

ПОЛІПШЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА МЕТОДОМ ПІДБОРУ СТУПЕНЯ НАДДУВАННЯ

Показано вплив ступеня підвищення тиску на основні показники двигуна, побудовано графіки залежності основних показників двигуна від ступеня наддування, наведено поля характеристик турбокомпресорів та їх технічні характеристики.

Ключові слова: наддування, поле характеристик, турбокомпресор, ступінь підвищення тиску.

Вступ. Турбокомпресор, або турбо (розмовне), від грецького "τὺρβη" («турбулентності») – це форсований пристрій, який робить ефективнішим двигун і допомагає виробляти більше енергії, змушуючи додаткове повітря потрапляти в камеру згоряння. Турбований двигун є більш потужним та ефективним, ніж атмосферний [1].

Турбіни зазвичай використовуються на вантажних автомобілях, поїздах, літаках і двигунах будівельного обладнання. Вони широко використовуються з двигунами циклу Отто і в дизелях – двигунах внутрішнього згоряння.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. На сьогодні переважна більшість автомобілів комплектуються двигунами з турбонаддуванням.

У сучасних двигунах для підвищення щільності повітря застосовують переважно відцентрові компресори зазвичай з радіальними лопатками. Компресор встановлюється на одному валу з газовою турбіною, такий агрегат дістав назву турбокомпресор. Гази, що відпрацювали, поступають на колесо турбіни під змінним (імпульсним) або постійним (ізобарним) тиском.

При розрахунку компресора визначають необхідну кількість повітря для двигуна, подачу повітря одним компресором (якщо їх декілька), міру підвищення тиску, прототип, зовнішній діаметр колеса, частоту обертання, загальну роботу, витрачену на впускання, стискування і нагнітання повітря, зміну температури і тиску в каналах компресора і коефіцієнт корисної дії [2].

У 2005 році частка проданих у Євросоюзі нових дизельних автомобілів склала 48,9%, а у Австрії більше 70%. Так один з найбільших світових концернів VW випускає 57,3 % автомобілів з дизельними двигунами [3].

Оскільки багато виробників користуються власними методами підбору турбіни, прив'язуючись лише до ККД компресора відносно двигуна [4], що розглядається, виникає необхідність у застосуванні більш універсального методу, прийняттого для всіх випадків.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Останнім часом все більше моделей ДВЗ випускають з турбокомпресорами. Раніше це були, як правило, дизельні двигуни, але зараз широко застосовуються турбіни і для бензинових. Головне завдання турбіни – підняття потужності двигуна та крутного моменту при тій же витраті палива порівняно з атмосферним.

Часто двигуни мають наддування, яке не відповідає їх технічним параметрам. Тому для удосконалення конструкції і забезпечення тривалої експлуатації необхідний більш точний підбір турбокомпресорів.

Правильно підібраний турбонагнітач забезпечить помірні оберти порогу наддування, некритичне звуження системи, низьку температуру на вході в ДВЗ і невисокий тиск у випускному колекторі. Чим нижчий поріг наддування – тим менша потужність ДВЗ. Якщо

метою є максимальна потужність, турбонагнітач необхідного розміру не створюватиме необхідного тиску наддування до другої половини діапазону обертів.

Незважаючи на досить простий принцип роботи, сам турбокомпресор являє собою дуже “тонкий” пристрій. Потрібна не тільки виключно точна підгонка деталей всередині турбокомпресора, а й ідеально узгоджена робота турбокомпресора і двигуна. За відсутності такого погодження двигун не тільки працюватиме неефективно, але і може бути пошкоджений.

Постановка завдання. Завдання полягає в узагальненні методик, зокрема необхідно показати вплив ступеня підвищення тиску на основні показники двигуна, навести графічні залежності основних показників двигуна від ступеня наддування, поля характеристик турбокомпресорів та їх технічні характеристики.

Основний матеріал і результати. Вплив ступеня підвищення тиску на основні показники двигуна визначається наступним чином.

З рівняння масової кількості повітря

$$M_{\text{Д}} = \frac{\alpha \cdot L_0 \cdot g_e \cdot N_e \cdot \varphi}{3600}, \text{ кг/с}, \quad (1)$$

де $M_{\text{Д}} = M_{\text{К}} \cdot i_{\text{К}}$, звідси питома витрата палива g_e , кг/(кВт·год), дорівнює

$$g_e = \frac{3600 \cdot M_{\text{Д}}}{\alpha \cdot L_0 \cdot N_e \cdot \varphi} = \frac{3600 \cdot M_{\text{К}} \cdot i_{\text{К}}}{\alpha \cdot L_0 \cdot N_e \cdot \varphi}. \quad (2)$$

Враховуючи, що $N_e = \frac{P_e \cdot V_h \cdot i \cdot n}{120}$, питома витрата палива g_e дорівнює

$$g_e = \frac{3600 \cdot G_{\text{Д}}}{\alpha \cdot L_0 \cdot N_e \cdot \varphi} = \frac{3600 \cdot G_{\text{К}} \cdot i_{\text{К}}}{\alpha \cdot L_0 \cdot N_e \cdot \varphi}. \quad (3)$$

З урахуванням попередньої формули ефективної потужності

$$g_e = \frac{3600 \cdot G_{\text{К}} \cdot i_{\text{К}}}{\alpha \cdot L_0 \cdot \frac{P_e \cdot V_h \cdot i \cdot n}{120} \cdot \varphi} = \frac{432000 \cdot G_{\text{К}} \cdot i_{\text{К}}}{\alpha \cdot L_0 \cdot P_e \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi}, \quad (4)$$

звідки середній ефективний тиск P_e , МПа, дорівнюватиме

$$P_e = \frac{432000 \cdot G_{\text{К}} \cdot i_{\text{К}}}{\alpha \cdot L_0 \cdot g_e \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi}. \quad (5)$$

Величина тиску повітря на виході з компресора P_k , МПа, становить

$$P_k = \frac{(0,15 \dots 0,18) \cdot 432000 \cdot G_{\text{К}} \cdot i_{\text{К}}}{\alpha \cdot L_0 \cdot g_e \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi}, \quad (6)$$

де $P_k = (0,15 - 0,18)P_e$ – для чотиритактних двигунів [5].

З рівняння P_k можна записати три взаємопов'язані рівняння: ступеня підвищення тиску, питомої витрати палива та коефіцієнта надлишку повітря:

$$\pi_k = \frac{P_k}{P_0} = \frac{(0,15...0,18) \cdot 432000 \cdot G_K \cdot i_k}{\alpha \cdot L_0 \cdot g_e \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi \cdot P_0}; \quad (7)$$

$$g_e = \frac{(0,15...0,18) \cdot 432000 \cdot G_K \cdot i_k}{\alpha \cdot L_0 \cdot \pi_k \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi \cdot P_0}; \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{(0,15...0,18) \cdot 432000 \cdot G_K \cdot i_k}{g_e \cdot L_0 \cdot \pi_k \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi \cdot P_0}. \quad (9)$$

У сучасних двигунах ступінь підвищення тиску знаходиться в межах $\pi_k = 1...4$ [6], тоді питома витрата палива відповідатиме таким функціям і знаходитиметься в таких межах відносно ступеня підвищення тиску:

$$g_e(\pi_k) = \frac{(0,15) \cdot 432000 \cdot G_K \cdot i_k}{\alpha \cdot L_0 \cdot \pi_k \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi \cdot P_0} \quad \text{і} \quad g_{e1}(\pi_k) = \frac{(0,18) \cdot 432000 \cdot G_K \cdot i_k}{\alpha \cdot L_0 \cdot \pi_k \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi \cdot P_0}. \quad (10)$$

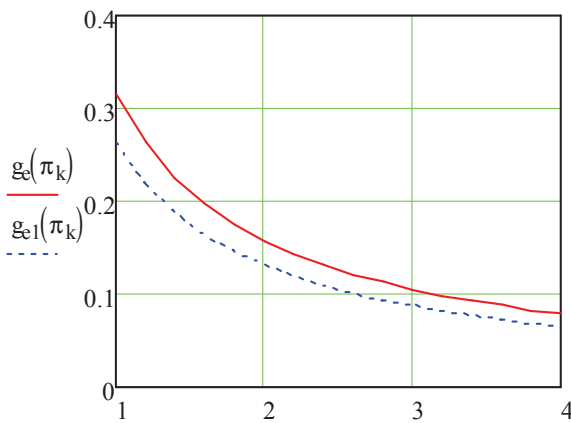


Рисунок 1 – Графік залежності питомої витрати палива від ступеня підвищення тиску

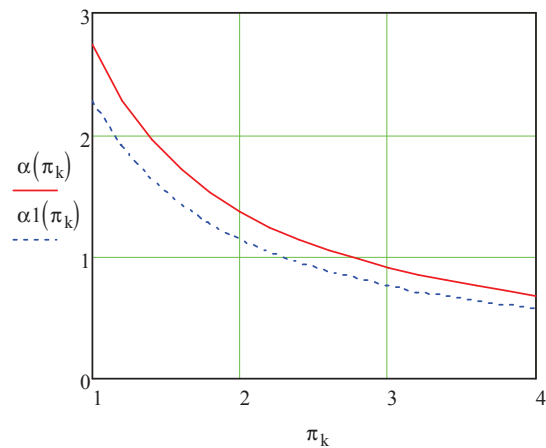


Рисунок 2 – Графік залежності коефіцієнта надлишку тиску від ступеня підвищення тиску

Коефіцієнт надлишку тиску дорівнює

$$\alpha(\pi_k) = \frac{(0,15) \cdot 432000 \cdot G_K \cdot i_k}{g_e \cdot L_0 \cdot \pi_k \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi \cdot P_0} \quad \text{і} \quad \alpha_1(\pi_k) = \frac{(0,18) \cdot 432000 \cdot G_K \cdot i_k}{g_e \cdot L_0 \cdot \pi_k \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi \cdot P_0}. \quad (11)$$

Тиск повітря на виході з компресора становитиме

$$P_k = \frac{(0,15) \cdot 432000 \cdot G_K \cdot i_k}{\alpha \cdot L_0 \cdot g_e \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi} \quad \text{і} \quad P_{k1} = \frac{(0,18) \cdot 432000 \cdot G_K \cdot i_k}{\alpha \cdot L_0 \cdot g_e \cdot V_h \cdot i \cdot n \cdot \varphi}. \quad (12)$$

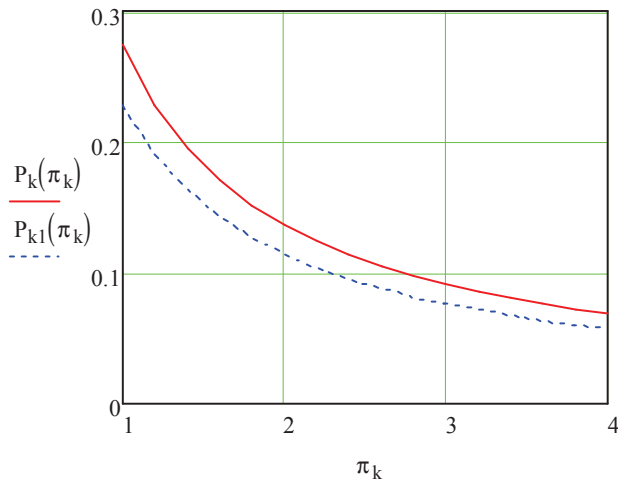


Рисунок 3 – Графік залежності коефіцієнта надлишку тиску від ступеня підвищення тиску

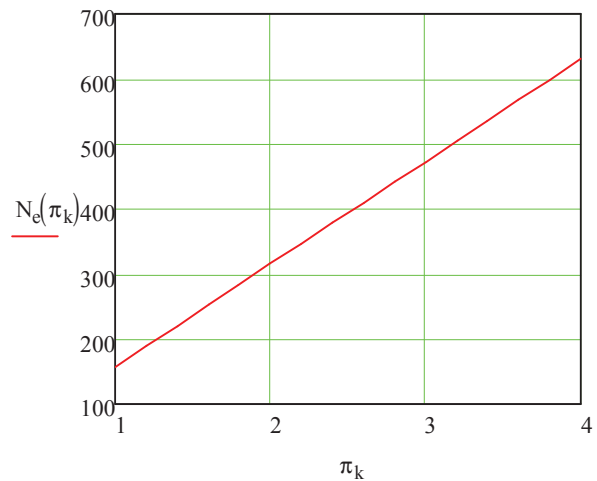


Рисунок 4 – Графік залежності потужності від ступеня підвищення тиску

Потужність двигуна (на базі ЯМЗ 238) $N_e, кВт \cdot год$, дорівнює

$$N_e(\pi_k) = \frac{\pi_k \cdot V_h \cdot P_0 \cdot n \cdot i}{(0,15) \cdot 120} \quad \text{і} \quad N_{e1}(\pi_k) = \frac{\pi_k \cdot V_h \cdot P_0 \cdot n \cdot i}{(0,18) \cdot 120} \quad (13)$$

Рисунок 4 – Графік залежності потужності від ступеня підвищення тиску

За формулами (10) та (13) отримуємо графік залежностей потужності двигуна (на базі ЯМЗ–238) і питомої витрати палива від ступеня підвищення тиску.

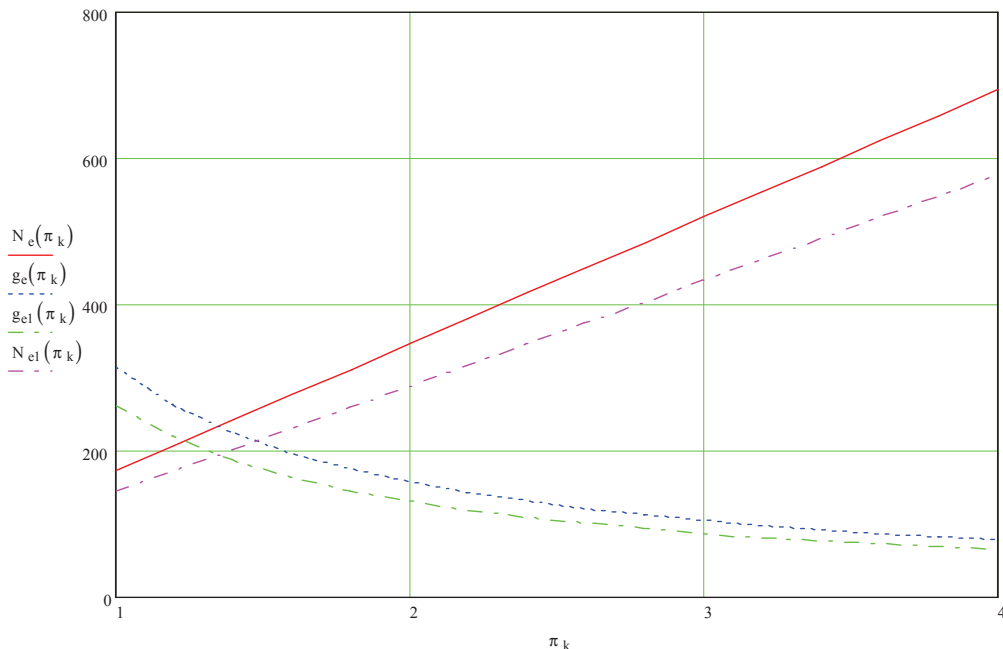


Рисунок 5 – Графік залежностей потужності двигуна і питомої витрати палива від ступеня підвищення тиску

Графік показує ідеальний випадок співвідношень. Як у процесі експлуатації, так і під час стендових випробувань потужність зростає аналогічно, проте витрата палива приблизно однакова та майже не підвищується впродовж збільшення наддування.

Із графіка можна визначити потужність і питому витрату палива двигуна ЯМЗ–238, змінюючи ступінь підвищення тиску. Починати слід від нульової точки (атмосферний тиск на вході в ДВЗ) і продовжувати наддувати до тих пір, доки дозволяє еталонна конструкція. Методику можна використати для будь-якого дизельного двигуна, змінивши початкові дані.

Для розрахунку турбокомпресора необхідний вибір діаметра коліс компресора й турбіни. У процесі розрахунку уточнюються розміри коліс, дифузорів, спіральних камер (равликів), ККД і робиться вибір необхідної марки турбокомпресора і заводу-виробника.

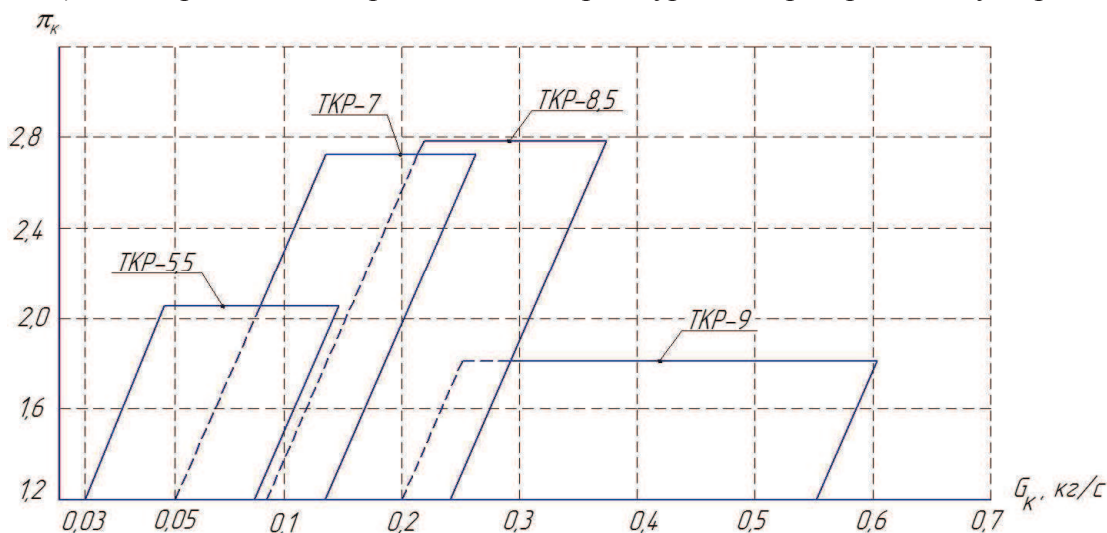


Рисунок 6 – Поля характеристик турбокомпресорів

У таблиці 1 наведено технічні характеристики турбокомпресорів (компресора і турбіни) [7].

В Україні також випускають якісні турбокомпресори на Турбокомпресорному заводі у Мелітополі «Піонер» [8]. Вони класифікуються аналогічно до вищезазначених, але мають більш широкую номенклатуру продукції для с/г техніки (комбайнів і тракторів), легкових, вантажних автомобілів та автобусів російського виробництва, таких як ЯМЗ, ЧТЗ, АМЗ, КамАЗ та інших, а також багатьох провідних іноземних марок: BAUDOIN, DAEWOO, IVECO, JOHN DEERE, KOMATSU, MERCEDES, Volvo тощо. Моделі класифікуються за такими класами: ТКР 6, ТКР 6.1, ТКР 7Н1, ТКР 7Н6, ТКР 8.5 Н1, ТКР 8.5 Н3, ТКР 8.5 С1, ТКР 8.5 С3, ТКР 8.5 С6, ТКР 8.5 С17, ТКР 9(12), ТКР 11Н1, ТКР 11Н2, ТКР 11Н3, ТКР 11Н6/7, ТКР 11 Н10, ТКР С1, ТКР 11С 31К, ТКР 11ЯМЗ 238.

У кожному класі наявний широкий асортимент з метою найбільш точного підбору турбокомпресора для будь-якого двигуна вищезазначених марок автомобілів, автобусів, тракторів та комбайнів.

Таблиця 1 – Параметри турбокомпресорів підприємства «Воронезький механічний завод»

Технічна характеристика	ТКР-5,5 Н-5	ТКР- 5,5 С-1	ТКР- 5,5 С-3	ТКР- 7 Н-1	ТКР - 9 С-2 і С-3
КОМПРЕСОР					
1. Номінальний діаметр колеса, мм	52±1	52±1	54±1	75±1	90±1
2. Максимальний ККД, не менше, %	70	70	70	75	75
ТУРБІНА					

1. Номінальний діаметр колеса, мм	50±1	50±1	53±1	75±1	90±1
2. Максимальний ККД, не менше, %	60	60	60	70	70
3. Максимальна подача повітря компресором, кг/с	0,1	0,11	0,15	0,15	0,25
4. Максимальний ступінь підвищення тиску	1,9	2,1	2,1	1,9	2,1
5. Частота обертів ротора, хв ⁻¹	150000	150000	130000	110000	85000
6. Маса ТКР, кг	5,0	5,0	5,0	9,5	15,5
7. Сфера призначення, потужність двигуна, кВт	ВАЗ-3431(60)	ГАЗ- 560 (70)	ГАЗ - 562 (90)	Д- 440 (100)	Д- 461 В- 400 (175-300)

Разом з вітчизняними турбокомпресорами у двигунах застосовують і закордонні. Із закордонних являють інтерес турбокомпресори фірми ККК (Kuhnle, Kopp Kausch – Німеччина, Франція, США) [9]. Вона випускає ряд турбокомпресорів (До, К1, К2, К3, К4, К5) з подачею повітря від 0,02 до 2 кг/с і ступенем підвищення тиску від 1,5 до 4 для двигунів потужністю від 20 до 1000 кВт. Турбокомпресори мають високий ККД і автоматичну систему регулювання. Широке застосування отримали й системи з перепусканням газу повз турбіну.

Висновки. Правильно підібраний турбонагнітач забезпечить помірні оберти порогу наддування, некритичне звуження системи, низьку температуру на вході у двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) і невисокий тиск у випускному колекторі. Чим нижчий поріг наддування, тим менша потужність ДВЗ. Якщо метою є максимальна потужність, турбонагнітач потрібного розміру не створюватиме необхідного тиску наддування до другої половини діапазону обертів.

Тиск у випускному колекторі – критерій того, наскільки добре турбоагрегат підібраний для конкретного двигуна. Тиск у випускному колекторі не повинен перевищувати тиску наддування більш ніж у два з половиною рази. Це призводить до виготовлення занадто малих турбін тільки для того, щоб створювати потрібний тиск наддування на низьких обертах. Необхідний баланс між наддуванням на низьких обертах і наддуванням на максимальних обертах – завдання проектування, яке повинен розв'язувати кожний виробник турбокомпресорів. У результаті менший тиск у випускному колекторі забезпечує більшу потужність.

Запропоновану методику можна використати для будь-якого дизельного двигуна, змінивши початкові дані.

Розглядаючи вищезазначених виробників турбокомпресорів, можна із впевненістю сказати, що український виробник повною мірою може конкурувати з іноземними.

Література

1. Матеріал з Вікіпедії, вільної енциклопедії [Електронний ресурс]. – Режим доступу до статті: <http://en.wikipedia.org/wiki/Turbocharger>
2. Лашко В.А. Расчет центробежного компрессора и центростремительной турбины [Електронний ресурс]. / В.А. Лашко, Ю.П. Макушев, Л.Ю. Михайлова; Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск) Сибирская

- государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ). – [Цит. 2014, 22 лютого]. – Режим доступу: http://www.chiptuner.ru/content/pub_12/
3. *Western European Passenger Car Purchases Shifted to Higer Share for Small CarSi Lover Share for Diesels in 2009* [Електронний ресурс]. – Режим доступу до статті: <http://www.Greenarccongress.com/2010/02/acea-20100204.html>.
 4. *Bell Corky Maximum boost: Designing, Testing and Installing Turbocharger Systems*:Cambridge: Bentley publishers, 1997. 250 p.
 5. Макушев Ю.П. Агрегаты наддува двигателей: учебное пособие / Ю.П. Макушев , С.В. Корнеев, В.В. Рындин. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – 58 с.
 6. Хак Г. Турбодвигатели и компрессоры: справочное пособие / Г. Хак – М.: ООО Издательство «Астрель – АСТ», 2003. – 351 с.
 7. Лашко В.А. Методика оценки эффективности систем газотурбинного наддува комбинированных двигателей внутреннего сгорания. учебное пособие / В.А. Лашко, А.Н. Бердник – Хабаровск: Из-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2006. – 118 с
 8. Завод турбокомпрессоров "МЗТк "ТУРБОКОМ" [Електронний ресурс]. – [Цит. 2014, 22 лютого]. – Режим доступу: <http://www.turbocom.com.ua/>
 9. *Modernpowersystems* [Електронний ресурс]. – [Цит. 2014, 22 лютого]. – Режим доступу: <http://www.modernpowersystems.com/contractors/compressors-and-compressor-parts/kkk-kuhnle-kopp-kausch/>

Н.Н. Шпилька, к.т.н., доцент
А.Н. Шпилька, старший преподаватель
В.М. Хомович, магистрант

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ ПОДБОРА СТЕПЕНИ НАДДУВА

Показано влияние степени повышения давления на основные показатели двигателя, построены графики зависимости основных показателей двигателя от степени наддува, приведены поля характеристик турбокомпрессоров и их технические характеристики.

Ключевые слова: наддув, поле характеристик, турбокомпрессор, степень повышения давления.

N.N. Shpilka, Ph.D., associate professor
A.M. Shpilka, senior Lecturer
V.M. Khomovych, master student
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

IMPROVED ENGINE SELECTION METHOD DEGREE TURBO

The article shows the influence of the degree of pressure increase to the basic parameters of the engine, graphs of the main indicators of the engine on the degree of charging, lists the fields of the characteristics of the turbochargers and their technical characteristics.

Keywords: supercharge, field of descriptions, turbo-compressor, degree of increase of pressure.

Надійшла до редакції 11.10.2014
© М.М. Шпилька, А.М. Шпилька, В.М. Хомович