксигенвмісні добавки, так і органічні сполуки: МТБЕ (метил-трет-бутиловий ефір), ЕТБЕ (етил-трет-бутиловий ефір), МТАЕ (метил-трет-аміловий ефір), ДПЕ (диізопропіловий ефір), ДМК (диметилкарбоніл), метанол, етанол, трет-бутанол.

Всі згадані види біопалива мають хороші антидетонаційні властивості, які характеризуються октановим числом.

Октанове число – умовна одиниця визначення детонаційної стійкості палива, яка показує відсоток вмісту за об’ємом ізооктану у штучно приготівленій суміші, що складається з ізооктану (детонаційна стійкість дорівнює 100) та н-гептану (детонаційна стійкість дорівнює 0), що за своєю детонаційною стійкістю еквівалентна випробуваному паливу. Якщо, наприклад, еталона суміш містить 92 % ізооктану і 8 % н-гептану, та за своєю детонаційною стійкістю дорівнює випробуваному бензину, тоді октанове число палива дорівнює 92.

Октанове число визначається на спеціальних установках шляхом порівняння характеристик горіння випробуваного палива й еталонних сумішей ізооктану з н-гептаном. Якщо йдеться про автомобільне паливо, його випробування протікають у двох режимах: жорсткому (частота обертання колінвалу 900 хв^{-1} , температура всмоктуваної суміші $149 \text{ }^\circ\text{C}$), що характеризує детонаційну стійкість бензину у режимі роботи двигуна завантаженого автомобіля, при його русі по маршрутах за містом (висока форсованість та найбільша теплонапруженість двигуна), і м’якому (600 хв^{-1} , температура

всмоктуваного повітря 52 °С), що характеризує детонаційну стійкість бензину у режимі роботи двигуна легкового автомобіля при його русі в умовах міста (обмежені потужності, чисельні зупинки, низька теплонапруженість двигуна). Одержують відповідно моторне та дослідницьке октанове числа (відповідно, ОЧМ та ОЧД). Різниця між ними називається чутливістю і характеризує ступінь придатності авіаційного бензину до різних умов роботи двигуна. Вважають, що ОЧД краще характеризує бензини при їзді в міських умовах, а ОЧМ – в умовах високих навантажень і швидкостей. Середнє арифметичне між ОЧД й ОЧМ називають октановим індексом, прирівнюють до октанового числа, що нормується стандартами деяких країн (наприклад, США) і вказується на бензоколонках як характеристика палива, що продається.

Методика досліджень. Функція бажаності Харінгтона. В цій статті є порівняння октанових чисел різних видів авіаційних палив, виробництво яких використовуються на біотехнологіях. Для того, щоб провести якісний аналіз октанових чисел біопалива, скористаємось функцією бажаності Харінгтона.

Для вирішення багатокритеріальних задач (якою є і оптимізація такого багатовимірного об'єкта, як автоматизована система управління випробуваннями різних видів біопалива) використовуються різні методи побудови узагальненого показника, причому одним із найбільш зручних способів виступає узагальнена функція бажаності Харінгтона. Вона виникла в результаті спостережень за реальними розв'язками експериментаторів і має такі корисні властивості, як безперервність, монотонність і гладкість. Запропонована методика порівняння різних палив та технічних систем – на основі оцінок їх технічних характеристик щодо узагальненої функції бажаності Харінгтона – надає деякі способи універсалізації загального підходу до проблеми оцінки ефективності існуючих та новорозроблених автоматичних систем найрізноманітнішого призначення, а також досліджує можливість оптимізації як самих методів порівняння, так і процесу розробки нових автоматичних систем. Замість простого порівняння параметри систем перераховуються на числові значення, а потім обробляються для отримання загального коефіцієнта системи. За цими коефіцієнтами різні системи порівнюються, як кажуть, «у чистому вигляді». Це дозволяє об'єктивніше оцінювати можливості апаратури різних типів, а також полегшує процес порівняння, роблячи його наочнішим. Математичний апарат перерахунку конкретних параметрів абстрактні числові значення вкрай простий. За основу береться одна з логістичних функцій Харрінгтона – так звана «крива бажаності». Її формула – $d = \exp[-\exp(-Y)]$ – визначає функцію з двома ділянками насичення ($d \rightarrow 0$ і $d \rightarrow 1$) та лінійною ділянкою (від $d = 0,2$ до $d = 0,63$).

Ця функція була виведена емпіричним шляхом. Вісь координат Y називається шкалою приватних показників. Вісь d – шкалою бажаності. Проміжок ефективних значень на шкалі приватних показників - $[-2; +5]$. Шкала бажаності ділиться в діапазоні від 0 до 1 на п'ять піддіапазонів: $[0; 0,2]$ - «дуже погано», $[0, 27]$ - «погано», $[0, 37]$; "задовільно", $[0,63; 0,8]$ - "добро", $[0,8; 1]$ - "дуже добре". порівнюваних систем розподіляються в масштабі, що відповідає пред'явленим до них вимогам, на проміжку ефективних значень шкали приватних показників. Отримане значення $d(i)$ для i -го параметра перераховується разом з іншими узагальнений коефіцієнт бажаності – D . Він обчислюється за формулою $D = n \cdot d(1) \cdot d(2) \cdot \dots \cdot d(n)$, де число використовуваних показників параметрів порівняння даної системи. Причому число цих показників може бути різним для різних систем. Це дозволяє порівнювати узагальнені

коефіцієнти навіть тоді, коли відсутня частина параметрів порівняння у різних систем або дані щодо них. Корінь n -го ступеня «згладжує» відхилення, що виникають, а отриманий результат дозволяє оцінювати системи (з певним ступенем точності), так би мовити, «математично».

Але для початку у табл.1 відобразимо октанові характеристики порівнюваних видів біопалива.

Таблиця 1

Октанові характеристики різних видів біопалива

Показники	Біоетанол	Біометанол	Біо-ЕТБЕ	Біо-МТБЕ	Трет-бутанол
ОЧД	106	112	120	125	108
ОЧМ	95	90	102	95	98
(ОЧД + ОЧМ)/2	100,5	101	111	110	103

Порівняння октанових чисел здійснимо за такими показниками як: октанове число, визначене за дослідницьким та моторним методом (ОЧД та ОЧМ відповідно), а також октановим індексом (середнім арифметичним між ОЧД та ОЧМ).

Для оцінки якості продукції краще одночасно використовувати декілька параметрів. У нашому випадку їх три (див. табл.2). Проте кожен параметр має свою розмірність. Щоб їх об'єднати, необхідно ввести для кожного з цих параметрів деяку безрозмірну шкалу. Саме це дозволяє зробити функція Харінгтона (рис.1).

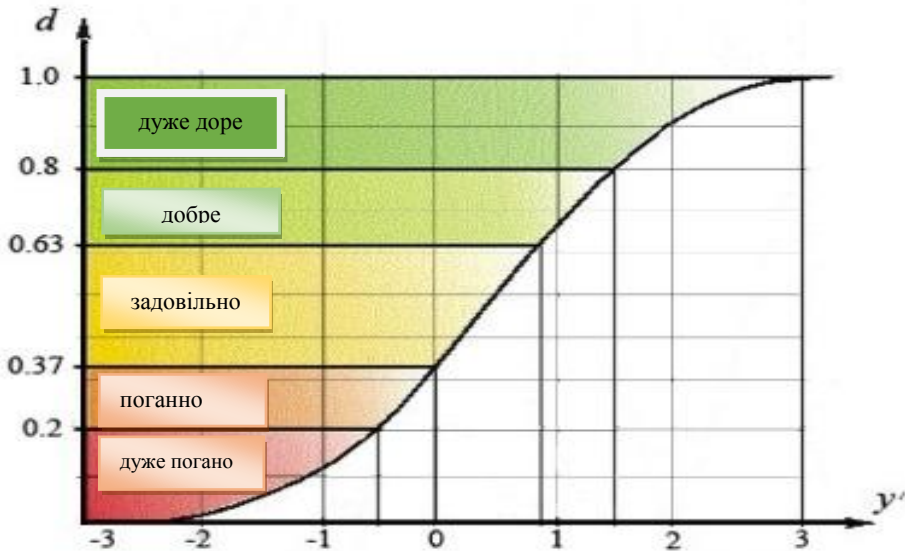


Рис. 1. Загальний вигляд функції Харінгтона

Даний спосіб є найбільш простим для визначення комплексного показника октанових чисел біопалива. В основі визначення комплексного показника лежить узагальнена функція бажаності Харінгтона, яка базується на перетворенні натуральних значень параметрів у безрозмірну шкалу бажаності.

Шкала бажаності має інтервал від нуля до одиниці. Значення $d = 0$ відповідає абсолютно неприйнятному рівню даної властивості, а значення $d = 1$ – найкращому значенню показника октанового числа.

Кожний індивідуальний показник октанового числа визначимо за формулою (1):

$$d = e^{-e^{-y_i}}, \quad (1)$$

де d – безрозмірний показник бажаності показника якості; y_i – безрозмірний допоміжний параметр, який відповідає розмірному значенню натурального i -того показника якості.

Для визначення безрозмірного показника бажаності октанового числа d , необхідно визначити перехід від окремого розмірного показника y_i до безрозмірного y' . Для того, щоб перетворити окремі показники в окрему функцію бажаності d_i необхідно мати формули переходу від однієї шкали в іншу. Пропонується для переходу в безрозмірну шкалу y' за вимірними показниками (y_i) використовувати афінні перетворення, що зберігають відношення розподілу відрізка однаковими. Тобто, якщо мають верхня y_{vi} і нижня y_{ni} межі показника y_i та їм відповідає верхнє y'_v і нижнє y'_n значення показника y' , то величини розподілу відрізка рівні між собою. Звідси випливає, що якщо (2),(3)

$$\lambda = \frac{y_{vi} - y_i}{y_i - y_{ni}}, \text{ то} \quad (2)$$

$$y' = \frac{y'_v + \lambda \cdot y'_n}{1 + \lambda}. \quad (3)$$

Отримані значення відносних показників октанових чисел біопалива d , приведено в табл. 2.

Таблиця 2

Визначення відносних показників октанових чисел біопалива

Відносні показники	Біоетанол	Біометанол	Біо-ЕТБЕ	Біо-МТБЕ	Трет-бутанол
ОЧД	0,92	0,91	0,89	0,93	0,82
ОЧМ	0,75	0,60	0,56	0,63	0,52
(ОЧД + ОЧМ)/2	0,86	0,80	0,77	0,84	0,70

Отримані результати. Знаючи відносні показники октанових чисел порівнюваних видів біопалива, розрахуємо комплексний показник октанових чисел, користуючись формулою (4) визначення середнього геометричного значення відносних показників:

$$D = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n} \quad (4)$$

Розраховані дані відобразимо в табл. 3.

Таблиця 3

Комплексні показники октанових чисел біопалива

Біоетанол	Біометанол	Біо-ЕТБЕ	Біо-МТБЕ	Трет-бутанол
0,84	0,76	0,73	0,79	0,67

Як бачимо з таблиці з усіх порівнюваних видів біопалива найвищий показник октанового числа у біоетанолу, який складає 0,84, що лише підтверджує доцільність виробництва та впровадження цього виду біологічно чистого палива, в тому числі ці види палива використовуються в авіації.

Висновки. В результаті роботи проаналізовано вплив авіаційної галузі на стан довкілля, динаміку, об'єми та структуру викидів відпрацьованих газів повітряних суден. Показано, що одним із пріоритетних шляхів мінімізації впливу авіації на довкілля є упровадження альтернативних палив. Розглянуто та обгрунтовано перспективні види відновлюваної рослинної сировини, що є найбільш доцільними для виробництва авіаційних біопалив в Україні. Одержано біодобавки для використання їх як компонентів авіаційних біопалив. Досліджено основні їх фізико-хімічні властивості. Показано, що біодобавки можуть використовуватися як добавки до палива для поршньових реактивних двигунів (ПРД) у певному співвідношенні. Досліджено фізико-хімічні властивості зразків біопалив та порівняно їх з вимогами до якості традиційного палива для ПРД. Встановлено, що введення біодобавок до палива для ПРД у кількості до 20 % цілком задовольняє вимоги стандартів. Досліджено екологічні властивості нових біопалив що містять нафтове паливо для ПРД та біодобавки у кількості 10 % та 20 % та порівняно їх з нафтовим паливом для ПРД. Розраховано індекси емісії та кількість викидів продуктів повного згорання палив, а також оксидів азоту. Показано, що використання біопалив дозволяє скоротити викиди CO_2 до 22,61 %, викиди H_2O до 23,51 %, викиди SO_2 до 56,95 %, а викиди NO_x до 29,59 %. Таким чином, використання авіаційних біопалив з вмістом біодобавок на основі рослинних олій дозволяє досягти низку позитивних ефектів: 1) скоротити використання невідновлюваної нафтової сировини, необхідної для виробництва авіаційних палив до 20 %; 2) знизити токсичність відпрацьованих газів повітряних суден, зокрема вміст оксидів сірки до 57 %; 3) знизити кількість викидів відпрацьованих газів, зокрема CO_2 до 22,61 %, викидів H_2O до 23,51 % та викидів NO_x до 29,59 %; 4) поліпшити деякі експлуатаційні характеристики авіаційних біопалив, зокрема підвищити пожежну безпечність до 16,3%; - Знизити енергозалежність України завдяки використанню власної відновлюваної сировини для виробництва авіаційних біопалив; 5) сприяти розвитку сільського господарства, галузей хімічної технології, авіапаливозабезпечення та нафто перероблення; 6) сприяти підвищенню статусу нашої держави на міжнародному рівні через підтримку політики міжнародних організацій у сфері цивільності авіації щодо екологізації авіації через упровадження альтернативних авіаційних палив.

Крім того, зараз досліджуються зразки авіаційних біопалив, що містять нафтове паливо для ПРД та біодобавки у кількості 10 %, 20 % та 30 %. Досліджено фізико-хімічні властивості зразків біопалив та порівняно їх з вимогами до якості традиційного палива для ПРД. Встановлено, що введення

біодобавок до палива для ПРД у кількості до 20 % цілком задовольняє вимоги стандартів. Досліджено екологічні властивості нових біопалив що містять нафтове паливо для ПРД та біодобавки у кількості 10 % та 20 % та порівняно їх з нафтовим паливом для ПРД. Розраховано індекси емісії та кількість викидів продуктів повного згорання палив, а також оксидів азоту. Показано, що використання біопалив дозволяє скоротити викиди CO₂ до 22,61 %, викиди H₂O до 23,51 %, викиди SO₂ до 56,95 %, а викиди NO_x до 29,59 %.

Також слід сказати, що заміна автомобільними бензинами авіаційних в існуючому авіаційному парку поршневої авіації України є неприпустимою, оскільки автомобільний бензин не відповідає вимогам, які висувають до авіаційних палив.

На сьогодні переважно розробляються авіаційні бензини з вмістом етанолу. Оскільки він є наймасовішим продуктом серед аліфатичних спиртів. Етанол найбільше підходить для застосування на практиці за рахунок великого обсягу виробництва і низької токсичності. У порівнянні з метанолом він є менш корозійно агресивним та гігроскопічним, краще розчиняється у вуглеводнях. Таким чином, робимо висновок, що завдяки етанолу бензин збагачується киснем та це сприяє більш повному згорянню палива.

Список літератури

1. Дубровін В. О. Біопалива (технології, машини і обладнання) / В. О. Дубровін та ін. – ЦТІ «Енергія та електрифікація», 2004, – 256 с.
1. Постанова КМУ «Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року» № 179 від 03.03.2021. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-%D0%BF#n25>
2. Єрмілов С.Ф. Державна політика енергоефективності в українському та європейському контексті// Економіка і прогнозування. – 2007. – № 2. – С. 27 – 42.
3. Закон України «Про альтернативні види рідкого та газового палива». https://ips.ligazakon.net/document/view/t001391?ed=2016_11_01
4. Закон України «Про розвиток виробництва та споживання біологічних видів палива». <https://ips.ligazakon.net/document/view/jf5t000b?an=3>
5. Калетнік Г. М., Пришляк В. М. Біопалива: ефективність їх виробництва та споживання в АПК України. Навч. посібник. – К: Аграрна наука, 2010. – 327 с.
6. L. Tao, A. Milbrandt, Y. Zhang et al. Technoeconomic and resource analysis of hydroprocessed renewable jet fuel // *Biotechnol Biofuels*. – 2017, 10, 261. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0945-3>
7. Козин С. Перспективы использования биотоплива в экономике АПК// АПК: экономика, управление. – 2007. – № 12. – С. 68 – 70.
8. Макаруч О. Г. Світові та вітчизняні тенденції розвитку виробництва біопального// Економіка АПК. – 2008. – № 7. – С. 152 – 155.

Повгородній Володимир Олегович – кандидат техн. наук, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів. Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: povgorod@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

Бабняк Олександр – студент групи ПМ-101. Національний авіаційний університет, пр-т Любомира Гузара 1. М. Київ Україна, 03058, сервісний інженер ND Group Inc Проспект Академіка Корольова 1. Київ 03134, E-mail: lelyushoksahar@ukr.net

V.O. POVHORODNII, O.S.BABNYAK

QUALITY ASSESSMENT OF BIOFUEL USED IN AVIATION

The paper analyzes the state of the biofuel energy industry in Ukraine, examines the ways of producing biodiesel, bioethanol, and biogas, describes the physicochemical indicators and quality indicators of biofuels, including those used in aviation. It is shown that one of the priority ways to minimize the impact of aviation on the environment is the introduction of alternative fuels. Prospective types of renewable plant raw materials, which are the most appropriate for the production of aviation biofuels in Ukraine, are considered and substantiated. Thus, the use of aviation biofuels with the content of bio-additives based on vegetable oils makes it possible to achieve a number of positive effects: to reduce the use of non-renewable petroleum raw materials necessary for the production of aviation fuels; to reduce the amount of emissions of exhaust gases, to improve some operational characteristics of aviation biofuels, to reduce Ukraine's energy dependence thanks to the use of its own renewable raw materials for the production of aviation biofuels; to promote the development of agriculture, branches of chemical technology, aviation fuel supply and oil refining; contribute to raising the status of our state at the international level by supporting the policy of international organizations in aviation regarding the greening of aviation through the introduction of alternative aviation fuels

Key words: biofuel, aviation, octane number, quality indicator, Harrington function, ethanol, butanol.

References

1. Dubrovin V. AT. Biofuels (technologies, machines and equipment) / V. O. Dubrovin and others. - CTI "Energy and Electrification", 2004, - 256 p.
2. Resolution of the CMU "On approval of the National Economic Strategy for the period until 2030" No. 179 dated 03.03.2021. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-%D0%BF#n25>
3. Ermilov S.F. State policy of energy efficiency in the Ukrainian and European context// Economy and forecasting. – 2007. – No. 2. – S. 27-42.
4. Law of Ukraine "On alternative types of liquid and gas fuels". https://ips.ligazakon.net/document/view/t001391?ed=2016_11_01
5. Law of Ukraine "On development of production and consumption of biological fuels". <https://ips.ligazakon.net/document/view/jf5t000b?an=3>
6. Kaletnik H. M., Pryshlyak V. M. Biofuels: the efficiency of their production and consumption in the agricultural sector of Ukraine. Education manual. - K: Agrarian science, 2010. - 327 p.
7. L. Tao, A. Milbrandt, Y. Zhang et al. Technoeconomic and resource analysis of hydroprocessed renewable jet fuel // Biotechnol Biofuels. – 2017, 10, 261. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0945-3>
8. Kozin S. Prospects of using biofuel in the economy of the agricultural sector// Agricultural sector: economy, management. – 2007. – No. 12. – S. 68-70.
9. Makarchuk O. G. Global and domestic trends in the development of biofuel production// Economy of the agricultural sector. – 2008. – No. 7. – S. 152 - 155.

Volodymyr O. Povhorodnii – PhD in technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics Material Engineering of the National Aviation University "NAU", Lyubomyr Huzar Avenue, Kyiv, Ukraine, e-mail: povgorod@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0003-1640-1004>

Oleksandr S. Babnyak- student of the PM-101 group, National Aviation University, 1 Lyubomyr Huzar Avenue, Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 3990679@stud.nau.edu.ua.