

АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ЦИЛІНДРОВИХ ВТУЛОК ДВИГУНІВ ФІРМИ V&W СЕРІЇ S70MC ТА S80MC

Проведено аналіз надійності циліндрових втулок малооберткових суднових дизельних двигунів виробництва фірми MAN V&W серій S70MC і S80MC. Використано статистичні дані швидкості зносу 696-ти циліндрових втулок. Для визначення ймовірності виникнення гранично-допустимої швидкості зношування робочої поверхні циліндрової втулки використано статистичні закони: нормального розподілу та Вейбулла-Гнеденко, для яких визначено параметри розподілу. На підставі використання критерію Пірсона встановлено, що найбільш точно емпіричному розподілу швидкості зношування відповідає апроксимуюча функція закону Вейбулла-Гнеденко. Отримана апроксимуюча функція дозволяє встановити реальні показники довговічності, що відповідають заданим показникам надійності циліндрових втулок.

Вступ

Стан циліндрових втулок (ЦВ) двигунів серії MC/MC-C покращувався протягом останніх років. Істотним внеском у цей розвиток є впровадження камери згоряння Oros [1]. Конструктивні зміни стосуються збільшення висоти поршня до першого кільця, установки кільця очищення поршня, удосконалення рельєфу поршневих кілець, який управляє тиском на нього, алюмінізованих покриттів поршневих кілець, і т.п. З конфігурацією камери згоряння Oros повітря, що надходить у зону горіння, концентрується навколо паливних форсунок, і відстань від паливних форсунок до днища поршня збільшується. Це сприяло зниженню теплового навантаження на поршень і, в основному, утворенню незмінного теплового навантаження кришки циліндра й випускного клапана. Збільшена висота поршня до першого кільця й установка кільця очищення поршня довели їхню ефективність усунення відкладань нагарів на поверхні поршня. Такі відкладання мають високу твердість і пористу структуру, які сприяють зняттю й поглинанню масляної плівки, залишаючи голу стінку циліндрової втулки, яка втрачає здатність у цьому випадку пручатися зношуванню.

Використання збільшеної висоти поршня також впливає на теплову напруженість втулки циліндра й покращує умови для її змащення.

Враховуючи дані факти, виникає необхідність у визначенні реальних показників надійності циліндрових втулок з метою корегування плану-графіку їх технічного обслуговування.

Найбільш дієвим способом оцінки надійності є обробка результатів статистичних даних зносу ЦВ.

Аналіз вихідних статистичних даних

Для дослідження показників надійності циліндрових втулок нами були використані статистичні дані, що привела в своїх публікаціях фірма MAN Diesel [2]. Приведені дані щодо швидкості зношу-

вання циліндрових втулок головних двигунів серій S70MC і S80MC, які були зібрані при обслуговуванні 696-и циліндрових втулок. Полігон розподілення швидкості зношування у логарифмічній системі координат представлено на рис. 1.

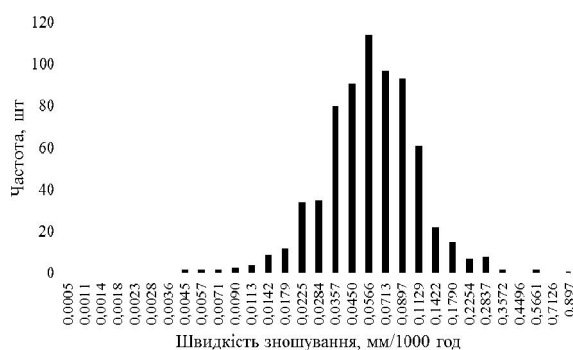


Рис. 1. Полігон розподілення швидкості зношування циліндрових втулок двигунів серій S70MC і S80MC

Для підтвердження нульової гіпотези використовуємо критерій Н.В. Смірнова [3], який припускає нормальний розподіл випадкової величини

Критерій дійсний для випадків, що найбільше широко зустрічаються, при яких генеральні параметри невідомі, а відоме лише їх оцінювання, зроблені на підставі зробленої вибірки.

Значення математичного очікування (середнього арифметичного значення) і середньоквадратичного відхилення для даної вибірки складають $\bar{x} = 0,072$ мм/1000 год і $\sigma = 0,0627$ мм/1000 год.

Далі підрахуємо статистику:

$$u_1 = \frac{\bar{x} - x_i}{\sigma} = \frac{0,072 - 0,0045}{0,0627} = 1,078, \quad (1)$$

якщо викликає сумнів перший член варіаційного ряду, чи

$$u_n = \frac{x_n - \bar{x}}{\sigma} = \frac{0,897 - 0,072}{0,0627} = 13,158, \quad (2)$$

якщо знаходиться під сумнівом максимальний член

варіаційного ряду. Отримані значення порівнюють з критичним значенням u_α , що приймається за таблицями [4] для рівня значимості $\alpha = 0,05$. Оскільки при $N \geq 25$ рекомендовано приймати $u_\alpha = t_\alpha$, то $u_\alpha = 3,70$.

Оскільки отримане значення $u_1 = 1,078 < 3,70$, а

$u_n = 13,158 > 3,70$, що не відповідає вказаній нерівності, то наступні підрахунки проводимо вже без урахування швидкості зношування останніх деталей. Результати проведених розрахунків, що базуються на статистичних даних, які різко не відрізняються, приведено в табл. 1.

Таблиця 1. Результати уточненого розрахунку параметрів емпіричного розподілення випадкової величини

Інтервал, мм/тис. год		Середина інтервалу x_i , мм/тис. год	Частота n_i , шт	Частість, n_i/N	$x_i \cdot n_i/N$, мм/тис. год	$(x - \bar{x})^2 \cdot n_i$
min	max					
0,0040	0,0050	0,0045	2	0,002886	0,008993	0,008438
0,0050	0,0063	0,0057	2	0,002886	0,011321	0,008138
0,0063	0,0079	0,0071	2	0,002886	0,014253	0,007768
0,0079	0,0100	0,0090	3	0,004329	0,026915	0,010973
0,0100	0,0126	0,0113	4	0,005772	0,045179	0,013528
0,0126	0,0158	0,0142	9	0,012987	0,127972	0,027454
0,0158	0,0200	0,0179	12	0,017316	0,214809	0,031888
0,0200	0,0251	0,0225	34	0,049062	0,766215	0,074832
0,0251	0,0316	0,0284	35	0,050505	0,992979	0,059062
0,0316	0,0398	0,0357	80	0,115440	2,857340	0,091035
0,0398	0,0501	0,0450	91	0,131313	4,091790	0,054557
0,0501	0,0631	0,0566	114	0,164502	6,453224	0,018803
0,0631	0,0794	0,0713	97	0,139971	6,912635	0,000319
0,0794	0,1000	0,0897	93	0,134199	8,343626	0,038198
0,1000	0,1259	0,1129	61	0,088023	6,889723	0,115407
0,1259	0,1585	0,1422	22	0,031746	3,128200	0,116407
0,1585	0,1995	0,1790	15	0,021645	2,685117	0,180044
Сума значень			$N=676$	1,00	$\bar{x} = 0,06445$	$0,8567$ $\sigma=0,0356$

Визначення теоретичного закону розподілу швидкості зношування циліндрових втулок

Розрахунок показників закону нормального розподілу

Теоретична щільність розподілу в кожному розряді визначається за формулою:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_j - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

Інтегральна функція розподілу в кожному розряді визначається за формулою:

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x -\frac{(x_j - \bar{x})^2}{2\sigma^2} dx. \quad (4)$$

Теоретична частота в кожному розряді:

$$n'_j = f(x'_j) \cdot N \cdot C \quad (5)$$

Оскільки показники двопараметричного закону нормального розподілу наступні: $\bar{x} = 0,06445$, та $\sigma = 0,0356$, то теоретична щільність розподілу швидкості зносу циліндрових втулок набуде виду:

$$f(x) = \frac{1}{0,0356\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_j - 0,06445)^2}{2 \cdot 0,0356^2}\right] = 11,206 \exp\left[-\frac{(x_j - 0,06445)^2}{0,0025}\right]. \quad (6)$$

Для всіх інтервалів випадкових значень швидкості зношування значення розрахунків за формулами (4) та (6) заносимо до табл.2.

Розрахунок показників закону Вейбулла-Гнєденко

Емпіричний розподіл апроксимуємо теоретичним розподілом Вейбулла-Гнєденко, параметри якого знаходимо за методом найменших квадратів.

Теоретична функція розподілу Вейбулла-Гнєденко має вигляд:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{t_0}\right)^b\right], \quad (7)$$

де t і b – параметри розподілу.

Таблиця 2. Визначення статистичних показників за нормальним розподілом швидкості зношування циліндрових втулок

№ інтервалу	Інтервал, мм/тис. год		Середина інтервалу x_i , мм/тис. год	Частота n_i , шт	Частість, n_i/N	z	$f(z)$	$\Phi(z)$	$P(x)$
	min	max							
1	0	0,02	0,01	32	0,047	-1,529	0,124	0,063	0,937
2	0,02	0,04	0,03	145	0,214	-0,968	0,250	0,166	0,834
3	0,04	0,06	0,05	186	0,275	-0,406	0,367	0,344	0,656
4	0,06	0,08	0,07	108	0,160	0,156	0,394	0,561	0,439
5	0,08	0,1	0,09	91	0,135	0,718	0,308	0,764	0,236
6	0,1	0,12	0,11	54	0,080	1,279	0,176	0,899	0,101
7	0,12	0,14	0,13	24	0,036	1,841	0,073	0,967	0,033
8	0,14	0,16	0,15	16	0,024	2,403	0,022	0,992	0,008
9	0,16	0,18	0,17	12	0,018	2,965	0,005	0,998	0,002
10	0,18	0,2	0,19	8	0,012	3,527	0,001	0,999	0,001

Перетворимо цю формулу в рівняння прямої лінії:

$$y = a_0 + b \cdot x, \quad (8)$$

де

$$y = \ln \left(\ln \frac{1}{1 - F(t)} \right); \quad x = \ln t.$$

Коефіцієнти a_0 і b рівняння (8) визначаємо із системи нормальних рівнянь:

$$\begin{cases} n \cdot a_0 + b \sum x_i = \sum y_i \\ a_0 \sum x_i + b \sum x_i^2 = \sum x_i \cdot y_i \end{cases} \quad (9)$$

Результати розрахунків зводимо в табл. 3.

Підставляємо отримані значення в систему (9):

$$\begin{cases} 10 \cdot a_0 - 25,752 \cdot b = 2,915 \\ -25,752 \cdot a_0 + 273,879 \cdot b = 4,657 \end{cases}$$

і знаходимо, що $a_0 = 4,432$; $b = 1,608$.

Після цього рівняння (8) має вигляд:

$$y = 4,432 + 1,608x.$$

В силу того, що один із параметрів розподілу знайдений: $b = 1,608$, то другий знаходимо з умови $y = 0$.

Тоді $a_0 + b \cdot x_0 = 0$, або $4,432 + 1,608 \cdot x_0 = 0$, звідки $x_0 = -2,756$, а $t_0 = \exp(-2,756) = 0,06355$.

Функція розподілу Вейбулла-Гнеденко має вигляд:

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x_i}{0,06355} \right)^{1,608} \right]. \quad (10)$$

Розрахунки характеристики розподілу швидкості зношування циліндрових втулок за законом Вейбулла-Гнеденко приведено в табл. 4.

Перевірка гіпотез про вигляд функцій розподілу

Для визначення ступеня узгодженості теоретичного розподілу з емпіричним можливе використання критерію узгодженості Пірсона [5].

Статистикою критерію Пірсона служить величина:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^e \frac{(n_j - N \cdot p_j)^2}{N \cdot p_j}, \quad (11)$$

де p_j – ймовірність потрапляння випадкової досліджуваної величини в j -й інтервал, що підраховується відповідно до гіпотетичного закону розподілу $F(x)$. Нульову гіпотезу про відповідність вибіркового розподілу теоретичному закону $F(x)$ перевіряють шляхом порівняння підрахованої за формулою (11) величини з критичним значенням χ_α^2 , що знаходиться за табличними даними. Якщо виконується нерівність:

$$\chi^2 \leq \chi_\alpha^2, \quad (12)$$

то нульову гіпотезу не відкидають. При невиконанні вказаної нерівності приймають альтернативну гіпотезу про належність вибірки невідомому розподілу.

Спочатку проведемо розрахунки перевірки гіпотези про нормальність розподілу швидкості зношування циліндрових втулок двигунів фірми MAN серії S70 і S80. Межі інтервалів виразимо через нормовану випадкову величину.

Для першого інтервалу приймаємо, що ліва його межа прагне до $-\infty$, а права має значення 0,02 мм/тис. год. Тоді координата правої межі першого інтервалу:

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{\sigma} = \frac{0,02 - 0,06445}{0,0356} = -1,249.$$

Таблиця 3. Результати розрахунків коефіцієнтів системи рівнянь

№ інтервалу	Середина інтервалу $x_{срi}$, мм/тис. год	$F_{iмп}$	$\frac{1}{1-F_{iмп}}$	$y_i = \ln\left(\ln\frac{1}{1-F_{iмп}}\right)$	$x_i = \ln x_{срi}$	x_i^2	$x_i \cdot y_i$
1	0,01	0,047	1,05	-3,026	-4,605	21,208	13,937
2	0,03	0,262	1,35	-1,192	-3,507	12,296	4,180
3	0,05	0,537	2,16	-0,261	-2,996	8,974	0,783
4	0,07	0,697	3,30	0,177	-2,659	7,072	-0,470
5	0,09	0,831	5,93	0,577	-2,408	5,798	-1,388
6	0,11	0,911	11,27	0,885	-2,207	4,872	-1,952
7	0,13	0,947	18,78	1,076	-2,040	4,163	-2,195
8	0,15	0,970	33,80	1,259	-1,897	3,599	-2,388
9	0,17	0,988	84,50	1,490	-1,772	3,140	-2,640
10	0,19	0,999	1000,00	1,933	-1,661	2,758	-3,210
Сума параметрів:				2,915	-25,752	73,879	4,6568

Таблиця 4. Визначення статистичних показників за законом Вейбулла-Гнеденко розподілу швидкості зношування ЦВ

№ інтервалу	Інтервал, мм/тис. год		Середина інтервалу x_i , мм/тис. год	Частота n_i , шт	Частість, n_i/N	$F(x)$
	min	max				
1	0	0,02	0,01	32	0,047	0,0498
2	0,02	0,04	0,03	145	0,214	0,2585
3	0,04	0,06	0,05	186	0,275	0,4934
4	0,06	0,08	0,07	108	0,160	0,6891
5	0,08	0,1	0,09	91	0,135	0,8262
6	0,1	0,12	0,11	54	0,080	0,9107
7	0,12	0,14	0,13	24	0,036	0,9576
8	0,14	0,16	0,15	16	0,024	0,9813
9	0,16	0,18	0,17	12	0,018	0,9923
10	0,18	0,2	0,19	8	0,012	0,9970

Аналогічні розрахунки проводимо для всіх інших показників інтервалів.

Оцінка ймовірності потрапляння значень швидкості зношування у вказані інтервали представляє собою різницю значень функції Лапласа на правій та лівій межі. Якщо інтервали об'єднувались, то підраховують різницю значень функції на межі об'єднаного інтервалу.

Підставляємо відомі значення до (11), і отримуємо для першого інтервалу:

$$\frac{(n_j - N \cdot p_j)^2}{N \cdot p_j} = \frac{(32 - 676 \cdot 0,106)^2}{676 \cdot 0,106} = 7,315.$$

Аналогічні розрахунки проводимо і для інших інтервалів. Результати розрахунків дають значення статистики $\chi^2=72,6$.

Для $\alpha = 0,01$ та $k = 7$ знаходимо критичне значення $\chi_{0,01}^2 = 18,5$. Оскільки умова (12) не виконується, то значить, що дослідні дані суперечать дво-

параметричному закону нормального розподілу, і таким чином, нульову гіпотезу відкидаємо. До аналогічного висновку приходимо і на підставі графічного аналізу.

Проведемо аналогічні розрахунки критерію узгодження Пірсона і для випадку можливості використання апроксимуючого закону Вейбулла-Гнеденко. Відмінність у методиці від попереднього розрахунку полягає у визначенні ймовірності потрапляння до інтервалу. Цей показник розраховується за виразом (10). Для першого інтервалу:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{0,06355}\right)^{1,608}\right] =$$

$$1 - \exp\left[-\left(\frac{0,02}{0,06355}\right)^{1,608}\right] = 0,144.$$

Аналогічні підрахунки проводимо і для інших інтервалів. Сума показників останнього стовпчика дає значення статистики $\chi^2=13,94$.

Приймаємо рівень значимості $\alpha = 0,01$ та розрачуємо число ступенів свободи k :

$$k = e_1 - m - 1 = 10 - 3 - 1 = 6.$$

Оскільки закон Вейбулла-Гнєденко є трипараметричним, то $m = 3$. За табличними даними [3-5] для $\alpha = 0,01$ та $k = 6$ знаходимо критичне значення $\chi_{0,01}^2 = 16,8$. Результати графічного аналізу прийнятого закону (рис. 2) теж демонструють задовільну відповідність теоретичного закону емпіричному.

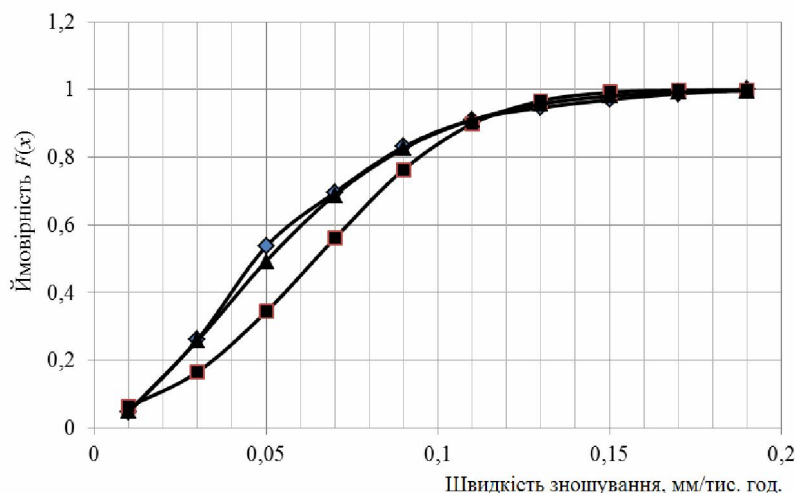


Рис. 2. Функції розподілу швидкості зношування циліндрових втулок:

- ◆ – емпірична функція; ▲ – функція закону Вейбулла-Гнєденко;
- – функція закону нормального розподілу (закону Гауса)

Висновки

Швидкість зношування циліндрових втулок малооборотних дизелів фірми MAN B&W серії S70 і S80 змінюється в широких межах від 0,01 мм/1000 год. до 0,2 мм/1000год. При проведенні дослідження відкинуто значення швидкості зношування, що не відповідають дійсності. Встановлено, що серед запропонованих апроксимуючих статистичних функцій, таких як закон нормального розподілу та закон Вейбулла-Гнєденко, найбільш точно відображає розподіл досліджуваної випадкової величини закон Вейбулла-Гнєденко. Для прийнятого закону приведено інтегральну функцію, що дозволяє визначити ймовірність кожного конкретного значення швидкості зношування циліндрових втулок.

Список літератури:

1. Engine Management Concept Makes Significant Breakthrough / Diesel Facts. – 1/2011. – p.3. 2. Service Experience of MAN B&W Low Speed Diesel Engines. Two-stroke en-

gines/MAN Diesel&Turbo, April, 2013. 3. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник / Михаил Никитович Степнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с. 4. Решетов Д.Н. Надежность машин / [Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев]; под ред. Д.Н. Решетова. – М.: Высшая школа, 1988. – 238 с. 5. Ефремов Л.В. Практика инженерного анали за надёжности судовой техники / Леонид Владимирович Ефремов. – Л.: Судостроение, 1980. – 176 с.

Bibliography (transliterated):

1. Engine Management Concept Makes Significant Breakthrough / Diesel Facts. – 1/2011. – p.3. 2. Service Experience of MAN B&W Low Speed Diesel Engines. Two-stroke engines/MAN Diesel&Turbo, April, 2013. 3. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник / Михаил Никитович Степнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с. 4. Решетов Д.Н. Надежность машин / [Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев]; под ред. Д.Н. Решетова. – М.: Высшая школа, 1988. – 238 с. 5. Ефремов Л.В. Практика инженерного анали за надёжности судовой техники / Леонид Владимирович Ефремов. – Л.: Судостроение, 1980. – 176 с.

Поступила в редакцию 18.06.2014

Савчук Володимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки Херсонської державної морської академії, Херсон, Україна, e-mail: postsavchuk@gmail.com

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК ДВИГАТЕЛЕЙ ФИРМЫ
MAN B&W СЕРИИ S70 И S80

В.П. Савчук

Произведен анализ надежности цилиндровых втулок малооборотных судовых дизельных двигателей производства фирмы MAN B&W серий S70MC и S80MC. Используются статистические данные скорости изнашивания 696-ти цилиндровых втулок. Для определения вероятности возникновения предельно-допустимой скорости изнашивания рабочей поверхности цилиндрической втулки использованы статистические законы: нормального распределения и Вейбулла-Гнеденко, для которых определены параметры распределения. На основании использования критерия Пирсона установлено, что наиболее точно эмпирическому распределению скорости изнашивания соответствует аппроксимирующая функция закона Вейбулла-Гнеденко. Полученная аппроксимирующая функция позволяет установить реальные показатели долговечности, которые отвечают заданным показателям надежности цилиндровых втулок

THE ANALYSIS OF RELIABILITY OF CYLINDER LINERS OF ENGINES OF FIRM
MAN B&W SERIES S70 AND S80

V.P.Savchuk

The analysis of reliability of cylinder liners on low speed marine diesel engines of production of firm MAN B&W series S70MC and S80MC is effected. 696 cylinder liners are used the statistical given wear rates. For definition of probability of origin of a maximum-permissible wear rate of a working surface of the cylinder liner was used statistical laws: Gaussian distribution and Weibull-Gnedenko for whom it is defined distribution parameters. On the basis of usage of criterion of Pirsona it was established that it is the most exact to empirical distribution of a wear rate to most precisely empirical distribution there matches approximating function of the law of Weibull-Gnedenko. The received approximating function allows to install real parameters of durability which answer the set parameters of reliability of cylinder liners.

УДК 621.431.3

М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю.Н. Галынкин

ВЛИЯНИЕ РЕГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УТИЛИЗАЦИИ
НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА МЕТАЛЛОГИДРИДНОЙ УСТАНОВКОЙ
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Показано, что при утилизации тепла малооборотных ДВС КПД металлгидридной утилизационной установки непрерывного действия с регенерацией энергии может превысить 25%. Определены температурные напоры в регенерационном теплообменнике в зависимости от степени регенерации и температуры десорбции. Даны рекомендации по применению существующих гидридообразующих материалов. Показано, что КПД утилизационной установки составляет 25% в случае использования материала $ZrCrFe_{1,6}$ при $P_{max}=15$ МПа, $P_{min}=0,5$ МПа, $\eta_{PM}^P=0,9$, $\eta_H^P=0,9$, $r_t=0,8$ $T_0=450$ К.

Постановка проблемы. Двигатели внутреннего сгорания являются одним из наиболее эффективных преобразователей химической энергии топлива в механическую работу. Высокая надежность и эффективность привели к их широкому распространению на наземном и водном транспорте, в стационарной энергетике. Эффективность ДВС оценивается эффективным КПД, наибольшее значение которого достигнуто в малооборотных двигателях и составляет 45-51% [1, 2, 3]. Это значение близко к предельному на современном технологическом уровне. Одним из путей повышения эффективности малооборотных ДВС является утилизация их вторичных энергоресурсов с целью выработки механической энергии. К вторичным энергоресурсам ДВС традиционно относят тепловую энергию выхлопных газов, наддувочного воздуха, охлаждающей воды и циркуляционного масла. Особенностью тепла вторичных энергоресурсов малообо-

ротного двигателя является низкий температурный уровень, который, как правило, не превышает 520 К.

Обзор публикаций. Использование принципов поглощения/выделения водорода гидридообразующим материалом позволило создать ряд гидридных машин: тепловые насосы [4], холодильные машины [5], компрессоры водорода [6]. Однако они работают циклически, что ведёт к снижению эффективности и увеличению массогабаритных показателей, по сравнению с непрерывно работающими машинами.

Известна возможность некоторых гидридных материалов поглощать водород, находясь в слое инертной к реакции адсорбции/десорбции жидкости [7, 8]. На этой основе появилась возможность создавать гидридные машины непрерывного действия, где гидридообразующий материал перекачивается между реакторами. Термодинамическому ана-