

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.541.1

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.83

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ПНЕВМОДВИГУНА ДЛЯ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ
УСТАНОВКИ МІСЬКОГО ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ

Нечипорук М. В., Воробйов Ю. А., Пода В. Б.

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»

Анотація. Розглянуто питання щодо принципів вибору основних показників поршневого пневмодвигуна гібридної силової установки «ДВЗ-пневмодвигун» легкового автомобіля міського призначення, що використовує скраплене повітря. На основі розрахункових досліджень показників пневмодвигунів з різними вихідними даними для прототипу автомобіля, що рухається зі швидкістю 60 км/год, вибраний і запропонований для впровадження пневмодвигун із показниками, які забезпечують мінімальні витрати повітря за умов прийнятних габаритів.

Ключові слова: гібридна силова установка, пневмодвигун, двигун внутрішнього згорання, автомобіль, автотранспортний засіб, скраплене повітря, показники робочого процесу.

Вступ

Тенденція зниження шкідливих викидів двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), особливо автомобільного транспорту, та зменшення витрат вуглеводневих палив, що склалася наприкінці ХХ століття, призвела до виникнення альтернативних більш екологічно чистих та економічних силових установок для транспортних засобів. На сьогодні це виключно електричні та гібридні силові установки, зокрема «ДВЗ-електродвигун».

Але ще з кінця ХІХ століття були здійснені поодинокі та досить успішні спроби використання енергії стисненого повітря для пересування транспортних засобів, зокрема залізничних локомотивів, трамваїв та деяких видів автомобілів. Згодом, у ХХ столітті, такі пневмосилові установки використовувалися і використовуються виключно для шахтних транспортних засобів і для засобів переміщення вантажів у цехах підприємств.

Хвиля боротьби за екологічність двигунів транспортних засобів змусила їх розробників у ряді країн на початку ХХІ століття знов звернути увагу на можливість використання як силової установки для транспортних засобів пневмодвигунів [1–3 та ін.]. Адже основною їх перевагою є абсолютна екологічність на відміну від електродвигунів та ДВЗ, виробництво яких та утилізація силових акумуляторних батарей створює проблеми для екології.

Основним недоліком пневмодвигунів є надзвичайно низька щільність енергії стисненого повітря порівняно з вуглеводневими паливними ДВЗ, що в разі використання їх як

силових установок автомобільного транспорту значно скорочує відстань пробігу останнього на заправці.

Таким чином, абсолютна екологічність пневмодвигунів поряд із низькою щільністю енергоносія дозволяє розглядати їх як перспективні силові установки для автотранспортних засобів саме міського призначення.

Однак на сьогодні більш перспективними є гібридні силові установки «ДВЗ-пневмодвигун» [2, 4–6], які дозволяють значно підвищити пробіг автотранспортного засобу порівняно з пневмосиловими установками і одночасно значно зменшити кількість шкідливих викидів ДВЗ.

Аналіз публікацій

Переважає більшість досліджень і практичних впроваджень у світі щодо застосування пневмодвигунів для автомобільного транспорту спрямована на розроблення пневмосилових установок. Але окремі розроблення стосуються також гібридних установок «ДВЗ-пневмодвигун». Так, проект французької компанії Motor Development International (MDI) на межі 2000-х років здійснював спільну роботу з розроблення бензинового та пневмодвигуна [7]. У США над розробленням гібридних установок цього типу працюють фірма Scuderі [3] та науковці Каліфорнійського університету разом зі спеціалістами концерну Ford [8]. Французький концерн PSA Peugeot Citroen 2013 року виставив декілька концепт-автомобілів із силовими установками Hybrid Air [2].

На території колишнього СРСР проблемами розроблення пневмодвигунів і гібридних установок для транспортних засобів займаються науковці ХНАДУ в Україні [5, 6 тощо] та Омського державного технічного університету в Росії [4].

Як показує огляд наявних наукових праць, що описують роботу пневмодвигунів для транспортних засобів, майже всі вони використовуються як енергоносії стисненого повітря переважно із максимальним тиском у балонах до 30 МПа, що, як зазначалося вище, значно обмежує відстань руху транспортного засобу на заправці. Покращити цей показник, а також ефективність пневмодвигунів можна шляхом використання скрапленого повітря або азоту. Так, порівняно зі стисненим до 30 МПа повітрям, щільність енергії скрапленого повітря майже в 2,4 рази перевищує щільність енергії стисненого. Це означає, що за умови однаково заправлених об'ємів енергоносіїв майже на стільки ж можливо збільшити відстань руху транспортного засобу на пневмодвигуні.

У світі над розробленнями пневмодвигунів, що використовують скраплене повітря або азот, працюють лише науковці США (університет штату Техас та Вашингтонський університет) та України (ХНАДУ та ФТІНТ НАН України).

Науковцями ХНАДУ та ФТІНТ НАН України з початку 2000-х років виконано досить значний обсяг теоретичних та експериментальних робіт зі створення кріоавтомобіля [9], зокрема було розроблено експериментальний зразок такого кріоавтомобіля.

Великий обсяг теоретичних та експериментальних робіт здійснено науковцями ХНАДУ з досліджень показників роботи пневмодвигунів у складі силової установки транспортного засобу [5, 6, 10, 11 тощо], але майже всі ці дослідження стосувалися показників роботи V-подібного чотирициліндрового зразка пневмодвигуна, створеного фахівцями ХНАДУ на базі ДВЗ МеМЗ-968 як експериментального.

Автори роботи [6] розглянули досить важливе питання щодо вибору показників пневмодвигуна для гібридної силової установки.

Мета і постановка завдання

У зазначеній вище роботі [6] фахівцями ХНАДУ розроблені рекомендації щодо вибору параметрів пневмодвигуна у складі гібридної установки з урахуванням його потуж-

ності, економічності та розмірів у широкому діапазоні потужностей від 5 до 30 кВт, однак не вирішені деякі завдання:

по-перше, відсутні рекомендації щодо вибору режимних і габаритних показників такого пневмодвигуна для використання його в гібридній установці того чи іншого транспортного засобу, зокрема чотири- або п'ятимісного легкового автомобіля (наприклад, міського таксі);

по-друге, не визначено, яким чином і за допомогою якого джерела енергії підігрівати стиснене повітря для подачі в циліндри до температур у межах до 473 К і вище для забезпечення найнижчого допустимого рівня температур на виході з циліндрів.

У гібридних силових установках «ДВЗ-пневмодвигун» джерелом теплової енергії для підігріву повітря може і повинен бути ДВЗ, а саме його теплота, що відводиться до системи охолодження, та теплота відпрацьованих газів. У разі використання такої схеми підігріву повітря передбачається паралельна спільна робота ДВЗ і пневмодвигуна, основні показники останнього як режимні, так і габаритні, будуть залежати від співвідношення потужностей обох двигунів установки.

У зв'язку із вищевикладеним метою дослідження було визначення і вибір режимних та габаритних показників пневмодвигуна, що працює в паралельному режимі з ДВЗ у складі гібридної силової установки міського легкового автомобіля і використовує для підігріву повітря витрачене тепло ДВЗ.

Методика дослідження

Дослідження стосувалися силової гібридної установки «ДВЗ-пневмодвигун» чотиримісного легкового автомобіля класу А міського призначення, що використовує скраплене повітря або азот, але результати дослідження можуть також бути використані для використання установки зі стисненим повітрям. Визначення і вибір раціональних показників пневмодвигуна здійснювалися для найбільш характерного сталого режиму роботи установки, що відповідає руху легкового автомобіля зі швидкістю 60 км/год горизонтальною дорозгою з сухим асфальтовим покриттям. Для розрахункових досліджень були вибрані такі вихідні дані:

1) повна маса автомобіля з урахуванням додаткової до неї системи ДВЗ-мас пневмодвигуна та системи постачання його скрапленим повітрям приймалася 1200 кг;

2) розрахунки здійснювалися для трьох варіантів розподілу потужностей між ДВЗ і

пневмодвигуном, а саме: 50/50, 60/40, 70/30 з припущенням, що потужності розподіляються на дві незалежні головні осі. Одночасно привод головної осі пневмодвигуном (більш доцільно задньої) відбувається з передатним відношенням 1:1, а привод головної осі (передньої) двигуном внутрішнього згорання відбувається на прямій передачі коробки переключення передач і через головну передачу з передатним відношенням 4,056;

3) як ДВЗ використовується бензиновий трициліндровий чотиритактний двигун з робочим об'ємом 0,796 л зі ступенем стискання 9;

4) як пневмодвигун вибраний трициліндровий поршневий двигун зі співвідношенням ходу поршня до діаметра циліндра $S/D = 1,0$. Вибір трициліндрового рядного двигуна дозволяє за умов одного й того ж робочого об'єму з чотирициліндрового зменшити його довжину на 17,5 %, а вибір відношення $S/D = 1,0$ забезпечує його мінімальну масу [12];

5) як свідчать попередні дослідження теоретичних циклів пневмодвигунів, основними вихідними параметрами, що найбільше впливають на його економічні та габаритні показники, є величина тиску повітря на вході до циліндрів і ступінь їх наповнення, тому з метою вибору раціональних показників пневмодвигуна для гібридної силової установки його показники визначалися для різних значень тиску повітря на вході до циліндрів у діапазоні $p_1 = 0,5\text{--}1,6$ МПа і з різними ступенями наповнення в діапазоні $\varepsilon_1 = 0,2\text{--}0,8$. Інші вихідні дані для розрахунку пневмодвигуна приймалися згідно з рекомендаціями [12], а саме:

- значення тиску і температури повітря в кінці випуску: $p_2 = 0,115$ МПа, $T_2 = 223$ К;
- відносний мертвий об'єм $\varepsilon_0 = 0,05$;
- кінцевий тиск зворотного стискання $p_4 = 0,5 \cdot (p_1 + p_2)$;
- коефіцієнт a в формулі залежності коефіцієнта повноти індикаторної діаграми від обертів двигуна дорівнює 0,0006 відповідно до експериментальних даних для поршневих двигунів [12];
- коефіцієнт витоку повітря $\eta_v = 0,95$;
- показник політроп розширення і стиснення $k = 1,41$, виходячи з використання скрапленого повітря, що передбачає подачу до циліндрів сухого повітря;

б) кінцева температура випаровування скрапленого повітря та його підігріву теплом навколишнього середовища з температурою $T_a = 293\text{--}298$ К приймалася $T_0 = 273$ К. Прин-

ципова можливість такого підігріву наведена в експериментальних і теоретичних роботах фахівців ХНАДУ та ФТІНТ НАН України [9, 13];

7) підігрів повітря від температури T_0 до потрібної на вході до циліндрів T_1 відбувається за рахунок тепла, що відводиться від ДВЗ охолоджувальною рідиною (ОР) і його відпрацьованими газами (ВГ).

Розрахування енергетичного балансу підігріву повітря ОР здійснювалось із застосуванням середньостатистичного значення питомої кількості теплоти, що знімається з бензинового ДВЗ охолоджувальною рідиною, а саме: $q_{ox} = 2800$ кДж/(кВт·год.).

Для визначення кінцевої температури T_1 підігріву повітря за рахунок тепла ВГ за допомогою програмного комплексу ДИЗЕЛЬ-РК здійснювались розрахування показників роботи ДВЗ, зокрема витрат і середньостатистичної температури ВГ, на відповідному режимі руху автомобіля.

Усі розрахування показників пневмодвигуна здійснювались за загально визнаною методикою К. С. Борисенка [12]. Однак у зазначеній методиці в розрахунках теоретичного циклу пневмодвигунів із неповним розширенням приймається припущення, що температура кінця розширення дорівнює кінцевій температурі повітря на випуску, тобто $T_2' = T_2$. Такої ж помилки припускаються майже всі автори досліджень цього теоретичного циклу пневмодвигуна, адже процес випуску повітря в такому циклі з неповним розширенням відбувається за ізохорою, що значно знижує його кінцеву температуру випуску T_2 порівняно з температурою кінця розширення T_2' . У дійсному ж циклі пневмодвигуна процес випуску робочого тіла відбувається зі зменшенням його маси в циліндрі, як і в циклах ДВЗ. Тому доцільним необхідно вважати визначення кінцевої температури випуску повітря згідно з приблизною формулою Є. К. Мазинга, що дозволяє оцінити температуру залишкових газів у циліндрах ДВЗ.

У зв'язку із зазначеним і відповідно до прийнятого мінімально допустимого рівня температури повітря в кінці випуску, а саме $T_2 = 223$ К, температура повітря в циліндрі в кінці розширення вираховувалася за формулою

$$T_2' = T_2 \left(\frac{p_2'}{p_2} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Результати дослідження

Згідно з рівнянням балансу потужностей під час руху легкового автомобіля зі швидкістю 60 км/год та із зазначеними вище вихідними даними сумарна потужність гібридної установки становить $N_y = 21,58$ кВт під час обертання коліс $n_k = 636,6$ об/хв. Отже, для прийнятих варіантів розподілу потужностей ефективні потужності ДВЗ ($N_{двз}$) і пневмодвигуна ($N_{пд}$) будуть становити:

– для варіанта 50/50 $N_{двз} = 10,79$ кВт, $N_{пд} = 10,79$ кВт;

– для варіанта 60/40 $N_{двз} = 12,95$ кВт, $N_{пд} = 8,63$ кВт;

– для варіанта 70/30 $N_{двз} = 15,11$ кВт, $N_{пд} = 6,47$ кВт.

Кількість обертів ДВЗ із приводом коліс через головну передачу $n_{двз} = 2582$ об/хв, кількість обертів пневмодвигуна, що безпосередньо приводить колеса до руху, $n_{пд} = 636,6$ об/хв.

Характер зміни показників робочого циклу пневмодвигуна залежно від тиску повітря на впуску і ступеня наповнення циліндрів наведені на рис. 1 і 2, де D – діаметр циліндрів (для трициліндрового пневмодвигуна з варіантом розподілу потужностей 60/40); $g_{еп}$ – питома ефективна корисна витрата повітря; T_1 – температура повітря на вході до циліндрів, яка визначалася згідно з призначеною мінімальною температурою повітря в кінці випуску $T_2 = 223$ К і визначеними значеннями тиску p_2 і температури T_2 в кінці розширення; η_e – ефективний повний ККД двигуна з урахуванням прийнятих значень коефіцієнтів витоку повітря в циліндрах, повноти індикаторної діаграми та механічного ККД двигуна; T_2 – температура кінця розширення, що визначалася за наведеною вище формулою; p_2 – тиск кінця розширення.

Аналіз характеру кривих на рис. 1 і 2 дозволяє зробити попередні висновки щодо вибору таких показників пневмодвигуна, які б відповідали раціональному співвідношенню його економічних і габаритних показників.

Так, підвищення тиску повітря на вході до циліндрів (див. рис. 1) дозволяє значно зменшити діаметри циліндрів, а отже, і габарити пневмодвигуна (на 36–38 % у діапазоні тисків p_1 від 0,5 МПа до 1,6 МПа) і одночасно знизити питому ефективну корисну витрату повітря на 43–48 %, але одночасно таке підвищення тиску p_1 призводить до необхідності за умов прийнятих обмежень значно підвищувати і початкову температуру повітря T_1 на вході (від 344–359 К для $p_1 = 0,5$ МПа до

487–528 К для $p_1 = 1,6$ МПа), що потребує збільшення витрат стороннього джерела енергії для підігрівання повітря. У зв'язку з підвищенням тиску повітря на вході помітно зростають також кінцеві значення тиску і температури наприкінці розширення, а отже, падає ефективний ККД двигуна.

Меншою мірою, але також до зменшення габаритів двигуна призводить підвищення ступеня наповнення циліндрів ϵ_1 (рис. 2), але питома ефективна витрата палива у цьому випадку зростає. Вплив ступеня наповнення на початкову температуру повітря T_1 , як наведено на рис. 2, незначний, в той час як зі зрозумілих причин зростання ϵ_1 , як і підвищення тиску повітря на вході p_1 , призводить до збільшення параметрів T_2 і p_2 повітря наприкінці розширення і падіння ефективного ККД двигуна.

Таким чином, як показує характер зміни параметрів робочого циклу і габаритів пневмодвигуна, визначитися однозначно з вихідними параметрами повітря на вході до циліндрів і ступенем їх наповнення, які б відповідали найкращим значенням усіх цих параметрів, неможливо. Тому критеріями вибору вихідних параметрів для пневмодвигунів автотранспортних засобів необхідно вважати такі, що забезпечують їх найкращі або раціональні експлуатаційні показники, якими є питома ефективна корисна витрата повітря $g_{еп}$, габарити двигуна, а отже, його маса, що визначаються діаметрами D -циліндрів, температура T_1 повітря на вході до циліндрів, яка визначає додаткові енерговитрати для підігріву повітря.

На рис. 3 наведена взаємозалежність між діаметром циліндра трициліндрового пневмодвигуна, потужністю 8,63 кВт, і питомаю ефективною корисною витратою повітря за умови різних вихідних значень тиску повітря на вході до циліндрів і ступеня наповнення. Характер цієї залежності свідчить про те, що зниження витрат повітря з одночасним зменшенням габаритів пневмодвигуна можливе лише за умови застосування високого тиску повітря на вході до циліндрів. Що ж до вибору оптимального значення ступеня наповнення циліндра, то його вплив, як це видно з рис. 2 і 3, на витрату повітря і розміри двигуна протилежний. Тому вибір раціонального значення ϵ_1 , що відповідало б і невеликим витратам повітря, і малим габаритам двигуна, необхідно шукати у відносних змінах $g_{еп}$ і D за ступенем наповнення.

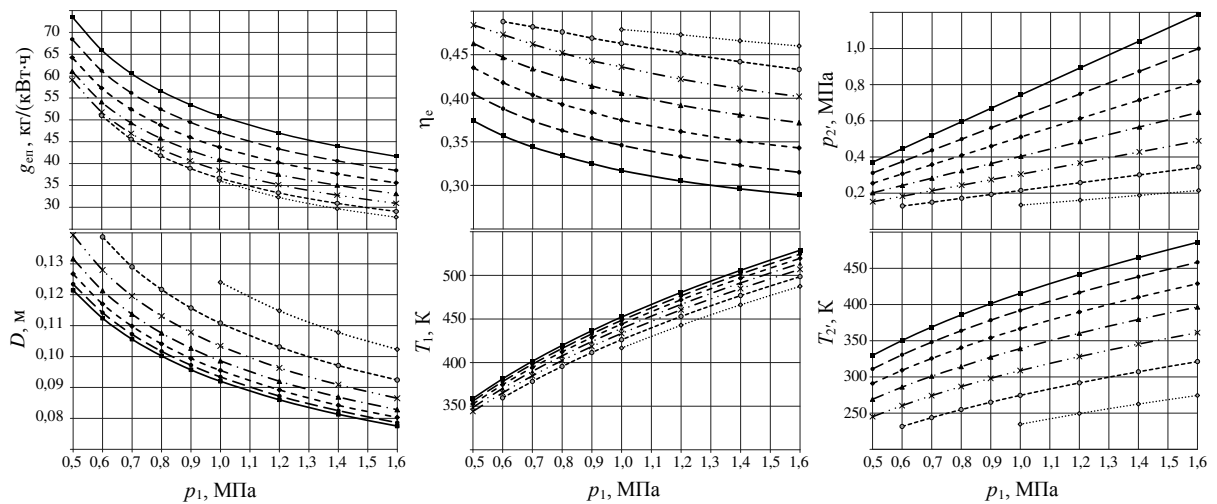


Рис. 1. Залежність основних показників пневмодвигуна від тиску повітря на вході до циліндрів для різних значень ступеня наповнення ϵ_1 :

—○— $\epsilon_1 = 0,2$; —●— $\epsilon_1 = 0,3$; —×— $\epsilon_1 = 0,4$; —▲— $\epsilon_1 = 0,5$; —◆— $\epsilon_1 = 0,6$; —♦— $\epsilon_1 = 0,7$; —■— $\epsilon_1 = 0,8$

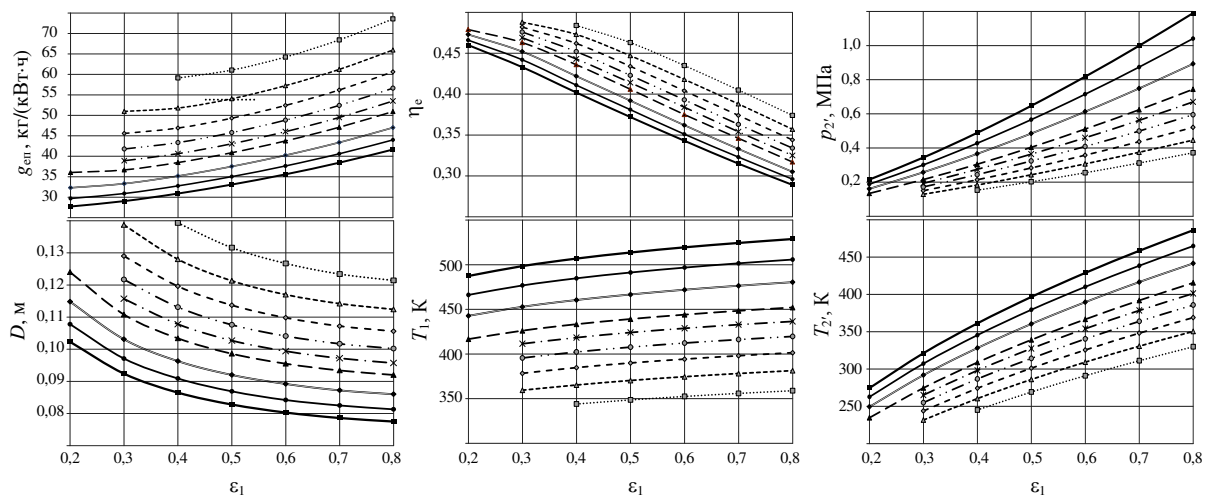


Рис. 2. Залежність основних показників пневмодвигуна від ступеня наповнення для різних значень тиску повітря на вході до циліндрів p_1 , МПа:

—○— p_1 —●— p_1 —×— p_1 —▲— p_1 —◆— p_1 —♦— p_1 —■— p_1
 —●— p_1 —■— $p_1 = 1,6$

Так, для зазначеного вище трициліндрового двигуна, потужністю 8,63 кВт, на рис. 4 наведена залежність зміни цих показників від ϵ_1 відповідно до їх максимальних значень у визначеному діапазоні ϵ_1 для $p_1 = 1,6$ МПа, що дозволяє вибрати таке раціональне значення ϵ_1 , яке дорівнює 0,52.

Однак прагнення використання високих тисків повітря на вході до циліндрів вимагає згідно з рис. 1 і 2 також значного підвищення його початкової температури T_1 . Так, для визначених вище вихідних показників $p_1 = 1,6$ МПа і $\epsilon_1 = 0,52$ вона повинна бути на

рівні 515 К. Для досягнення таких високих температур робочого повітря на борту автомобіля повинно бути досить потужне джерело теплової енергії, потужність якого, наприклад, для варіанту, що розглядається, становить якнайменш 21 кВт.

Як вже відзначалося вище, в гібридних установках «ДВЗ-пневмодвигун» джерелом теплової енергії для підігріву повітря повинно бути витрачене тепло двигуна внутрішнього згорання. У такій установці режимні та габаритні показники пневмодвигуна будуть визначатися режимом роботи ДВЗ і розподі-

лом потужностей між ДВЗ і пневмодвигуном.

Для визначення найбільш доцільних показників пневмодвигуна і відповідного розподілу потужностей між ДВЗ і пневмодвигуном для вибраного варіанта установки, потужністю 21,58 кВт, на підставі теплових балансів між охолоджувальною рідиною і відпрацьованими газами ДВЗ з одного боку і повітрям із другого були розраховані вихідні рівноважні температури повітря залежно від його питомої витрати.

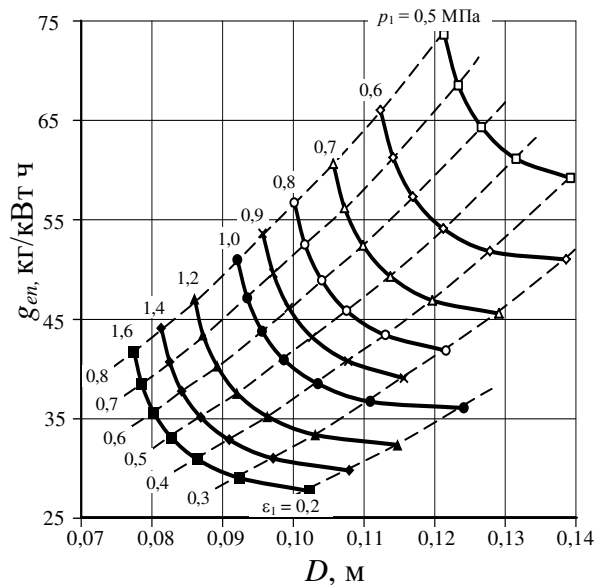


Рис. 3. Залежність питомої корисної витрати повітря від діаметра циліндра для пневмодвигуна, потужністю 8,63 кВт, для різних значень p_1 і ϵ_1

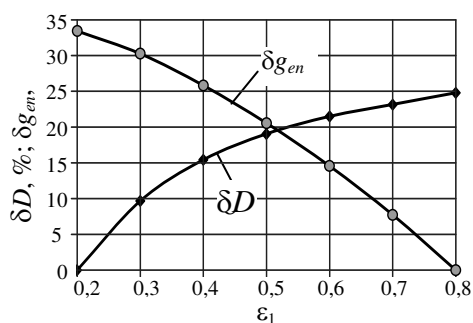


Рис. 4. Характер зміни діаметра циліндра і питомої корисної витрати повітря за ступенем наповнення відповідно до максимальних їх значень для пневмодвигуна, потужністю 8,63 кВт і $p_1 = 1,6$ МПа

У цьому випадку згідно з розрахунками показників ДВЗ на відповідних режимах його роботи з використанням програмного комплексу ДИЗЕЛЬ-РК витрата ВГ ДВЗ $G_{ВГ}$ і їх температура $T_{ВГ}$ становили:

- для $N_{ДВЗ} = 10,79$ кВт – $G_{ВГ} = 0,0122$ кг/с, $T_{ВГ} = 820$ К;
- для $N_{ДВЗ} = 12,95$ кВт – $G_{ВГ} = 0,0137$ кг/с, $T_{ВГ} = 836$ К;
- для $N_{ДВЗ} = 15,11$ кВт – $G_{ВГ} = 0,0156$ кг/с, $T_{ВГ} = 848$ К.

Такі залежності у вигляді кривих $T'_{p.n.}$, $T''_{p.n.}$ і $T'''_{p.n.}$, що відповідають розподілам потужностей між ДВЗ і пневмодвигуном 50/50, 60/40 та 70/30, наведені на рис. 5.

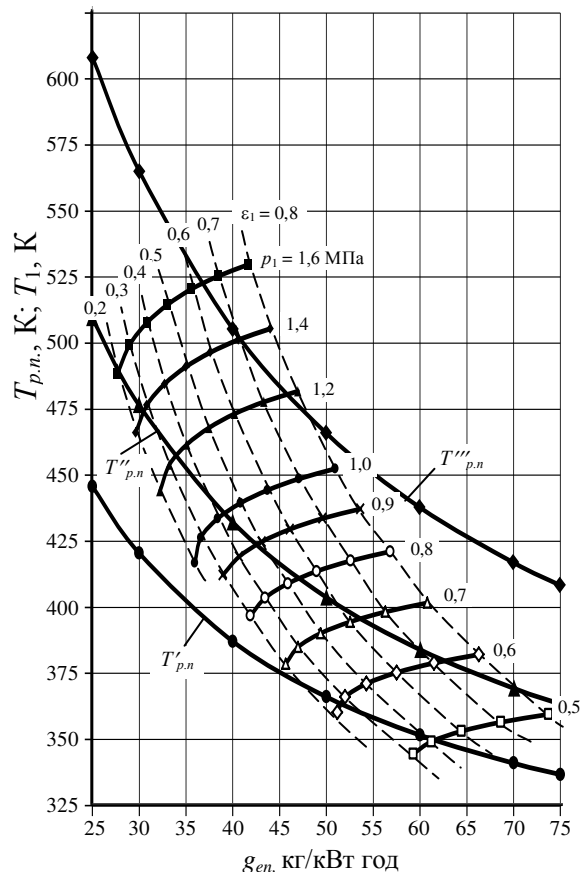


Рис. 5. Зміна рівноважних температур $T_{p.n.}$ повітря внаслідок його підігріву охолоджувальною рідиною і відпрацьованими газами ДВЗ для співвідношення потужностей 50/50, 60/40 та 70/30 і температур T_1 повітря на вході до циліндрів для різних значень p_1 і ϵ_1 за питомою корисною витратою повітря

На криві $T_{p.n.}(g_{en})$ накладені залежності взаємозміни потрібної початкової температури повітря T_1 і питомої витрати повітря g_{en} для різних вихідних значень p_1 і ϵ_1 . Точки перетину кривих $T_{p.n.}(g_{en})$ і $T_1(g_{en})$ дозволяють визначити всі можливі варіанти показників

пневмодвигуна для різних розподілів між потужностями ДВЗ і пневмодвигуна.

Отримані таким чином залежності (див. рис. 5) свідчать про те, що для максимального використання витраченої теплоти ДВЗ для підігріву повітря і досягнення якнайменших витрат повітря і габаритів пневмодвигуна розподіл потужностей між ДВЗ і пневмодвигуном у такій гібридній установці повинен дорівнювати приблизно 60/40–65/35, а тиск повітря на вході до циліндрів пневмодвигуна не менше 1,0 МПа. Таким чином, збільшення відносної потужності ДВЗ у такій гібридній установці небажано, тому більш доцільним є режим її роботи з розподілом потужностей 60/40, а отже, згідно з рис. 5, використання тисків повітря на вході до циліндрів пневмодвигуна більше ніж 1,6 МПа не має сенсу.

Відповідно до вищезазначеного в табл. 1 наведені показники можливих варіантів пневмодвигуна для установки з розподілом потужностей 60/40, які відповідають точкам перетину кривої $T_{p.n.}''(g_{ep})$ кривими $T_1(g_{ep})$ для тисків p_1 від 1,0 до 1,6 МПа.

Таблиця 1 – Показники варіантів пневмодвигуна для розподілу потужностей 60/40

Показники	№ варіанта			
	I	II	III	IV
p_1 , МПа	1,0	1,2	1,4	1,6
ε_1	0,431	0,338	0,267	0,219
$V_{рд}^*$, дм ³	2,476	2,364	2,353	2,350
D , дм	1,102	1,002	1,000	0,999
g_{ep} , кг/(кВт·год)	39,15	33,96	30,39	27,92
G_{Σ}^{**} , кг/год	355,7	308,5	276,2	253,6
T_1 , К	435,3	456,0	473,6	489,8
p_e , МПа	0,328	0,344	0,346	0,346
η_e	0,426	0,441	0,451	0,455
p_2 , МПа	0,335	0,298	0,262	0,238
T_2 , К	318,5	306,2	293,3	284,1
ε_3	0,104	0,124	0,142	0,160
p_4 , МПа	0,558	0,658	0,758	0,858
T_4 , К	350,1	367,0	382,1	395,9

* повний робочий об'єм двигуна;

** сумарна витрата повітря з урахуванням витоків

Відповідно до даних табл. 1 за всіма показниками найкращим є варіант пневмодвигуна з тиском повітря на вході до циліндрів $p_1 = 1,6$ МПа. Теоретична індикаторна діаграма циклу такого пневмодвигуна наведена на рис. 6.

Оцінювальні розрахунки щодо можливостей і характеристик гідридної установки із зазначеними вище вихідними даними і вибраними показниками пневмодвигуна дозволяють зробити такі висновки:

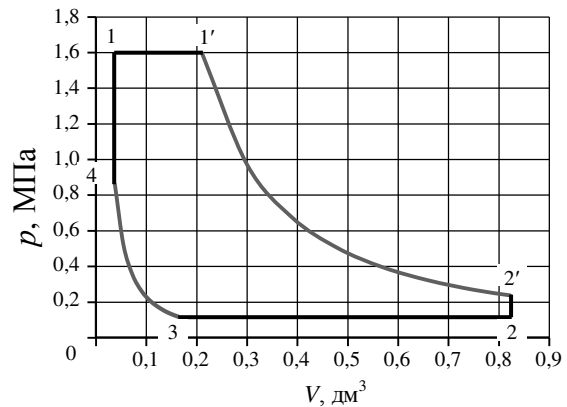


Рис. 6. Теоретична індикаторна діаграма циклу пневмодвигуна з вихідними даними $p_1 = 1,6$ МПа і $\varepsilon_1 = 0,219$

для легкового автомобіля класу А з такими габаритами, як, наприклад, у Daewoo Matiz, залежно від розміщення бака скрапленого повітря, наприклад, поперечно в багажнику або подовжньо двох баків під сидіннями, ємність баків може становити приблизно 177–280 л, що у разі заповнення їх на 95 % дає запас скрапленого повітря, що дорівнює 150–230 кг. Із таким запасом повітря автомобіль з повною масою 1200 кг на швидкості 60 км/год на режимі паралельної роботи ДВЗ і пневмодвигуна з сумарною витратою повітря $G_{\Sigma} = 253,6$ кг/год (табл. 1, варіант IV) на одній заправці скрапленим повітрям здатен проїхати 35–55 км. Це знижує витрати бензину ДВп. З до 5,2 л або на 37,8 % на 100 км порівняно з рухом автомобіля тільки на бензиновому двигуні він зменшує сумарні шкідливі викиди ДВЗ у вигляді CO, CO₂ і NO_x на 9,2 кг або на 35,8 %.

Висновки

Розрахункове дослідження дозволяє визначити габаритні та режимні показники пневмодвигуна, що працює в гібридній силовій установці «ДВЗ-пневмодвигун» легкового автомобіля в паралельному режимі з ДВЗ і використовує для підігріву повітря, що надходить до його циліндрів, теплову втрату енергію ДВЗ, яка відводиться від останнього охолоджувальною рідиною і відпрацьованими газами.

Дослідження доводить, що для гібридної установки типового чотири- або п'яти-

місного легкового автомобіля міського призначення, повною масою 1200 кг (з урахуванням маси пневмодвигуна і системи його постачання скрапленим повітрям), який рухається в міських умовах у найбільш поширеному режимі швидкості 60 км/год, оптимальним є розподіл потужностей ДВЗ і пневмодвигуна 60/40. Для цього потужність пневмодвигуна за умов безпосереднього приводу ним ведучих коліс повинна дорівнювати 8,63 кВт.

Найбільш доцільними вихідними показниками такого пневмодвигуна, що відповідають умовам підігріву повітря на вході до двигуна витратним теплом ДВЗ і забезпечують мінімальну витрату повітря за найменших габаритах двигуна, необхідно вважати тиск повітря на вході до циліндрів $p_1 = 1,6$ МПа і ступінь наповнення циліндрів повітрям $\varepsilon_1 = 0,219$. Згідно з цими вихідними показниками робочий об'єм двигуна становить $V_{рд} = 2,35$ л, питома корисна витрата повітря $g_{en} = 27,92$ кг/(кВт·год.) і сумарна витрата повітря на зазначеному режимі роботи $G_{\Sigma} = 253,6$ кг/год, що дозволяє автомобілю проїхати на одній заправці скрапленим повітрям від 35 до 55 км і заощадити порівняно з рухом автомобіля тільки на бензиновому двигуні 37,8 % палива, а отже, зменшити на 35,8 % шкідливі викиди ДВЗ.

Отже, максимальна відстань, за якою автомобіль може рухатися на одній заправці скрапленим повітрям, повинна значно збільшитися в разі використання рекуперації енергії гальмування автомобіля для стиснення атмосферного повітря пневмодвигуном, що на цих режимах повинен працювати як компресор і нагнітати стисле повітря в додатковий балон. Це потребує подальших досліджень, як і досліджень показників роботи такої гібридної установки в умовах низьких температур і на різних режимах руху автомобіля.

Література

1. Airpod – автомобиль, работающий на сжатом воздухе выйдет в продажу по цене \$10000 в США: веб-сайт. URL: <https://ecotechnica.com.ua/transport/118-airpod-avtomobil-rabotayushchij-na-szhatom-vozdukhe-vyjdet-v-prodazhu-po-tsene-10000-v-ssha.html> (дата звернення: 11.07.2018).
2. Michael Graham Richard Pneumatic Hybrid Engine Simply save gasoline: веб-сайт. URL: <https://www.treehugger.com/cars/pneumatic-hybrids-inexpensive-gasoline-compressed-air-system-could-reduce-fuel-consumption-by-32.html> (дата звернення: 11.07.2018).

3. New Engine Technology From Scuderi – 30 Percent More Efficient?: веб-сайт. URL: https://www.theconnection.com/news/1020888_new-engine-technology-from-scuderi--30-percent-more-efficient (дата звернення: 21.08.2018).
4. Калекин В. С., Калекин Д. В., Смолин А. А. Поршневой газовый двигатель с самодельствующей системой газораспределения для гибридной силовой установки. *Национальные приоритеты России*. 2015. № 3 (17). С. 175–184.
5. Туренко А. Н., Богомолов В. А., Абрамчук Ф. И., Харченко А. И., Жилин С. С., Косый Р. А., Босенко Е. И. О требованиях к конструкции и рабочему процессу пневмодвигателя для комбинированной энергоустановки автомобиля. *Автомобильный транспорт: сб. науч. тр.* 2006. Вып. 18. С. 7–12.
6. Туренко А. Н., Богомолов В. А., Абрамчук Ф. И., Харченко А. И., Шилов А. И. О выборе параметров поршневого пневмодвигателя, работающего в составе гибридной энергоустановки автомобиля. *Автомобильный транспорт: сб. науч. тр.* 2008. Вып. 22. С. 7–13.
7. Двигатель на сжатом воздухе для автомобиля: веб-сайт. URL: http://ecoconceptcars.ru/2011/01/blog-post_29.html (дата звернення: 12.09.2018).
8. Bourn Gary D., Gingrich Jess W., Smith Jack A. Advanced Compressor Engine Controls to Enhance Operation, Reliability and Integrity: Final Report. Southwest Research Institute, San Antonio, USA, 2004. P. 60.
9. Бондаренко С. И., Кудрявцев И. Н., Левин А. Я., Левченко Н. М., Мурунец-Маркевич Б. Н., Пятак А. И. Разработка криогенной силовой установки для экологически чистого автомобиля. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*. 2004. № 14. С. 152–157.
10. Абрамчук Ф. И., Харченко А. И., Жилин С. С., Воронков А. И., Никитченко И. Н. О выборе рациональных задаваемых параметров работы поршневого пневмодвигателя с клапаным воздушораспределением. *Автомобильный транспорт: сб. науч. тр.* 2010. Вып. 27. С. 141–147.
11. Воронков А. И. Изменение по скоростным характеристикам показателей рабочего процесса при подогреве сжатого воздуха на входе в пневмодвигатель. *Вестник ХНАДУ*. 2015. Вып. 71. С. 13–16.
12. Борисенко К. С. Пневматические двигатели горных машин. М.: Углетехиздат, 1958. 204 с.
13. Бондаренко С. И., Левин А. Я., Кудрявцев И. Н., Пятак А. И. Разработка эффективного воздушного теплообменника для автомобиля на жидком азоте. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники*. 2003. № 13. С. 152–158.

References

1. Airpod – avtomobil', rabotayushchii na szhatom vozdukke vyidet v prodazhu po tsene \$10000 v SShA [Airpod – the car using compressed air will leave in sale at the price of \$10000 in the USA]. Available at: <https://ecotechnica.com.ua/transport/118-airpod-avtomobil-rabotayushchij-na-szhatom-vozdukke-vyjdet-v-prodazhu-po-tsene-10000-v-ssha.html>. (accessed 11.07.2015).
2. Michael Graham Richard Pneumatic Hybrid Engine Simply save gasoline Available at: <https://www.treehugger.com/cars/pneumatic-hybrids-inexpensive-gasoline-compressed-air-system-could-reduce-fuel-consumption-by-32.html>. (accessed 11.02.2009).
3. New Engine Technology From Scuderi – 30 Percent More Efficient? Available at: https://www.theconnection.com/news/1020888_new-engine-technology-from-scuderi--30-percent-more-efficient. (accessed 21.05.2009).
4. Kalekin V. S., Kalekin D. V., Smolin A. A. Porshnevoi gazovyi dvigatel' s samodeistvuyushchei sistemoi gazoraspredeleniya dlya gibridnoi silovoi ustanovki [The piston gas engine with the automatic system of gas distribution for the hybrid power plant]. *Natsional'nye priority Rossii*, 2015, no. 3 (17), pp. 175–184.
5. Turenko A. N., Bogomolov V. A., Abramchuk F. I., Kharchenko A. I., Zhilin S. S., Kosyi R. A., Bosenko E. I. O trebovaniyakh k konstruksii i rabochemu protsessu pnevmodvigatelya dlya kombinirovannoi energoustanovki avtomobilya [About requirements to a design and working process of the pneumoengine for the combined car power station]. *Avtomobil'nyi transport: sb. nauch. tr.*, 2006, vol. 18, pp. 7–12.
6. Turenko A. N., Bogomolov V. A., Abramchuk F. I., Kharchenko A. I., Shilov A. I. O vybore parametrov porshneвого pnevmodvigatelya, rabotayushchego v sostave gibridnoi energoustanovki avtomobilya [About the choice of parameters of the piston pneumoengine working as a part of the hybrid power station of the car]. *Avtomobil'nyi transport: sb. nauch. tr.*, 2008, vol. 22, pp. 7–13.
7. Dvigatel' na szhatom vozdukke dlya avtomobilya [The engine on compressed air for the car]. Available at: <http://ecoconceptcars.ru/2011/01/blog-post-29.html>. (accessed 2011).
8. Bourn Gary D. Advanced Compressor Engine Controls to Enhance Operation, Reliability and Integrity / Gary D. Bourn, Jess W. Gingrich, Jack A. Smith // Final Report. Southwest Research Institute, San Antonio, USA. – 2004. – P. 60.
9. Bondarenko S. I., Kudryavtsev I. N., Levin A. Ya., Levchenko N. M., Murinets-Markevich B. N., Pyatak A. I. Razrabotka kriogennoi silovoi ustanovki dlya ekologicheskogo chistogo avtomobilya [Development of the cryogenic power plant for the environmentally friendly car]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Vakuum, chistye materialy, sverkhprovodniki*, 2004, no. 14, pp. 152–157.
10. Abramchuk F. I., Kharchenko A. I., Zhilin S. S., Voronkov A. I., Nikitchenko I. N. O vybore ratsional'nykh zadavaemykh parametrov raboty porshneвого pnevmodvigatelya s klapannym voz-dukhoraspredeleniem [About the choice of the rational set operation parameters of the piston pneumoengine with valve a cart-dukhoraspredeleniyem]. *Avtomobil'nyi transport: sb. nauch. tr.*, 2010, vol. 27, pp. 141–147.
11. Voronkov, A. I. Izmenenie po skorostnym kharakteristikam pokazatelei rabocheго protsessа pri podogreve szhatogo vozdukhа na vkhode v pnevmodvigatel' [Change on high-speed characteristics of indicators of working process when heating compressed air on an entrance to the pneumoengine]. *Vestnik KhNADU*, 2015, vol. 71, pp. 13–16.
12. Borisenko K. S. *Pnevmaticheskie dvigateli gornykh mashin* [Pneumatic engines of mining machines], Moscow, Ugletekhizdat, 1958, 204 p.
13. Bondarenko S. I., Levin A. Ya., Kudryavtsev I. N., Pyatak A. I. Razrabotka effektivnogo vozdushnogo teploobmennika dlya avtomobilya na zhidkom azote [Development of the effective air heat exchanger for the car on liquid nitrogen]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Vakuum, chistye materialy, sverkhprovodniki*, 2003, no. 13, pp. 152–158.

Нечипорук Микола Васильович, д.т.н., проф. каф. автомобілів та транспортної інфраструктури, khai@khai.edu, тел. +38 057 788 40 00,

Воробійов Юрій Анатолійович, к.т.н., проф. каф. автомобілів та транспортної інфраструктури, yuriy.vorobyov@gmail.com, тел. +38 050 291 45 47,

Пода Вадим Борисович, к.т.н. доц. каф. автомобілів та транспортної інфраструктури, v.poda@khai.edu, тел. +38 095 182 90 63. Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 61070, Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17.

Определение показателей пневмодвигателя для гибридной силовой установки городского легкового автомобиля

Аннотация: Рассмотрены вопросы принципов выбора основных показателей пневмодвигателя гибридной силовой установки «ДВС-пневмодвигатель» легкового автомобиля городского назначения, которая использует сжиженный воздух. На основании расчетных исследований показателя пневмодвигателей с разными исходными данными для прототипа автомобиля,

движущегося со скоростью 60 км/ч, выбран и предложен к применению пневмодвигатель с показателями, которые обеспечивают минимальный расход воздуха при приемлемых габаритах.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, пневмодвигатель, двигатель внутреннего сгорания, автомобиль, автотранспортное средство, сжиженный воздух, показатели рабочего процесса.

Нечипорук Николай Васильевич, д.т.н., проф. каф. автомобилей и транспортной инфраструктуры, khai@khai.edu, тел. +38 057 788 40 00,

Воробьев Юрий Анатольевич, к.т.н., проф. каф. автомобилей и транспортной инфраструктуры, yuriy.vorobyov@gmail.com, тел. +38 050 291 4547,

Пода Вадим Борисович, к.т.н., доц. каф. автомобилей и транспортной инфраструктуры, v.poda@khai.edu, тел. +38 095 182 90 63.

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 61070, Украина, г. Харьков, ул. Чкалова, 17.

Determination of the pneumatic engine indices for the hybrid power unit of a city car

Abstract: The problem of environmental pollution by the motor transport forces to look for new ecologically cleaner power units. Definition and the choice of the mode and dimensional indicators of the piston pneumatic engine working as a part of such hybrid unit of a city car was the goal of work. The methodology of the research was based on computational research of indicators of the pneumatic engine using the liquefied air which heats up at the entrance to cylinders of the pneumoengine due to the heat of the environment and the waste heat of ICE. Calculations and the choice of optimum mode and dimensional indicators of the pneumo-engine were made for the hybrid power unit of the car with a full weight of 1200 kg moving with a speed of 60 km/h. Three operating modes of plant with parallel operation of ICE and the pneumoengine with distribution of power between them 50/50, 60/40 and 70/30 were considered. Gear

ratio of the drive of driving wheels of the car from the pneumoengine was accepted as 1:1. The results of the research are presented in the form of graphic dependences of key indicators of the pneumoengine on the parameters of compressed air at the entrance to its cylinders. On the basis of calculations of work indicators of ICE on the corresponding modes and thermal balances between compressed air, cooling liquid and the exhaust ICE gases the operating mode of the unit and the parameters of air at the entrance to pneumoengine cylinders which provide the minimum flow of air at small dimensions of the engine is chosen. Such an optimum operating mode of the unit is the mode of distribution of power between ICE and pneumoengine as 60/40 with the air pressure at the entrance to cylinders of the pneumoengine of 1.6 MPa and the degree of cylinders filling 0.219. The results allow to make a choice of an optimum operating mode of the hybrid power unit "ICE – pneumoengine" with parallel operation of engines for the city car and indicators of operation of the pneumoengine which provide a low flow of air at small dimensions of the engine.

Key words: hybrid power plant, pneumoengine, internal-combustion engine (ICE), city car, motor transport, liquefied air, engine indicators, operating modes.

Nechiporuk Nikolay, Dr.Sci.Tech., professor, Department of Automobile and Transportation Infrastructure, khai@khai.edu, tel. +38 057 788 40 00,

Vorobyov Yuriy, PhD in Technological Sciences, professor, Department of Automobile and Transportation Infrastructure, yuriy.vorobyov@gmail.com, tel. +38 050 291 45 47,

Poda Vadym, PhD in Technological Sciences, associate professor, Department of Automobile and Transportation Infrastructure, v.poda@khai.edu, tel. +38 095 182 90 63.

National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky «KhAI», Kharkov, st. Chkalov, 17 Ukraine 61070.