

Національний технічний університет
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Самойленко Дмитро Євгенович

УДК 621.43.062(04)

ПОЛІПШЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ ШЛЯХОМ РЕГУЛЮВАННЯ
ТУРБОНАДДУВУ

Спеціальність 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2008

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Марченко Андрій Петрович
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
проректор з наукової роботи, завідувач кафедри
двигунів внутрішнього згоряння

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Єрощенко Станіслав Аркадійович
Українська державна академія залізничного транспорту,
м. Харків, завідувач кафедри теплотехніки та теплових двигунів

кандидат технічних наук, доцент
Мошенцев Юрій Леонідович
Національний університет кораблебудування
ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв, професор
кафедри двигунів внутрішнього згоряння

Захист відбудеться "26" червня 2008 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.13 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: м. Харків, вул. Фрунзе, 21. Кафедра “Двигуни внутрішнього згоряння”, ауд. 11.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий "25" травня 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Триньов О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Широке поширення двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) сприяло загостренню ряду проблем, які стосуються виснаження нафтових родовищ, забруднення атмосфери шкідливими викидами відпрацьованих газів (ВГ). Тому у світовому двигунобудуванні особливу актуальність набули проблеми, пов'язані з поліпшенням паливної економічності ДВЗ, зниженням токсичності відпрацьованих газів, зменшенням витрат при виробництві та експлуатації ДВЗ.

Відомо, що робота транспортного двигуна характеризується великою кількістю перехідних і часткових режимів. При цьому для ДВЗ із вільним турбокомпресором характеристики поршневого двигуна і лопаткових машин погоджені у вузькому діапазоні розрахункових режимів (наприклад, номінальної потужності або максимального крутного моменту), частка яких в експлуатації не перевищує 15%. Зміна режиму роботи двигуна приводить до неузгодженості характеристик поршневого ДВЗ і вільного турбокомпресора (ТКР), що спричиняє погіршення показників токсичності, зниження економічності та приємності силової установки.

Теорія і практика світового двигунобудування свідчать про те, що регулювання поршневої частини і системи турбонаддуву дозволяє значно поліпшити техніко-економічні характеристики ДВЗ у всьому діапазоні експлуатаційних режимів його роботи. Провідні двигунобудівні фірми для вирішення цієї проблеми впроваджують соплове регулювання турбін системи турбонаддуву, що при всій своїй привабливості відзначається великою складністю конструкції регульованого соплового апарата, високою вартістю та малою надійністю.

Тому актуальними є наукові дослідження, спрямовані на підвищення техніко – економічних показників транспортного дизеля шляхом регулювання турбонаддуву при використанні агрегатів газотурбінного наддуву (ГТН) істотно меншої вартості і більш високої надійності в порівнянні з сопловим регулюванням. Розв'язанню даної проблеми присвячена дисертаційна робота.

Зв'язок з науковими програмами, темами. Робота виконана на кафедрі ДВЗ НТУ “ХПІ” згідно з бюджетною темою МОН України “Фундаментальні дослідження фізико-хімічних характеристик процесу згоряння з метою комплексного поліпшення показників паливної економічності і токсичності відпрацьованих газів автотракторних двигунів” (ДР № 0106U001476), де здобувач був відповідальним виконавцем окремих етапів та договорів про науково-технічне співробітництво між НТУ “ХПІ” і ТОВ “Турбо - Веста” (м. Харків) та КП “ХКБД” (м. Харків).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка способу, перспективних конструкцій і рекомендацій із впровадження регульованої системи турбонаддуву автотракторного дизеля для поліпшення його техніко – економічних показників. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні основні завдання:

- Проведення аналізу існуючих систем регулювання турбонаддуву ДВЗ.

- Розробка ефективного методу і відповідної конструкції макетного зразка регульованого ТКР системи турбонаддуву, що відрізняється простотою, надійністю конструкції і широким діапазоном регулювання параметрів.
- Уточнення математичної моделі замкнутого робочого циклу двигуна із системою газотурбінного наддуву з урахуванням регулювання турбіни.
- Проведення розрахункових досліджень для оцінки впливу різних методів регулювання турбонаддуву на показники робочого процесу дизеля.
- Проведення моторних випробувань автотракторного дизеля 4ЧН 12/14 з серійним і макетним зразком регульованого ТКР для оцінки впливу регулювання на показники двигуна при роботі за Європейським циклом ESC.
- Розробка конструкції та рекомендацій із впровадження на автотракторних ДВЗ дослідного зразка ТКР з регулюванням шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни ТКР з безлопатковим направляючим апаратом.
- Проведення моторних випробувань автотракторного дизеля 4ЧН 12/14 з серійним і дослідним зразком регульованого ТКР для оцінки впливу регулювання на показники двигуна при роботі за зовнішньою характеристикою.
- Отримання статичних характеристик турбіни дослідного зразка регульованого ТКР.

Об'єкт дослідження – газодинамічні процеси в циліндрі дизеля і проточних частинах ТКР при регулюванні турбонаддуву.

Предмет дослідження – вплив регулювання турбонаддуву на робочий процес дизеля і його токсичність при роботі за зовнішніми та навантажувальними характеристиками, зміна характеристик лопаткових машин при регулюванні турбіни ТКР.

Методи дослідження – всі теоретичні положення дисертаційної роботи базуються на фундаментальній теорії теплових двигунів та газової динаміки; для проведення розрахункових досліджень використовувався метод математичного моделювання характеристик поршневого ДВЗ і турбокомпресора; для моторних випробувань автотракторного дизеля - методи визначення вихідних показників дизеля; оцінка впливу регулювання турбонаддуву на індикаторні показники дизеля проводилась за допомогою методу аналізу індикаторних діаграм.

Наукову новизну одержаних результатів складають:

1. Розроблений новий метод регулювання турбонаддуву шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни ТКР з безлопатковим направляючим апаратом.
2. Вперше одержані результати розрахунково-експериментального дослідження щодо порівняння ефективності традиційного (соплового) і запропоно-

ваного методу регулювання та їх впливу на техніко – економічні показники автотракторного дизеля.

3. Уточнена математична модель розрахунку робочого процесу комбінованого двигуна з урахуванням регулювання турбонаддуву шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни ТКР з безлопатковим направляючим апаратом.

Практичне значення одержаних результатів для двигунобудування:

1. Запропоновано перспективні конструкції макетного та дослідного зразків турбокомпресора з регулюванням шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни з БНА, які дозволяють суттєво підвищити техніко – економічні показники автотракторного двигуна;
2. Результати дослідження впливу регулювання на показники дизеля типу 4 ЧН 12/14 при роботі за Європейським циклом ESC та за зовнішньою характеристикою дають можливість оцінити вплив нового методу регулювання турбонаддуву на показники економічності, токсичності, приємності дизеля, визначити оптимальні настройки регульованого ТКР.
3. При проектуванні нових конструкцій регульованих турбін можуть бути використані характеристики дослідного зразка регульованого турбокомпресора, виконаного на базі серійного ТКР – 7ТВ-03; характеристики представлені в графічному вигляді.
4. Для дизеля типу 4 ЧН 12/14 одержано емпіричне рівняння, що зв'язує димність відпрацьованих газів не лише з коефіцієнтом надлишку повітря α , але й з частотою обертання двигуна n .

Результати наукового дослідження впроваджені і використовуються ТОВ “Турбо - Веста” (м. Харків), КП “ХКБД” (м. Харків), проблемною науково-дослідною лабораторією кафедри двигунів внутрішнього згоряння НТУ “ХПІ”, а також у навчальному процесі при підготовці студентів спеціальності 090210 - двигуни внутрішнього згоряння в НТУ “ХПІ”.

Особистий внесок здобувача. При виконанні дисертаційного дослідження здобувач брав участь у розробці макетного та дослідного зразків регульованих ТКР із БНА, розрахункових дослідженнях з вивчення впливу соплового регулювання та регулювання в ТКР із БНА на показники робочого процесу дизеля, розробці програми та проведенні експериментальних досліджень рядного дизеля 4 ЧН12/14, розробці конструкторської документації на промисловий зразок регульованого турбокомпресора, розробці рекомендацій із впровадження запропонованого способу регулювання ТКР на автотракторних ДВЗ. При цьому здобувачем особисто:

1. Розроблено ескізи креслень для виготовлення макетних і промислових зразків регульованих ТКР.
2. Виконано аналіз результатів розрахункових досліджень щодо впливу соплового регулювання і регулювання турбонаддуву шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни ТКР з БНА на показники дизеля 4 ЧН12/14 при його роботі за зовнішньою швидкісною характеристикою.
3. Проведено порівняльний аналіз показників екологічності та економічності дизеля 4 ЧН 12/14 при його роботі за циклом ESC з макетним зразком регульованого ТКР і серійним турбокомпресором.

4. Отримано уточнену залежність між коефіцієнтом надлишку повітря α і димністю відпрацьованих газів досліджуваного дизеля з урахуванням частоти обертання колінчатого вала ДВЗ.
5. Проведено експериментальне дослідження дослідного зразка регульованого ТКР при роботі дизеля 4ЧН 12/14 за зовнішньою характеристикою.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідалися на IX та X Міжнародних конгресах двигунобудівників (м. Рибаче, Крим, 2004 - 2005р.р.), на щорічних Міжнародних науково-технічних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків), на науково-технічній конференції Харківської державної академії залізничного транспорту (м. Харків, 2002 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 8 робіт, серед них 5 - у фахових виданнях ВАК України, 1 патент України, 1 патент РФ, 1 міжнародна заявка РСТ.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, додатків. Повний обсяг дисертації складає 166 сторінок, серед яких 28 ілюстрацій за текстом, 19 ілюстрацій на 19 сторінках, 13 таблиць по тексту, 2 додатки на 14 сторінках, 101 найменувань використаних літературних джерел на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дослідження, розглянутий стан проблеми, сформульовані мета і основні завдання дослідження, надана інформація про наукову новизну і практичне значення роботи, визначений особистий внесок здобувача в отриманні результати.

У першому розділі проведений аналіз стану проблеми підвищення техніко-економічних показників транспортного дизеля шляхом регулювання турбонаддуву. Сформульована мета і задачі дослідження.

В результаті аналізу шляхів поліпшення показників робочого процесу транспортного дизеля встановлено, що для досягнення сучасних норм по токсичності відпрацьованих газів Euro IV - V необхідно застосовувати погоджене регулювання як системи паливоподачі, так і системи повітропостачання.

Розглянуто основні методи регулювання систем паливоподачі. На підставі аналізу даних технічної літератури показано, що найпоширенішими методами регулювання паливоподачі є керування параметрами упорскування палива: тиском, тривалістю, кутом випередження упорскування. Це дозволяє поліпшити токсичність і економічність дизеля, покращити показники на часткових режимах. Регулювання повітропостачання в першу чергу пов'язано з комплексом заходів щодо поліпшення якості перехідних процесів комбінованого дизеля, а також поліпшення параметрів дизеля на режимах, близьких до зовнішньої характеристики.

Виконано класифікацію методів повітряного постачання двигунів, у якій можна виділити альтернативні методи, кількісне і якісне регулювання ТКР. На підставі розгляду публікацій і розширеного патентного пошуку, що охоплює період з 1980 р. і по теперішній час, визначені основні тенденції в розвитку си-

стем регулювання турбонаддуву. Показано, що в Україні цю наукову проблему досліджували в ГСКБД, ДП “Завод ім. Малишева”, на кафедрі ДВЗ НТУ “ХПІ” і кафедрі теплотехніки та теплових двигунів УДАЗТ, зокрема проф. Сімсон А.Е., Шокотов М.К., Марченко А.П., Єроценков С.А., доц. Петросянц В.А, Губін А.І, Нікітін О.В. та ін.

Відзначено, що найбільш ефективними вважаються методи внутрішнього регулювання турбіни, серед яких соплове регулювання є найпоширенішим (47% серед всіх досліджених патентів).

Головний недолік соплового регулювання - висока вартість ТКР, що обумовлена конструктивною складністю механізму повороту лопаток соплового апарата, яка приводить до подорожчання агрегату наддуву в 2 - 2,5 рази у порівнянні з нерегульованим ТКР. У зв'язку з цим, зроблено висновок щодо актуальності розробки нового методу регулювання турбіни ТКР, який би характеризувався дешевизною, простотою, надійністю, високим ККД у всьому діапазоні регулювання і оптимальним рівнем коефіцієнту надлишку повітря (α) на всіх режимах роботи двигуна.

Зазначеним вимогам може задовольняти система регулювання турбонаддуву, заснована на регулюванні площі перетину кінця розгінної ділянки БНА турбіни.

Відповідно до проведеного аналізу і висновків, зроблених на його основі, визначені мета і завдання дослідження.

У другому розділі наведена методика розрахунково – експериментального дослідження автотракторного дизеля з системою регульованого турбонаддуву.

Метод регулювання доцентрової турбіни шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни ТКР з безлопатковим направляючим апаратом розроблений на кафедрі ДВЗ НТУ “ХПІ” у тісній співпраці з ТОВ “Турбо - Веста”. Конструкції та геометричні параметри макетних зразків регульованих ТКР, що реалізують новий метод, наведені на рис.1 та табл.1. На рис.1 положення I профільованого елемента відповідає мінімальному значенню площини кінця розгінної ділянки БНА (F_{min}), положення II- максимальній (F_{max}).

В наведеній конструкції за рахунок спеціальної геометрії профільованого елемента і його розташування у корпусі турбіни були досягнуті високі газодинамічні показники. Надійність конструкції забезпечувалась за рахунок наявності отворів, що розвантажують і компенсують перепад тисків на поверхні регульовального диску.

Для проведення розрахункового дослідження та оцінки впливу різних методів регулювання турбіни ТКР використовувалась уточнена математична модель розрахунку характеристик двигуна з системою регульованого турбонаддуву. Модель була розроблена на кафедрі теплотехніки та теплових двигунів Української державної академії залізничного транспорту і представлена у роботах д.т.н. Єроценкова С.А., к.т.н. Петросянца В.А, к.т.н. Счастлиого Є.Є. Її блок-схема показана на рис.2.

Таблиця 1-

Геометричні параметри корпусу регульованої турбіни ТКР - 7Н

№	Найменування конструктивних параметрів	Позн.	Одиниці виміру	Числові значення
1	Площа перетину равлика на вході	F_0	кв. мм	2456
2	Площа розгінного конфузора при: $L_r = 107$ $L_r = 90$ $L_r = 67$	F_c	кв. мм	1142 1185 1344
3	Довжина розгінного конфузора для різних положень елемента регулювання	L_r	мм	107 90 67
4	Радіус центра перетину розгінного конфузора при різних положеннях елемента регулювання	R_D	мм	63,239 63,5 69,76

Основний функціонал моделі

$$Z = f(X, Y, U), \quad (1)$$

де $Z (Z_1, Z_2 \dots Z_n)$ - вектор вихідних параметрів, $X (X_1, X_2, \dots X_n)$ - вектор геометричних розмірів, $Y (Y_1, Y_2 \dots Y_n)$ – вектор фізичних констант, $U (U_1, U_2 \dots U_n)$ – вектор вхідних параметрів, що задають режим роботи.

Уточнення моделі пов'язане із введенням в математичну модель турбіни змінного вектора $\overline{X}'_T$ - вектора параметрів, що змінюються в процесі регулювання.

У результаті основні функціонали, що задають розхідну характеристику і характеристику ККД турбіни стали функцією 3-х змінних:

$$\overline{G}_T = f(\pi_T^*, \overline{\omega}_T, \overline{X}'_T), \quad \eta_T = f(\pi_T^*, u/c, \overline{X}'_T), \quad \overline{X}'_T = \{F_c, r_u\}, \quad (2)$$

де F_c – площа перетину кінця розгінної ділянки БНА,

r_u – радіус центра ваги перетину.

Основні функціонали, що задають характеристику компресора:

$$G_K = f(\pi_K, \overline{\omega}_T), \quad \eta_T = f(\overline{G}_K, \overline{\omega}_K), \quad P = f(\overline{G}_K, \pi_K), \quad (3)$$

де P – лінія помпажа компресора.

Умовою збіжності загальної моделі КДВЗ є рівність потужності та обертів турбіни і компресора ТКР.

Опираючись на основні рівняння математичної моделі турбіни показано, що регулювання турбіни шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки БНА і, відповідно, центра ваги цього перетину, призводить до зміни характеристик потоку на виході з розгінної ділянки БНА: змінюються параметри газу (тиск,

швидкість, температура, щільність), а також коефіцієнт швидкості, коефіцієнт втрат, кут виходу потоку з направляючого апарату. Надалі відбувається перерозподіл у трикутнику швидкостей як на вході до робочого колеса, так і на виході з нього. За рахунок зміни швидкості потоку, змінюється також і структура втрат у робочому колесі доцентрової турбіни. Все це призводить до зміни характеристик лопаткової машини в процесі регулювання.

Після уточнення математичної моделі стала можливою реалізація однієї із основних задач дисертаційного дослідження - оцінити вплив регулювання турбіни ТКР на показники робочого процесу автотракторного дизеля. Наведено методику розрахункового дослідження дизеля і ТКР із традиційним (сопловим) регулюванням та регулюванням шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни з БНА.

Досліджувані режими:

- режим номінальної потужності $N_e = 117,7$ кВт, $n = 2000$ хв⁻¹ і $M_{кр} = 562$ Н·м ;
- режим максимального крутного моменту $N_e = 106,6$ кВт, $n = 1500$ хв⁻¹ і $M_{кр} = 680$ Н·м;
- швидкісний режим $N_e = 55$ кВт, $n = 1000$ хв⁻¹ і $M_{кр} = 562,2$ Н·м .

Моделювання виконувалось на дизелі типу 4ЧН 12/14, який був укомплектований (в залежності від методу регулювання) серійним турбокомпресором ТКР -7/8ТВ (сопловий апарат з ефективним прохідним перетином $f_{ca} = 796$ мм²) і серійним турбокомпресором ТКР -7,5 ТВ - 02 із БНА та ефективним перетином кінця розгінної ділянки БНА $F_c = 1055$ мм². При цьому змінювались такі параметри. Соплове регулювання - площа прохідного перетину соплового апарату f_c : 876 мм², 796 мм², 714 мм², 631 мм², 547 мм², і 463 мм². Регулювання БНА - площа перетину кінця розгінної ділянки БНА F_c : 1055 мм², 910 мм², 800 мм², 745 мм² і 600 мм².

Для кожного із прохідних перетинів виконувалися три розрахунки, що відповідають зазначеним вище режимам роботи дизеля. При подальшому аналізі, вибиралися ті значення F_c , при яких досягається мінімальна витрата палива (g_e) і найбільш придатний, з погляду зниження димності відпрацьованих газів, коефіцієнт надлишку повітря α . Моделювання здійснювалося при накладених обмеженнях по максимальному тиску згоряння, температурі випускних газів перед турбіною, максимальній частоті обертання ротора ТКР, безпомпажній роботі компресора.

Для проведення експериментального дослідження макетного і дослідного зразка регульованого ТКР на кафедрі ДВЗ на базі дизеля 4ЧН 12/14 (СМД-23) був обладнаний стенд, який дає можливість одержувати основні показники двигуна і ТКР, проводити індиціювання і газовий аналіз. Для одержання усередненої індикаторної діаграми та інших індикаторних показників на досліджуваному режимі роботи двигуна на кафедрі ДВЗ к.т.н. Прохоренко А.О., асп. Мешковим Д.В. було розроблено програмне забезпечення, що дозволяє обробляти сигнали з датчиків тиску, ВМТ і кута повороту колінчастого валу.

Безмоторні випробування дослідного зразка регульованого ТКР проводилися на стенді Дергачівського заводу турбокомпресорів, а також на Алтайсько-

му моторному заводі (Росія, м. Барнаул) і ВО “КАМАЗ” (Росія, м. Набережні Челни).

За результатами експериментального дослідження виконано:

1. Дослідження впливу регулювання турбонаддуву на показники дизеля.
2. Порівняльний аналіз ефективності застосування регулювання турбонаддуву шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни ТКР з безлопатковим направляючим апаратом.
3. Накопичена база даних для розробки рекомендацій з використання нового методу регулювання турбонаддуву.

При обробці даних експериментальних досліджень дизеля 4ЧН 12/14 (СМД- 23) здобувачем було отримане рівняння поліноми 3-го ступеня, що зв'язує димність із коефіцієнтом надлишку повітря α і частотою обертання n . Рівняння призначене для визначення димності ВГ і має вигляд:

$$N = 998,2 - 347,5 \cdot \alpha - 1,16 \cdot n + 56,23 \cdot \alpha^2 + 1,776 \cdot 10^{-1} \cdot \alpha \cdot n + 5,653 \cdot 10^{-4} \cdot n - 5,462 \cdot \alpha^3 + 1,157 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha^2 \cdot n - 5,17 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha \cdot n^2 - 8,889 \cdot 10^{-8} \cdot n^3, \quad (4)$$

У третьому розділі приведено розрахункове моделювання спільної роботи двигуна і регульованого ТКР.

За результатами розрахункового дослідження, проведеного відповідно до методики, описаної в другому розділі, здобувачем були отримані раціональні закони керування елементом регулювання і лопатками соплового апарату, при яких забезпечувалася мінімальна питома ефективна витрата палива g_e і припустимий, з точки зору димності ВГ, коефіцієнт надлишку повітря α на всіх режимах зовнішньої характеристики. Залежності, що описують рівняння і кут нахилу прямих, наведені на рис. 3.

Із графіка видно, що залежність перетину кінця розгінної ділянки БНА і сумарного перетину соплового апарату турбіни від обертів дизеля описується прямою з різним кутом нахилу. Виходячи із цього, було зроблено наступні висновки:

1. Кут нахилу прямої при сопловому регулюванні у порівнянні з регулюванням БНА менше, а тому перехід при регулюванні, наприклад, з 1800 до 1400 хв^{-1} , буде супроводжуватися меншою зміною, у порівнянні із БНА, сумарного перетину соплового апарату. Отже, соплове регулювання більш ефективно в порівнянні з регулюванням БНА за рахунок зміни площі кінця розгінної ділянки.

2. Ефективність регулювання турбіни ТКР з БНА незначно уступає сопловому, оскільки різниця між кутами невелика й становить 5 градусів.

В розділі з використанням зазначеного алгоритму регулювання, були отримані розрахункові параметри робочого процесу дизеля із серійним ТКР і сопловим регулюванням, а також серійним ТКР із БНА і безсопловим регулюванням. Це дозволило оцінити вплив зазначених методів регулювання турбонаддуву на показники робочого процесу дизеля. Обидва методи регулювання мають схожий характер впливу на робочий процес дизеля. Графік залеж-

ностей основних показників дизеля з серійним ТКР та регульованим ТКР з БНА наведений на рис. 4.

З рисунка видно: регулювання дозволяє покращити практично всі показники робочого процесу дизеля. Більше того, за рахунок одержаних порівняльно високих значень α в області низьких частот можливо, шляхом збільшення потужності ДВЗ, наблизитись до вирішення задачі створення двигуна постійної потужності.

Найбільш наглядним з погляду зміни параметрів дизеля при регулюванні є режим з $n = 1000 \text{ хв}^{-1}$. При регулюванні турбонаддуву шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни ТКР з БНА за рахунок збільшення коефіцієнту надлишку повітря α , економічність двигуна покращилася на 17 г/кВт·год (при сопловому регулюванні - на 27 г/кВт·год), температура ВГ знизилася на 100°C (при сопловому регулюванні - на 110°C). Крім того, індикаторний ККД при цьому збільшився на 2,8 % проти 4 % у випадку соплового регулювання. Відзначено, що різниця в зміні питомої ефективної витрати палива та інших параметрів робочого процесу при використанні соплового або безсоплового методів регулювання може бути пояснена тим, що ККД у серійної турбіни із БНА і турбокомпресора, в цілому, вище, ніж у турбіни із сопловим апаратом. Із цього зроблений висновок про те, що серійна турбіна із БНА спроектована таким чином, що вона має більш високий ККД у зоні спільної роботи двигуна і ТКР при малих частотах обертання вала.

Також на розглянутому режимі роботи регульованого ТКР із БНА була відзначена характерна тенденція в зміні основних параметрів турбіни і дизеля в процесі регулювання. Так, зменшення перетину від серійного $F_c = 1055$ до 600 мм^2 приводить до того, що внутрішній ККД турбіни падає. Це пояснюється зміною кута атаки, перерозподілом втрат у проточних частинах турбіни. Однак, ефективний ККД при цьому збільшується (з 47 до 49,6%), оскільки частка механічних втрат, привнесена в ефективний ККД при збільшенні обертів ротора турбокомпресора (на 32 тис. хв^{-1}) падає. При цьому на двигуні має місце ефект у вигляді більших α і менших g_e .

Виходячи з аналізу зміщення характеристик регульованої турбіни відзначено, що описаний механізм впливу регулювання шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни з БНА підтверджується і безмоторними випробуваннями ТКР.

У четвертому розділі описане експериментальне дослідження дизеля 4ЧН 12/14 з регулюванням турбонаддуву запропонованим автором методом – шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни ТКР з безлопатковим направляючим апаратом.

У таблиці 2 наведені результати експериментального дослідження дизеля, що працює за 13-ти режимним Європейським циклом ESC з серійним і макетним зразком регульованого ТКР. При цьому порівнювалися показники дизеля, який укомплектований серійним ТКР і регульованим, що має різні настройки: на мінімальні g_e та мінімальні викиди з відпрацьованими газами NO_x і CO . З урахуванням коефіцієнтів значимості були розраховані питомі показники для кожного із варіантів ТКР. Із представлених даних видно, що регулювання, в

залежності від настроювання ТКР, впливає на середньоексплуатаційні витрати палива, вміст CO , димність, а отже викиди нерозчинних твердих часток і при цьому практично не змінюється емісія NO_x . На підставі цього зроблено висновок про те, що для зниження емісії NO_x необхідно застосовувати інший комплекс заходів. Грунтуючись на комплексному критерії паливної економічності та токсичності ВГ дизеля, розробленому проф. Парсадановим І.В., показано, що оптимальним є настроювання регульованого ТКР, при якому забезпечуються мінімальні викиди твердих часток.

Відзначено, що на підставі випробувань за циклом ESC вдалося зробити оцінку впливу регулювання ТКР з БНА на показники робочого процесу дизеля.

Таблиця 2-

**Результати експериментального дослідження дизеля
при роботі за циклом ESC**

Тип ТКР	$g_{e \text{ сер. експ}}$ г/кВт·год	G_{NO_x} г/кВт·год	G_{CO} г/кВт·год	$G_{TЧнр}$ г/кВт·год
<i>Серійний</i>	233	12,22	4,74	0,52
<i>Регульований ($NO_x \text{ min}$)</i>	231,8	12,07	4,51	0,46
<i>Регульований ($g_e \text{ min}$)</i>	230	12,28	4,34	0,44
<i>Регульований ($CO, W_{TЧнр} \text{ min}$)</i>	231,7	12,41	4,26	0,42

Як приклад, на рис. 6 показана зміна основних показників дизеля залежно від F_c . Відмінною рисою даного режиму є зворотна кореляція між емісією NO_x і димністю, механізми якої описувалися в дисертаційних та інших наукових працях кафедри (зокрема, в дис. к.т.н. Прохоренка А. О.) Відповідно до рис. 6, зменшення перетину БНА дозволяє поліпшити практично всі показники робочого процесу дизеля. Так, витрата палива зменшилась на 4,5 г/кВт·год, α виріс з 1,26 до 1,38, індикаторний ККД при цьому збільшився на 3,5%.

З урахуванням результатів розрахункових досліджень, опираючись на алгоритм регулювання, представлений у розділі 3, а також експериментальних даних, отриманих при випробуваннях макетного зразка регульованого ТКР на кафедрі ДВЗ НТУ “ХПІ” разом із спеціалістами ТОВ “Турбо - Веста” була розроблена конструкція дослідного зразка регульованого ТКР з запропонованим методом регулювання. Фотографія цього ТКР представлена на рис.7. Регульований ТКР створений на базі серійного ТКР 7 ТВ-03. У даній конструкції положення елемента регулювання задається за рахунок переміщення штока клапана, положення якого змінюється в залежності від тиску наддувочного повітря. Результати безмоторних випробувань у вигляді приведених витрат газу від ступеня стиснення турбіни π_T наведено на рис.8. Залежність ефективного ККД турбіни від відношення u/c показано на рис.9. Видно, що зменшення площі пере-

тину кінця розгінної ділянки БНА дозволяє досягти більших значень π_T . При цьому максимальний ККД при одній і тій же приведеній швидкості зміщується у бік менших u/c .

Наведено результати моторних випробувань дослідного зразка регульованого ТКР на автотракторному дизелі при його роботі за зовнішньою характеристикою. Регулювання турбіни проводилось в діапазоні частот обертання колінчастого вала від 1800 хв^{-1} і нижче. Встановлено, що регулювання з настроюванням регульованого ТКР на досягнення постійного крутного моменту ($M_{кр} = \text{const}$) дозволило не лише покращити економічності дизеля, а й отримати полку постійного крутного моменту $M_{кр} = 674 \text{ Н}\cdot\text{м}$ в діапазоні частот обертання колінчастого вала від 1250 до 1500 хв^{-1} . Графік зміни показників дизеля СМД-23 з зазначеним настроюванням регульованого ТКР приведений на рис.10.

Рекомендації, наведені в розділі, включають опис конструкції дослідного зразка регульованого ТКР, патенти України, РФ, а також Міжнародну заявку РСТ.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні поставлена і вирішена актуальна науково - технічна задача щодо поліпшення техніко-економічних показників автотракторного дизеля шляхом регулювання турбонаддуву. Вирішення задачі забезпечено розробкою нового методу регулювання ТКР з БНА та розробкою конструкції турбокомпресора, в якому забезпечена реалізація запропонованого методу регулювання. Для цього проведено розрахункові та експериментальні дослідження з регульованим і нерегульованим ТКР, розроблено рекомендації із застосування нового методу регулювання у двигунобудуванні. У дисертаційному дослідженні отримані такі результати:

1. За результатами аналізу існуючих систем регулювання турбонаддуву зроблено висновок щодо актуальності розробки нового методу регулювання турбіни ТКР, який би характеризувався дешевизною, простотою, надійністю, високим ККД у всьому діапазоні регулювання і оптимальним рівнем α на всіх режимах роботи двигуна.

2. Розроблено метод регулювання турбонаддуву і відповідну йому конструкцію макетного зразка ТКР з регулюванням шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни з БНА, що дозволяє значно покращити техніко – економічні показники автотракторного дизеля.

3. За допомогою уточненої математичної моделі розрахунку характеристик турбіни виконано розрахункове моделювання спільної роботи дизеля за зовнішньою характеристикою з серійним ТКР, а також ТКР з сопловим регулюванням і регулюванням БНА. Встановлено, що алгоритм регулювання турбіни з сопловими лопатками і за рахунок зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни з БНА описується прямою залежністю, однак кут нахилу прямої у ТКР з сопловим регулюванням на 5 градусів менше (30 град), що свідчить про незначну перевагу соплового регулювання в порівнянні з регулюванням БНА.

4. Отримано емпіричну залежність, яка дозволяє для автотракторного дизеля типу 4ЧН 12/14 знаходити димність ВГ за заданими значеннями коефіцієнта надлишку повітря α і частотою обертання колінчастого вала двигуна n .

5. Проведено моторні випробування автотракторного дизеля 4ЧН12/14 з серійним і макетним зразком регульованого ТКР. Установлено особливості протікання робочого процесу дизеля при роботі за Європейським циклом ESC.

6. Регулювання турбонаддуву шляхом зміни площі кінця розгінної ділянки турбіни з БНА позитивно впливає на середньоексплуатаційні витрати палива, вміст CO , димність (викиди нерозчинних твердих часток) ВГ. За результатами розрахунку по комплексному критерію паливної економічності і токсичності ВГ дизеля показано, що оптимальним є настроювання регульованого ТКР з БНА на мінімальні викиди CO і твердих часток.

7. Запропонована перспективна конструкція і рекомендації по впровадженню дослідного зразка регульованого ТКР з БНА та зроблена оцінка щодо ефективності її застосування на автотракторному дизелі 4ЧН12/14. Виявлено, що при роботі двигуна за зовнішньою характеристикою регулювання з глибиною 30% дозволить поліпшити економічність ДВЗ, збільшити коефіцієнт пристосованості дизеля на 9,7 % і досягти постійного крутного моменту в діапазоні частот обертання колінчастого вала від 1250 до 1500 хв^{-1} .

8. Отримано статичні характеристики турбіни дослідного зразка регульованого ТКР, виконаного на базі серійного ТКР – 7ТВ-03. Встановлено, що зменшення площі перетину кінця розгінної ділянки БНА дозволяє досягти більших значень π_T . При цьому максимальний ККД при одній і тій же приведеній швидкості зміщується у бік менших u/c .

9. Результати наукового дослідження впроваджені та використовуються в ТОВ “Турбо - Веста” (м. Харків), КП “ХКБД” (м. Харків), проблемною науково-дослідною лабораторією кафедри двигунів внутрішнього згоряння НТУ „ХПІ”, а також у навчальному процесі при підготовці студентів спеціальності 090210 - двигуни внутрішнього згоряння в НТУ „ХПІ”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Марченко А.П., Самойленко Д.Е., Петросянц В.А. Оценка эффективности применения соплового регулирования для наддува 4-х цилиндрового автотракторного дизеля // Вестник науки и техники. – Харьков: ООО “ХДНТ”. – 2004. – Вып. 1(16). – С.42 – 51. Здобувачем виконана оцінка ефективності застосування соплового регулювання для наддуву чотирьохциліндрового автотракторного дизеля.

2. Марченко А.П., Петросянц В. А., Самойленко Д.Е., Минак А.Ф., Обозный С.В. Улучшение технико – экономических показателей транспортного дизеля путем регулирования турбокомпрессора с безлопаточным направляющим аппаратом // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2004. – № 1. – С. 3-6. Здобувачем запропонована залежність перетину кінця розгінної ділянки БНА равлика турбіни від режиму роботи 6-ти циліндрового дизеля ти-

пу СМД - 60, при якій би забезпечувалися найкращі показники економічності та токсичності.

3. Марченко А.П., Парсаданов И.В., Самойленко Д.Е., Петросянц В.А., Михайлик В.Н. Выбор закона регулирования турбины автотранспортного дизеля// Авиационно – космическая техника и технология . –Харьков: Нац. аэрокосмич. ун-т “ХАИ”. – 2005. – Вып.18. – С.54 –57. Здобувачем отримані результати дослідження впливу регулювання турбокомпресора з безлопатковим спрямовуючим апаратом на техніко- економічні показники 6-ти циліндрового дизеля типу СМД - 60 з напівімпульсною системою наддуву.

4. Марченко А.П., Петросянц В.А., Самойленко Д.Е. Влияние регулирования в турбокомпрессоре с безлопаточным направляющим апаратом на показатели дизеля 4ЧН 12/14 // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2005. – № 1. – С. 35-40. Здобувачем проведена оцінка можливості виконання дизелем 4ЧН 12/14 з регульованим ТКР норм по димності, передбачених правилами ЄЕК ООН №24.

5. Марченко А.П., Прохоренко А.А., Самойленко Д.Е., Мешков Д.В. Универсальный автоматизированный стенд для испытаний ДВС // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ” – 2006. – №26. – С. 119 – 126. Здобувачем розглянута структура, елементи схеми стенда, а також програмне забезпечення Diesel Analyse, яке застосоване здобувачем у процесі обробки індикаторних діаграм.

6. Патент України 79451, МПК F01D 17/14, F 04D 27/00. Спосіб регулювання доцентрової турбіни з безлопатковим направляючим апаратом / Петросянц В.А., Карнаухов Ю.Й., Марченко А.П., Самойленко Д.Є. – № 20040907860; Заявл. 27.09.2004; Опубл. 15.12.2006, Бюл. № 9. – 4 с.:ил. Здобувачем запропоновано характер руху профільованого елемента.

7. Патент РФ 2298652 С2, МКИ F01D 17/14, F 04D 27/00. Способ регулирования центростремительной турбины с безлопаточным направляющим апаратом/ Петросянц В.А., Карнаухов Ю.И., Марченко А.П., Самойленко Д.Е. – № 2004130568; Заявл. 10.04.2006; Опубл. 10.05.2007. – Бюл. №13. – 4 с.:ил. Здобувачем проведено експериментальні випробування регульованого ТКР.

8. Международная заявка РСТ WO 2006/036134 A1, МКИ F01D 17/14, F 04D 27/00. Способ регулирования центростремительной турбины с безлопаточным направляющим апаратом/ Петросянц В.А., Карнаухов Ю.И., Марченко А.П., Самойленко Д.Е. – № РСТ/UA 2005/000038; Заявл.21.09.2005; Опубл. 6.04.2006. –14 с.:ил. Здобувачем декларований новий спосіб регулювання доцентрової турбіни.

АНОТАЦІЇ

Самойленко Д.Є. Поліпшення техніко - економічних показників автотракторного дизеля шляхом регулювання турбонаддуву. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2008.

Дисертація присвячена розробці ефективного методу, можливих конструкцій і рекомендацій із впровадження регульованої системи турбонаддуву автотракторного дизеля.

Розроблено макетний і дослідний зразки регульованого ТКР з БНА. Проведені розрахункові дослідження для оцінки впливу різних методів регулювання ТКР на показники робочого процесу дизеля. Проведено експериментальні дослідження автотракторного дизеля 4 ЧН 12/14 з макетним зразком регульованого ТКР з БНА, за результатами яких зроблені висновки про вплив регулювання на показники двигуна в широкому діапазоні режимів роботи, у тому числі за циклом ESC. Відзначено, що оптимальним настроюванням регульованого ТКР з БНА є настроювання, при якому забезпечуються мінімальні викиди *CO* і твердих часток.

У роботі представлені рекомендації із впровадження дослідного зразка ТКР з регульованим БНА на автотракторному дизелі.

Ключові слова: дизель, метод регулювання турбіни турбокомпресора, токсичність, паливна економічність.

Самойленко Д.Е. Улучшение технико – экономических показателей автотракторного дизеля путем регулирования турбонаддува. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2008.

Диссертация посвящена разработке эффективного метода, возможных конструкций и рекомендаций по внедрению регулируемой системы турбонаддува автотракторного дизеля.

Разработаны макетный и опытный образец регулируемого ТКР с БНА. Проведены расчетные исследования для оценки влияния различных методов регулирования ТКР на показатели рабочего процесса дизеля. Проведены экспериментальные исследования автотракторного дизеля 4 ЧН 12/14, оснащенного макетным образцом регулируемого ТКР с БНА, по результатам которых сделаны выводы о влиянии регулирования на показатели двигателя в широком диапазоне режимов работы, в том числе по циклу ESC. Рассмотрены различные варианты настройки регулируемого ТКР с БНА, при которой обеспечиваются минимальная токсичность и экономичность.

В работе представлены рекомендации по внедрению опытного образца ТКР с регулируемым БНА на автотракторном ДВС.

Основные тенденции в развитии систем регулирования ТКР были сформулированы на базе расширенного патентного поиска с использованием полного доступа к международной базе патентов, а также с учетом Мирового опыта по созданию систем регулируемого турбонаддува.

Для реализации нового метода регулирования турбины были разработаны макетные образцы регулируемых ТКР с БНА для наддува рядных и V-образных ДВС. Макетные образцы были выполнены на базе серийных ТКР- 7Н-1 и ТКР 8,5ТВ – 03. Глубина регулирования в них составляла 17 и 30% соответственно. Расчетные исследования по оценке влияния регулирования ТКР на основные показатели дизеля 4ЧН 12/14 проводились с использованием уточненной математической модели расчета характеристик комбинированного двигателя. Уточнения заключались введением в математическую модель турбины вектора изменяющихся в процессе регулирования геометрических параметров турбины ТКР. В расчетном исследовании моделировались характеристики дизеля с различными турбокомпрессорами: серийным, ТКР с сопловым регулированием наддува и регулируемым ТКР с БНА.

Для проведения экспериментальных исследований на двигателе с макетным и промышленным образцами регулируемых ТКР был оборудован стенд, позволяющий получать основные показатели двигателя и ТКР, проводить индицирование и газовый анализ. В ходе моторных испытаний определялись расходы топлива и воздуха, а также температура и давление отработавших газов перед и за турбиной, температура и разрежение на впуске, перед колесом компрессора, температура и давление за компрессором, перед охладителем, а также температура и давление на входе во впускной коллектор. Измерялись частота вращения ротора турбокомпрессора и частота вращения коленчатого вала двигателя. Определялась температура окружающей среды на входе в систему воздухоподачи, температура охлаждающей жидкости и масла, давление масла и давление картерных газов. Также проводилось индицирование 4-го цилиндра дизеля. Токсичность двигателя определялась путем измерения эмиссии NO_x и CO . Для определения дымности ОГ и концентрации нерастворимых твердых частиц применялось эмпирическое уравнение, описываемое полиномой 3-й степени и связывающее дымность с коэффициентом избытка воздуха α и частотой вращения коленчатого вала n .

Испытания по 13-ти режимному Европейскому циклу ESC проводились с серийным и макетным образцом регулируемого ТКР. Для каждого из вариантов ТКР удельные показатели рассчитывались с учетом коэффициента значимости каждого режима. При этом использовались различные настройки регулируемого ТКР: на максимальную экономичность, минимальные эмиссию NO_x , CO , выбросы твердых частиц.

Конструкция опытного образца регулируемого ТКР была разработана совместно со специалистами ООО “Турбо - Веста” (г.Харьков). Регулируемый ТКР был создан на базе серийного ТКР 7 ТВ-03 и имел глубину регулирования 30%. В данной конструкции положение элемента регулирования задавалось за счет перемещения штока клапана, положение которого изменялось в зависимости от давления наддува. Безмоторные испытания опытного образца регулируемого ТКР проводились на стенде ДЗТ (Дергачевского завода турбокомпрессоров), а также на Алтайском моторном заводе и ПО “КАМАЗ”.

Испытания дизеля 4ЧН 12/14 с серийным ТКР и промышленным образцом регулируемого ТКР проводились по внешней характеристике. Регулирование

турбины производилось в диапазоне частот вращения коленчатого вала ДВС от 1800 мин⁻¹ и ниже. При этом накладывались ограничения по максимальной температуре отработавших газов (660 °С) и дымности ОГ, нормируемой Правилами ЕЭК ООН №24.

Ключевые слова: дизель, метод регулирования турбины турбокомпрессора, токсичность, топливная экономичность.

Samojlenko D.E. Improvement of the technical and economical factors of auto-tractor diesel by adjusting turbocharging. The Manuscript.

Thesis of a candidate of technical science degree by speciality 05.05.03 – engines and energy mountings. - National Technical University “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, 2008.

Dissertation is devoted to development of effective method, possible constructions and recommendations on introduction of the adjusting turbocharging system of automobile and tractor diesel.

Developed makeup and industrial prototype of adjusting turbocharger with vaneless turbine volute. Calculations researches are conducted for estimation of influencing of different ways of adjusting turbocharger on the indexes of working process of diesel. Experimental researches are conducted on diesel 4 CHN 12/14, equipped with makeup exemplar of adjusting turbocharger with vaneless turbine volute. The results are done about influence of adjusting on the indexes of engine in the wide range of operating running regimes, including ESC cycle. It is marked that the optimum tuning of adjusting turbocharger is tuning at which the minimum hard particle emission holds.

In work recommendations are represented on introduction of industrial prototype of turbocharger with vaneless turbine volute on autotractor ICE.

Key words: diesel, method of adjusting turbocharger, emission, fuel economy.