

Чередніков В.М.

ТОВ «КБ «Аерокоптер»

Череднікова О.В.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ПІДГОТОВКА ДО ВИПРОБУВАНЬ З СТВОРЕННЯМ ПРОГРАМИ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ ГЕЛІКОПТЕРА НА ЛАБОРАТОРНОМУ СТЕНДІ

У статті розглядається питання перевірки роботоздатності та надійності двигуна внутрішнього згорання гелікоптера. Двигуни, які використовуються на літальних апаратах, повинні проходити більш ретельну перевірку усіх характеристик, ніж двигуни, які встановлюються на наземних транспортних засобах. Також такі двигуни під час своєї роботи будуть більш навантажені. Важливою є і енергетична ефективність, економічність двигуна, але щоб її покращити, спочатку потрібно дослідити характеристики роботи двигуна при різних режимах, а потім провести аналіз з метою підвищення економічності двигуна без втрат його експлуатаційної надійності. Усі дослідження виконуються на випробувальному стенді «PRO 800 DYNAMOMETER». В статті наведені чотири основні етапи, з яких складається процес випробування двигуна. На цих етапах перевіряються швидкісні характеристики двигуна, характеристики холостого ходу та рівномірність роботи двигуна. Всі дослідження проводяться при різних положеннях дросельної заслінки. Показники, які вимірюються, порівнюються з вимогами до цих величин. Програма випробувань вміщує в себе усі показники, які потрібно зафіксувати та граничні відхилення їх від заданих значень в вимірюваних діапазонах. В ході експерименту стенд дозволяє фіксувати необхідні показники в графічному вигляді протягом усього часу дослідження. До основних показників відноситься потужність двигуна, крутний момент, частота обертання колінчастого валу, витрата палива, температура охолоджувальної рідини, відпрацьованих газів, тиск оливи та напруга живлення. В статті описуються вимоги до обладнання, оточуючого середовища та палива, яке використовується під час дослідів. Наступним етапом наукової роботи буде безпосередньо проведення лабораторного випробування на основі створеної програми підготовки до випробувань та виконання повного аналізу роботи двигуна.

Ключові слова: потужність двигуна, витрата палива, частота обертання, температура відпрацьованих газів, коефіцієнт корисної дії.

Постановка проблеми. Сучасні наукові напрями у сфері розвитку двигунів транспортних засобів зосереджені на пошуку найбільш енергоєфективних та економічних двигунів. Найбільшого розповсюдження набувають гібридні двигуни та електродвигуни для автомобільного транспорту. В авіаційній галузі постають більш жорсткі вимоги до двигунів, які встановлюються на літальних апаратах, особливо, якщо це не безпілотні літальні засоби, в яких від надійності двигуна залежить життя людей. У випадку малого авіаційного транспорту застосування електричних двигунів обмежено умовами нестабільності роботи таких пристроїв. Тому використання двигунів внутрішнього згорання залишається актуальним та виникає необхідність перевірки таких двигунів в лабораторних умовах, проведення режимів обкатки та визначення усіх критичних параметрів. Малогабаритні гелі-

коптери користуються попитом в сферах сільського господарства та для комерційного використання. Для встановлення двигуна на літальний апарат потрібно спочатку провести в наземних випробуваннях перевірку його роботи в різних можливих режимах, для підтвердження його безпечності роботи. Поки є необхідність в застосуванні таких типів двигунів, актуальність їх досліджень з метою визначення усіх ключових параметрів їх роботи не зникає.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вчені в Україні Гащук П.М., Нікіпчук С.В., Сичевський М. І., Домінік А. М. займаються питаннями корисної роботи машин з двигунами внутрішнього згорання, їх ефективності та досконалості роботи [1], [2]. Вони також вдало досліджують теплообмінні процеси, які протікають в двигунах внутрішнього згорання, моделюють окремі

процеси та цикли роботи двигунів [3], [4]. Найбільш перспективні з енергетичної та екологічної точки зору дослідження роботи двигунів, які працюють на водневому паливі, тому дослідження процесів згорання водневого палива займають значний спектр наукових досліджень закордонних вчених [5]. Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю. Ф., Долганов К. Є., Тимченко І. І. описують та досліджують процеси теплопередачі, які проходять від циліндрів до систем охолодження двигунів [6, 7]. Пристосування двигунів внутрішнього згорання до роботи в різних кліматичних умовах, шляхом підвищення системи охолодження, присвячені статті [8, 9]. Використання транспортних засобів працюючих на вуглеводневому паливі має значний вплив на оточуюче середовище. Не останніми актуальними темами є вплив енергетичної ефективності двигунів на екологічні аспекти, бо від цього залежить майбутнє усієї планети [10, 11].

Постановка завдання. Робота двигуна внутрішнього згорання в автомобілі дещо відрізняється від режимів роботи в літальному апараті. В літальних апаратах умови експлуатації та параметри більш критичні. Метою проведення натурних наземних випробувань гелікоптера є визначення усіх можливих параметрів його роботи для підтвердження ефективності та безперебійності роботи двигуна в різних режимах. Отримані дані в результаті випробувань повинні надати можливість аналізувати роботу двигуна для визначення більш чітких меж його використання. Тому першим етапом досліджень роботи двигуна є розроблення програми випробувань, яка буде охоплювати достатній спектр параметрів для виконання подальшого аналізу.

Основний матеріал дослідження. Об'єктом випробувань є двигун EJ25, який встановлюється на малогабаритному літальному апараті – гелікоптері.

Випробування склалися з чотирьох основних етапів:

- обкатка двигуна проводиться в три ступені при положеннях дросельної заслінки: 1 ступінь – 3%; 2 ступінь – 6%; 3 ступінь – 9%;
- визначення та оцінки швидкісних характеристик двигуна 4 ступені при положеннях дросельної заслінки: 1 ступінь – 25%; 2 ступінь – 50%; 3 ступінь – 75%; 4 ступінь – 100%;
- визначення та оцінка характеристики холостого ходу;
- визначення та оцінка рівномірності роботи двигуна.

Випробування передбачається проводити на стенді для двигунів DYNO.800 (рис.1).

Перед проведенням випробувань потрібно заміряти:

- теплові зазори в механіці приводу впускних та випускних клапанів;
- об'єм залитої в двигун оливи;
- компресійний тиск у циліндрах наприкінці такту стиснення на прогрітому двигуні;
- прогин ремня генератора;

До проведення випробувань потрібно обчислити різницю компресійного тиску в циліндрах та перевірити:

- відповідність різниці компресійного тиску в циліндрах згідно вимог ТУ;
- повноту відкриття (закриття) дросельної заслінки;
- якість палива, що використовується.

На всіх етапах проведення випробувань контролюються тиск палива в паливній системі, величина якого повинна дорівнювати $(2,7 \pm 0,4)$ кгс/см² ((38 ± 5) PSI), і параметри навколишнього середовища.

Умови проведення випробувань:

Випробування проводять у спеціально обладнаному приміщенні на стенді DYNO.800 за наступних умов:

- температура повітря на вході у двигун від -18 до +35°C;
- відносна вологість повітря не більше 95%;
- барометричний тиск повітря у приміщенні (95 ± 15) кПа.

Якщо температура виходить за вказані межі, її необхідно довести до заданих умов випробувань.

Випробування допускається проводити в приміщеннях, де можливе регулювання та підтримання його температури.

Паливо, яке використовується при випробуваннях, повинно мати документ, що свідчить про якість палива і описує його параметри.

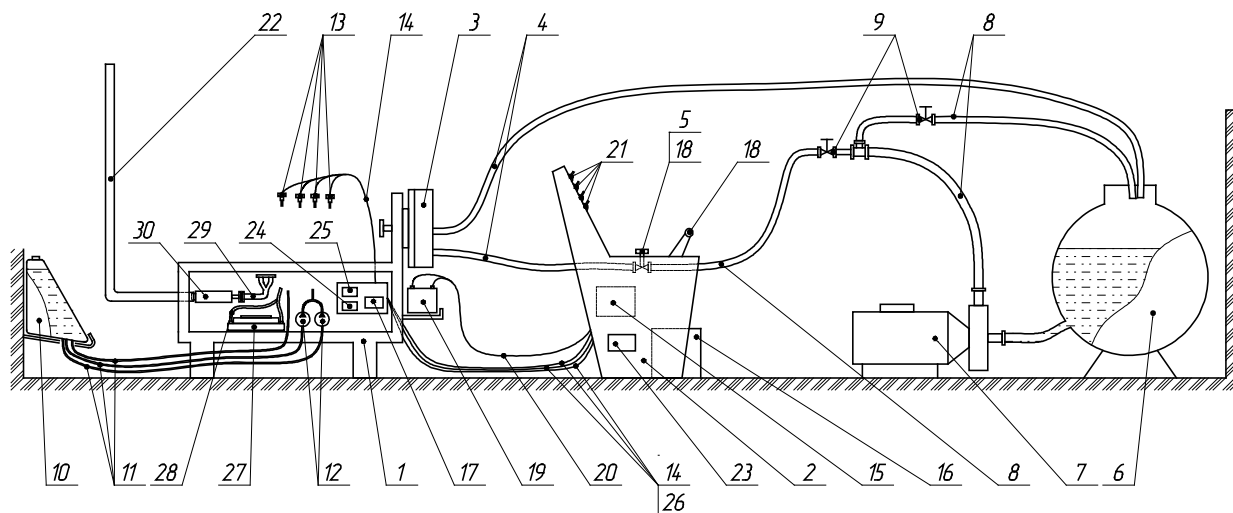
Після закінчення випробувань:

- потрібно заміряти:
 - теплові зазори в механіці приводу впускних та випускних клапанів;
 - об'єм зливої оливи (для визначення витрати оливи);
 - прогин ремня генератора;
 - компресійний тиск у циліндрах наприкінці такту стиснення на прогрітому двигуні;

Обчислити:

- годинну витрату оливи;
 - різницю компресійного тиску по циліндрах;
- Перевірити відповідність різниці компресійного тиску в циліндрах згідно вимог ТУ.

Параметри двигуна, що підлягають контролю та оцінці на етапах випробувань, вказані в таблицях 1-5.



- | | | |
|----------------------------|---|--|
| 1 – моторама | 14, 20, 26 – електричні джгути | 22 – трубопровід відведення відпрацьованих газів |
| 2 – консоль управління | 15 – пристрій збору та обробки інформації з підсистемою автоматичного керування електронними пристроями | 23 – ел.система керування двигуном |
| 3 – гідравлічне гальмо | 16 – персональний комп'ютер | 24 – блок запобіжників |
| 4, 8 – трубопроводи | 17 – погодна станція | 25 – блок реле |
| 5 – регулятор навантаження | 18 – виконавчі пристрої | 27 – радіатор із вентиляторами |
| 6 – бак для води | 19 – акумулятор | 28 – патрубки системи охолодження |
| 7 – водяний насос | 21 – вимикачі | 29 – випускний колектор |
| 9 – регулююча апаратура | | 30 – глушник |
| 10 – паливний бак | | |
| 11 – паливопроводи | | |
| 12 – паливні насоси | | |
| 13 – датчики | | |

Рис. 1. Випробувальний стенд «PRO 800 DYNAMOMETER»

Таблиця 1

Параметри двигуна, що підлягають контролю та оцінці на етапі обкатки

№ п/п	Найменування параметру	Од. вим.	1-а ступінь		2-а ступінь		3-я ступінь	
			Вимоги	Гран. відхилення	Вимоги	Гран. відхилення	Вимоги	Гран. відхилення
Параметри, що контролюються								
1	Положення дросельної заслінки	%	3	±0,5	6	±0,5	9	±0,5
2	Крутний момент на колінчастому валу	НЧ	21	±1	35	±1	44	±1
3	Частота обертання колінчастого валу	об/хв	2000	±200	2500	±200	3000	±200
4	Потужність двигуна	к.с (кВт)	6 (4,4)	±1 (±0,8)	12 (8,9)	±1 (±0,8)	19 (14,1)	±1 (±0,8)
Параметри, що оцінюються								
5	Витрата палива	л/год	≤6	–	≤7	–	≤8,5	–
6	Температура охолоджувальної рідини	°	≤+105	–	≤+105	–	≤+105	–
7	Температура відпрацьованих газів	°	≤+730	–	≤+730	–	≤+730	–
8	Тиск оливи	кгс/см ²	5	±1	5	±1	5	±1
9	Кут випередження запалення		18,5°	±1°	20,5°	±1	24°	±1°
10	Напруга живлення	В	14,3	±0,7	14,3	±0,7	14,3	±0,7

Таблиця 2

Параметри двигуна, що підлягають контролю та оцінці на етапі визначення та оцінки швидкісних характеристик двигуна

№ п/п	Найменування параметру	Од. вим.	1-я ступінь		2-я ступінь		3-я ступінь		4-я ступінь	
			Вимоги	Гран. відхилення	Вимоги	Гран. відхилення	Вимоги	Гран. відхилення	Вимоги	Гран. відхилення
Параметри, що контролюються										
1	Положення дросельної заслінки	%	25	±0,5	50	±0,5	75	±0,5	100	-0,5
Параметри, що оцінюються										
2	Максимальний крутний момент на колінчастому валу	НЧ	≥150	-	≥180	-	≥205	-	≥223	-
3	Частота обертання колінчастого валу при максимальному крутному моменті	об/хв	1800	±300	3500	±1000	3600	±1000	3600	±1000
4	Потужність двигуна при максимальному крутному моменті	к.с (кВт)	≥30 (≥23)	-	≥64 (≥47)	-	≥74 (≥55)	-	≥80 (≥60)	-
5	Максимальна потужність двигуна	к.с (кВт)	≥50 (≥37)	-	≥124 (≥92)	-	≥140 (≥105)	-	≥156 (≥115)	-
6	Частота обертання колінчастого валу за максимальної потужності двигуна	об/хв	4000	±800	5500	±500	5500	±500	5500	±500
7	Максимальна частота обертання колінчастого валу	об/хв	≥4800	-	≥5600	-	≥6000	-	≥6000	-
8	Максимальна витрата палива	л/год	≤20	-	≤35	-	≤40	-	≤42	-
9	Температура охолоджувальної рідини	°	≤+105	-	≤+105	-	≤+105	-	≤+105	-
10	Температура відпрацьованих газів	°	≤+880	-	≤+880	-	≤+880	-	≤+880	-
11	Тиск оливи	кгс/см ²	5	±1	5	±1	5	±1	5	±1
12	Напруга живлення	В	14,3	±0,7	14,3	±0,7	14,3	±0,7	14,3	±0,7

Таблиця 3

Параметри двигуна, що підлягають контролю та оцінці на етапі визначення та оцінки характеристик холостого ходу двигуна

	Од. вим.	Частота обертання колінчастого валу двигуна, об/хв				
		1000*+650	2000±100	2500±100	3000±100	3500±100
Витрата палива	л/год	≤2,5	≤3,5	≤5,5	≤7,6	≤10,0

* Відповідає повністю закритій дросельній заслінці

**Параметри двигуна, що підлягають контролю та оцінці
на етапі визначення нерівномірності роботи двигуна**

№ п/п	Найменування параметру	Од. вим.	Вимоги	Гран. відхилення
Параметри, що контролюються				
1	Максимальний крутний момент на колінчастому валу	НЧ	≥223	–
2	Частота обертання колінчастого валу двигуна при максимальному моменті, що крутить, і всіх працюючих циліндрах	об/хв	3600	±1000
3	Потужність двигуна при максимальному крутному моменті і всіх працюючих циліндрах	л.с (кВт)	≥80 (≥60)	–
Параметри, що оцінюються				
4	Умовний механічний ККД	–	≥0,37	–
5	Коефіцієнт рівномірності роботи циліндрів	–	≥0,95	–

Таблиця 5

**Параметри двигуна, що оцінюються додатково
перед початком випробувань та після їх завершення**

№ п/п	Найменування параметру	Од. вим.	Вимоги	Гран. відхилення
1	Загальний час етапів випробувань (обкатки та розгонів)	год	23	±0,5
2	Витрата оливи	л/год	≤0,065	–
3	Компресійний тиск у циліндрах в кінці такту стиснення	кгс/см ²	12	±1
4	Різниця компресійного тиску по циліндрах	кгс/см ²	≤0,5	–
5	Повнота відкриття закриття дросельної заслінки	%	0...100	–
6	Прогин ремня генератора при зусиллі (5±0,1) кгс	мм	10	±1
7	Теплові зазори в механізмі приводу впускних та випускних клапанів:			
	впускних	мм	0,20	±0,02
	випускних		0,25	±0,02

Для зручності проведення випробувань на стенді та скорочення часу на монтаж та демонтаж двигун встановлюється без паливного бака, насосів, фільтру, паливопроводів паливної системи; без радіатора, вентиляторів, трубопроводів системи охолодження; без вихлопних труб та глушника випускної системи, без контролера електронної системи керування.

На час проведення випробувань демонтуються виробы та замість них встановлюються наступні:

1) Встановлюється Витратомір повітря Dupo Airflow Meter 6.5", Part #430-806, Land&Sea Inc. замість фільтра повітряного AutoSport B-005, P/N 06733;

2) Датчик тиску Autometer Pressure Transducer, 100 PSI, Product #2246 замість датчик тиску AK1-3.17.02.00.00.146;

3) Датчик тиску 0-150 PSI Pressure Sensor, Part #435-150, Land&Sea Inc. замість Масляна пробка Subaru 11024AA141.

При проведенні випробувань використовуються такі види контрольно-вимірювальної апаратури та пристроїв:

– моторний випробувальний стенд DYNO-MAX Auto Test Stand, Land and Sea, USA.

– мотор-тестер S7000;

– пристрій для перевірки рівня охолоджуючої рідини в розширювальному бачку M7-003;

– мірна лінійка H5-001.00.

Результати даних роботи моторного стенду, вимірів, розрахунків, проведених робіт у процесі випробувань заносять до протоколу.

До протоколу входять:

– таблиця вимірів параметрів роботи двигуна (таблиця 5)

– швидкісна характеристика двигуна (роздруківка) (рис. 2).

Датчики та покажчики, що встановлюються на двигун та паливну систему:

– датчик тиску 1-го насоса місце встановлення паливний насос;

– датчик тиску 2-го насоса – паливний насос;

– датчик засмічення фільтра – паливний фільтр;

– датчик рівня палива – паливний бак;

– датчик температури ОР (двигуна) – двигун (головка права) д/стенду;

– датчик тиску оливи – двигун д/стенду;

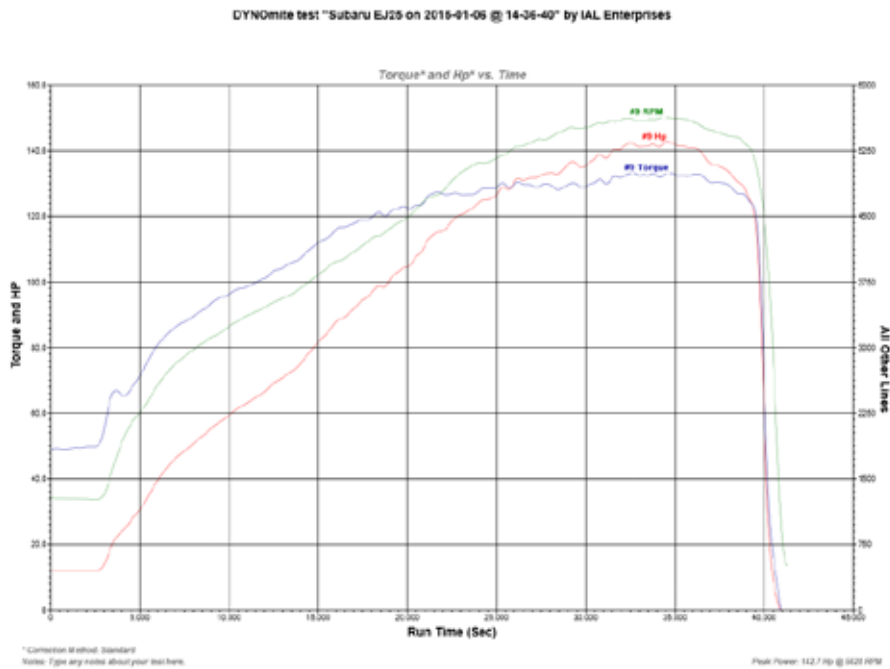


Рис. 2. Швидкісна характеристика двигуна (зразок)

Таблиця 5 (початок)

Таблиця вимірів параметрів роботи двигуна (зразок)

Розгін (Час виміру)	Параметри, що заміряються					
	Крутний момент, Н*м	Потужність двигуна, кВт	Частота обертання колінчастого валу, об/хв	Кількість витраченого палива, кг	Температура охол. рідини, °C	Температура оливи, °C
Вимоги	85...95	50...60	2995...3015		70...95	
1 (14:31)	191,3	111,2	4124		75	
2 (14:35)	194,1	109,5	3955		85	
3 (14:36)	175,2	142,8	5627		87	

Розгін (Час виміру)	Параметри, що заміряються									Виявлена несправність та час простою стенду	
	Температура палива, °C	Температура відпрацьованих газів, °C	Температура атм. повітря на вході у двигун, °C	Тиск оливи, кг/см ³	Температура оливи, °C	Барометричний тиск, кПа	Відносна вологість, %	Кут випередження запалення, град	Тиск у впускному тракті, кПа		арядка акумулятора, V
Вимоги	-18...+40	500...850	-18...+35	4,5...6,0	3,5...5,0					11,6...15,5	
1 (14:31)	16	876	26,1	5,7	4	101,6	20,6			14,4	
2 (14:35)	16	867	32,2	5,5	4	101,5	18,2			14,5	
3 (14:36)	16	876	42,2	5,7	4	101,7	15,5			14,6	

Мінімальна частота обертання, об/хв – 4000;
 Максимальна частота обертання, об/хв – 5627;
 Максимальний крутний момент при n=5600 об/хв (з діаграми), Н*м – 175,2;
 Потужність при максимальному крутному моменті, к.с. – 142,8.;

- датчик несправності двигуна – береться з контролера;
- датчик температури та тиску повітря – двигун;
- датчик температури охол. рідини – двигун (водяна сорочка);
- датчик положення колін валу – двигун;
- датчик положення дросельної заслінки – двигун (впускний колектор);
- датчик детонації – двигун;
- датчик кисню – вихлопний колектор.

Висновки. В процесі створення програми випробування двигуна внутрішнього згорання, який використовується в малогабаритних літальних апаратах, визначенні основні чотири етапи характерні для роботи двигуна. Також для кожного етапу визначені параметри, які контролюються та оцінюються, встановлені величини цих параме-

трів, тобто вимоги до їх значень та граничні відхилення та форми внесення їх значень. Програма має достатній об'єм параметрів для проведення повного аналізу роботи двигунів.

Перспективи подальших досліджень, полягають в тому, що всі наведені в статті заходи сприяють визначенню основних характеристик роботи двигуна внутрішнього згорання з достатньою точністю та можливості подальшого повного аналізу його придатності для роботи в літальних апаратах. Програма випробувань це основний етап для підготовки до серії випробувань на різних режимах роботи двигуна. Подальші дослідження полягають в проведенні серії таких випробувань та в напрямку можливого підвищення ефективності роботи двигуна внутрішнього згорання після проведенні більш детального аналізу даних, які отримані в процесі випробувань.

Список літератури:

1. Гашук П.М., Сичевський М.І., Домінік А.М. Про зміст поняття «Коефіцієнт корисної дії автомобіля». *Зб. наук. пр. «Вісник ЛДУ БЖД»*. 2016. № 14. С. 152–175.
2. Гашук П.Н. Энергетическая эффективность автомобиля. Львов: Свит, 1992. 208 с.
3. Гашук П.М., Нікіпчук С.В., Богачик Ю. Натурно-машинні засоби в моделюванні термодинамічних процесів, що перебігають у двигунах внутрішнього згорання. *Вісник Державного університету «Львівська політехніка» «Динаміка, міцність та проектування машин і приладів»*. 1998. № 354. С. 3–9.
4. Гашук П.М., Нікіпчук С.В. Застосування hard-soft-технології моделювання робочого процесу в двигуні внутрішнього згорання. *Новітні технології розвитку автомобільного транспорту: міжнародна науково-практична конференція. 16–19 жовтня 2018 р.*: наукові праці. Харків, 2018. С. 259–261.
5. Liu F. CFD-study on hydrogen engine mixture formation and combustion. *Göttingen: Cuvillier Verlag*, 2004. 123 p.
6. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни: підручник. Київ: Арістей, 2006. 476 с.
7. Гашук П.М., Нікіпчук С.В. Особливості теплотворення в двигуні внутрішнього згорання. *Автомобільний транспорт*. Харків, 2018. № 42. С. 12–21. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2018.42.0.12.
8. Чередніков В.М., Череднікова О.В. Моделювання, конструювання та випробування системи охолодження ДВЗ з метою підвищення її ефективності. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2021. Вип. 198. С. 66–81. DOI: 10.18664/1994-7852.198.2021.256607
9. Чередніков В.М., Череднікова О.В., Гузик Д.В. Випробування вентилятора системи охолодження двигуна внутрішнього згорання гелікоптера в умовах жаркого клімату. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник*. 2021. Вип. 39. С. 54–61. DOI: 10.32347/2409-2606.2021.39.53-60
10. Gronowicz J. Ochrona środowiska w transporcie lądowym. *Szczecin: Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej*, 1996. 301 s.
11. Merksiz J. Ekologiczne aspekty stosowania silników spalinowych. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1995. 367 s.

Cherednikov V.M., Cherednikova O.V. PREPARATION FOR TESTS WITH THE CREATION OF A PROGRAM FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF HELICOPTER INTERNAL COMBUSTION ENGINES ON THE LABORATORY STAND

The article deals with the task of checking the operability and reliability of the internal combustion engine of a helicopter. Engines which used in aircraft must be tested with a more complex verification of all characteristics than engines installed in ground vehicles. Also, aircraft engines will be more loaded during their operation and people's lives depend on the reliability of these engines. Energy efficiency and engine efficiency are also important. But in order to improve it, first you need to study the performance characteristics of the engine in different modes, and then make an analysis in order to increase the economy of the engine without losing its operational reliability. All tests will be done on the «PRO 800 DYNAMOMETER» test stand. The article describes the four main stages of the engine test process. At these stages, the speed characteristics of the engine, the characteristics of engine

idle speed and the regularity of engine operation are checked. Engine characteristics are studied at several throttle positions. The indicators of the devices that are measured are compared with the requirements for these values. The test program contains all the indicators that need to be recorded and their maximum deviations from the specified values in the measured ranges. During the experiment, the stand is recorded the necessary indicators in graphic form. The main characteristics are included such as engine power, torque, crankshaft speed, fuel consumption, coolant temperature, exhaust gas temperature, oil pressure and supply voltage. The article is described the requirements for the equipment, environment and fuel which used during experiments. Laboratory testing is planned as the next stage of scientific work. Tests will be based on the test preparation program and then engine operation parameters will be analyzed.

Key words: *engine power, fuel consumption, rotation frequency, exhaust gas temperature, engine efficiency.*