

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Мазін Володимир Олексійович

УДК 621.43.052

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ГАЗОТУРБІННОГО
НАДДУВУ ЧОТИРИТАКТНОГО ТРИЦИЛІНДРОВОГО ДВИГУНА

Спеціальність 05.05.03 – Теплові двигуни

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Теплотехніка і гідравліка” Запорізького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Єгоров Ярослав Олексійович,

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя,
завідувач кафедри теплотехніки і гідравліки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Куценко Олександр Сергійович,

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”,
м. Харків, завідувач кафедри системного аналізу і управління;

кандидат технічних наук

Анімов Юрій Олександрович,

Казенне підприємство “Харківське конструкторське бюро з двигунобудування”, м. Харків, керівник відділу агрегатів турбонаддуву та газоповітряних систем.

Провідна установа: Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, відділ поршневих енергоустановок, м. Харків.

Захист відбудеться “__ 3 __” жовтня 2002 р. о __ 13 __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.13 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий “__ 2 __” вересня 2002 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Парсаданов І.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Напрямок на підвищення економічності комбінованих двигунів внутрішнього згоряння (КДВЗ) збережеться й у найближчому десятиріччі. Підвищення економічності насамперед вимагають двигуни з малим числом циліндрів, виробництво яких розширюється; вдосконалення у зв'язку з цим потребують системи газотурбінного наддуву (ГТН) і процеси в їх елементах. Відзначені проблеми вирішують поетапно розрахунковим прогнозуванням і експериментальною верифікацією результатів. Якість розробок при цьому залежить від точності й адекватності застосовуваних фізико-математичних моделей (ФММ).

Низька ефективність відомих систем ГТН у складі двигунів із трьома і менше циліндрами пов'язана з нестачею і нерівномірністю надходження газу у випускний колектор. Через це тиск на вході у турбіну нижче, ніж у двигунів з великим числом циліндрів, при імпульсній системі він може бути близьким навіть до атмосферного. З цих причин складно забезпечити сприятливі умови для ефективного розширення газу в турбіні протягом циклу. У результаті більше втрати, пов'язані з імпульсністю, кінематичною парціальністю і компресорними режимами, а циклова енергія на валу менша за роботоздатність газу на вході у турбіну.

Втрати можливо знизити, використовуючи у турбіні потік високої роботоздатності задовільної імпульсності, складений з виділених порцій випускного газу окремих циліндрів у колекторі, газ низької роботоздатності при цьому скидається. Практично ідея реалізується в системі з двома випускними клапанними органами, поліпшення аеродинамічних характеристик яких також сприяє успішному рішенню проблеми. Таку систему названо ізобарно-імпульсною, в ній вдало сполучаються переваги і погашаються недоліки діючих систем-аналогів.

Актуальність теми дисертаційної роботи обумовлена необхідністю розробки методики вибору і пристосування системи газотурбінного наддуву, що відповідає сімейству чотиритактних трициліндрових двигунів, прогнозування техніко-економічних показників при різних умовах експлуатації на основі варіантних розрахунків, вироблення заходів перспективного удосконалення з урахуванням існуючих тенденцій розвитку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження погоджується з Державною програмою розвитку двигунобудування України на 2001 – 2005 рр. і планами галузі щодо її реалізації. Воно виконане з ініціативи виробничого об'єднання “Південди-зельмаш” відповідно до наукових планів Запорізького національного технічного університету (ЗНТУ) за темою “Дослідження і розробка ефективних методів використання енергії випускних газів комбінованих двигунів внутрішнього згоряння”, що була включена до плану Міністерства освіти України № 38 “Наукові проблеми енергозбереження шляхом діагностики, інте-

нсіфікації теплотехнологій в енергетиці, промисловості і сільському господарстві при дотриманні екологічних вимог” на 1997 – 2000 рр..

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування доцільності підвищення економічності чотиритактного трициліндрового дизеля використанням у турбіні складеного малоімпульсного потоку випускного газу високої роботоздатності.

Об'єкт дослідження – робочий цикл чотиритактного трициліндрового комбінованого двигуна.

Предмет дослідження – система газотурбінного наддуву чотиритактного трициліндрового комбінованого двигуна.

Методи дослідження. При рішенні ФММ й обчисленні індикаторної роботи циклу використані чисельні методи Рунге-Кутта IV порядку і Сімпсона. Резерви підвищення циклової енергії на валу турбіни встановлено за методологією планування і прогнозування експерименту, межі розподілу випускного газу на частини високої і низької роботоздатності – математичними експериментами з відсіювання. Характеристики клапанних органів газорозподілу визначено методом статичної стаціонарної продувки. Навантажувальні характеристики чотиритактного трициліндрового дизеля з різними системами ГТН встановлено методом стендових випробувань.

У ході дослідження вирішувались задачі:

1. Підвищення точності, розв'язувальної здатності й адекватності ФММ об'єкту досліджень.
2. Розробка програмного забезпечення з опису робочого циклу КДВЗ модульної структури за охопленням факторів і глибиною досліджень.
3. Визначення меж поділу тривалості випуску за роботоздатністю газу, створення пристрою, що імітує розподіл клапанними органами.
4. Розробка установки з продувки зразків газом, що відробив.
5. Визначення й удосконалення дійсних характеристик елементів системи ГТН і турбокомпресора двигуна-прототипу.
6. Розробка і перевірка ефективності перспективної системи ГТН з аеродинамічно поліпшеними клапанними органами газорозподілу на експлуатаційних режимах чотиритактного трициліндрового дизеля.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розвинуто ідею підвищення ефективності ГТН двигунів з малим числом циліндрів розподілом за енергетичними рівнями і використанням у турбіні випускного газу високої роботоздатності.
2. Уточнено фізико-математичну модель КДВЗ обліком особливостей нестационарної течії газу в турбіні.

3. Уточнено вплив в'язкісного тертя і стисненості циліндрового простору на аеродинамічні характеристики клапанних органів газорозподілу у період продувки циліндра.

4. Встановлено можливості удосконалення газообміну штучним дроселюванням і турбулізацією потоку в клапанній щілині.

5. Визначено межі використання і місце серед відомих систем ізобарно-імпульсної системи ГТН.

Практичне значення одержаних результатів. Практичну цінність дисертаційної роботи складають:

- методика вибору і пристосування системи ГТН до чотиритактного трициліндрового двигуна й умов його експлуатації;
- програмне забезпечення з розрахунку робочого циклу КДВЗ;
- рекомендації з реконструкції діючих систем в ізобарно-імпульсну систему ГТН;
- проект сепаратора з розподілу випускного газу за енергетичними рівнями;
- клапанні органи газорозподілу з поліпшеними аеродинамічними характеристиками;
- уточнені характеристики повітряного фільтра, охолоджувача, клапанних органів, випускних колектора і труби дизеля ЗЧН-12/14.

Результати роботи прийняті до впровадження Токмацьким дизелебудівним заводом (реєстраційні номери звітів ГР 0198V002610 і ГР 01827000063), використовуються на моторобудівних заводах Запорізької області у науково-дослідній роботі, а також у навчальному процесі ЗНТУ для студентів спеціальностей 7.090210, 7.090211.

Особистий внесок здобувача. При виконанні дисертаційного дослідження здобувач взяв участь у розробці:

- методики вибору і пристосування системи ГТН до чотиритактного трициліндрового двигуна й умов його експлуатації;
- програмного забезпечення з розрахунку робочого циклу КДВЗ;
- рекомендацій з реконструкції діючих систем в ізобарно-імпульсну систему ГТН;
- рекомендацій з уточнення розрахунку газообміну в період продувки циліндрів і удосконалення аеродинамічних характеристик клапанів.

В опублікованих роботах особисто здобувачем:

- розроблено концепцію ізобарно-імпульсної системи ГТН і конструкцію сепаратора [4];
- розроблено фрагмент ФММ і відповідний модуль програмного забезпечення з врахування особливостей нестационарної течії газу в турбіні;
- приведено в адекватний об'єкту стан універсальні ФММ і програмне забезпечення [7];

- виконано математичні експерименти з відсіювання, визначено значущі фактори, функції мети і перспективні напрямки розрахунково-експериментального дослідження [4];
- встановлено резерви підвищення циклової енергії на валу турбіни дизеля ЗЧН-12/14 при варіюванні типу і виконання системи ГТН [4];
- встановлено навантажувальні характеристики чотиритактного трициліндрового дизеля при різних співвідношеннях тривалості випуску в газові магістралі високої і низької роботоздатності [4];
- розроблено експериментальну установку зі статичної стаціонарної продувки елементів системи ГТН [3];
- отримано апроксимуючі рівняння щодо впливу в'язкісного тертя і стисненості циліндрового простору на аеродинамічні характеристики клапанних органів газорозподілу [1];
- встановлено відмінність діаграм газорозподілу дизелів серії ЧН-12/14 при прямій і зворотній течіях робочого тіла;
- встановлено значення аеродинамічно доцільного кута конуса посадкової фаски клапанних органів [2];
- виконано порівняльний аналіз ефективності заходів щодо удосконалення аеродинамічних характеристик клапанних органів [5];
- отримано дійсні залежність зниження температури повітря в охолоджувачі від температури на вході і витрати, зниження тиску у повітряному фільтрі, охолоджувачі і випускній трубі, коефіцієнт тепловіддачі випускного колектора дизеля ЗЧН-12/14 [6].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи обговорювалися на конференціях професорсько-викладацького складу ЗНТУ за участю провідних спеціалістів моторобудівних підприємств Запорізької області у 2000, 2001 рр., отримані позитивні відзиви. Матеріали доповідалися на семінарах “Диагностика, повышение эффективности, экономичности и долговечности двигателей” (1991, 1992 рр., СПДАУ, м. Санкт-Петербург, м. Пушкін), “Улучшение показателей тепловых двигателей и ресурсосбережение” (1998, 1999 рр., ТДАТА, м. Мелітополь).

Публікації. За матеріалами дисертаційного дослідження опубліковано 12 друкованих праць: статті у фахових вітчизняних і іноземних виданнях –6, стаття у збірнику наукових праць –1, авторське свідоцтво –1, депоновані рукописи –2, тези доповідей семінару –2.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків та 1 додатка. Повний обсяг дисертації складає 156 сторінок, з них 28 ілюстрацій по тексту, 12 ілюстрацій на 11 сторінках; 11 таблиць по тексту, 2 таблиці на 3 сторінках; 1 додаток на 19 сторінках; 133 найменування використаних літературних джерел на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, розкрито суть і стан проблеми, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну і практичне значення результатів.

У першому розділі наведено огляд літератури зі створення і дослідження діючих систем ГТН. Установлено можливості поліпшення економічності КДВЗ при удосконаленні систем наддуву і їх елементів. Визначено напрямки, методи й засоби дослідження, сформовано факторний простір і функції мети для математичних експериментів.

Перспективним визнане удосконалення процесів у випускній системі. Ефективному розширенню у турбіні сприяють підвищення тиску і температури газу, згладжування миттєвих і циклових відмінностей у вхідному перерізі. Це забезпечується виділенням випускного газу високої роботоздатності і компонуванням у колекторі відповідних об'єму і теплоенергетичних властивостей.

За погодженістю і величиною парціальних втрат енергії до числа значущих віднесено роз-мірність турбокомпресора і прохідну площу соплового апарата, а за умовами ефективної роботи компресора – об'єм впускного колектора. Недостатньо вивченими визнано аеродинамічні характеристики клапанних органів газорозподілу.

Другий розділ присвячений уточненню ФММ робочого циклу КДВЗ і методики її рішення, розробці програмного забезпечення; враховуються особливості нестационарної течії газу в турбіні. ФММ базується на законах збереження маси, енергії, імпульсу. Вона містить системи диференціальних рівнянь для циліндра, випускного колектора і турбіни, замикається рівняннями стану і динаміки ротора турбокомпресора.

У моделі позначено:

C_{PA} , C_P – масові теплоємності при постійному тиску повітря і продуктів згоряння;

$\Delta\Phi$, j – кутовий розмір і кількість розрахункових секторів турбіни;

$dm_{вп}$, $dm_{в}$, $dm_{т}$, dm_{CAj} , dm_{Tj} – елементарні маси робочого тіла, що витекли через впускні і випу-

скні клапанні органи, турбіну, розрахунковий сектор соплового апарата і турбіни;

$\gamma_{вп}$, $\gamma_{в}$ – коефіцієнти складу робочого тіла у мінімальних перерізах впускного і випускного клапанних органів;

M , M_A , M_x – кількість молів робочого тіла, свіжого заряду й тих, що утворюються при згорянні;

$\Delta m_{цл}$ – масова циклова доза палива;

F_p , $r_{кп}$, $\lambda_{кп}$ – робоча поверхня поршня, радіус кривошипа і його відношення до довжини шатуна;

dQ_c , dQ_w – елементарні кількості теплоти, що виділяється при згорянні і бере участь в обміні з нав-колишнім середовищем;

μF_{CAj} , μF_{Tj} – ефективні прохідні перерізи соплового апарата і турбіни в межах розрахункового сектора;

α_{BKp} , T_{BKp} , F_{BKp} , m_{BKp} , V_{BKp} – коефіцієнт, температура і площа поверхні тепловіддачі, маса газу

й об'єм випускного колектора;

c_T , w_T – абсолютна і відносна швидкості газу на вході до соплового апарата і робочого колеса турбіни;

p'_T – тиск у радіальному зазорі “сопловий апарат – робоче колесо”;

φ_{TK} , ω_{TK} , I_{TK} , η_{TK} – кут повороту, кутова швидкість, момент інерції ротора і механічний ККД турбокомпресора.

$$\left\{ \begin{array}{l} dm = dm_{вп} + \Delta m_{цл} dx - dm_B, \\ dm_o = -r_{вп} dm_{вп} + \Delta m_{цл} (1 + 1_o) dx - r_B dm_B, \\ dV = r_{кп} F_{п} \left(\sin \varphi + \frac{\lambda_{кп}}{2} \sin 2\varphi \right) d\varphi, \\ dT = \frac{1}{m} \left[\frac{1}{C_v} \left(C_{pA} T_k dm_{вп} - C_p T dm_B + dQ_c + dQ_w - p dV \right) - T dm \right], \\ dp = \frac{p}{M} (dM_A + dM_x) + \frac{p}{T} dT - \frac{p}{V} dV; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} dm_{BKp} = \sum_1^i dm_{B_i} - \sum_1^j dm_{T_j} \\ dT_T = \frac{1}{C_v m_{BKp}} \left[\sum_1^i \left(C_p T_p dm_{B_i} \right) - C_p T_T dm_T - \alpha_{BKp} F_{BKp} (T_T - T_{w_{BKp}}) \frac{d\varphi}{\omega} - C_v T_T dm_{BKp} \right], \\ dp_T = \frac{R}{V_{BKp}} (T_T dm_{BKp} + m_{BKp} dT_T); \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} dm_{CAj} = \mu F_{CAj} \frac{p_T}{RT_T} \left(\frac{p'_T}{p_T} \right)^{\frac{1}{k}} c_{Tj} \frac{\Delta \Phi d\varphi}{2\pi \omega}, \\ dm_{Tj} = \mu F_{Tj} \frac{p_T}{RT_T} \left(\frac{p_{T_o}}{p_T} \right)^{\frac{1}{k}} w_{Tj} \frac{\Delta \Phi d\varphi}{2\pi \omega}; \end{array} \right.$$

$$d\omega_{TK} = \frac{N_T \cdot \eta_{TK} - N_K}{I_{TK} \omega_{TK}^2} d\varphi_{TK}.$$

Для врахування нестационарної течії у турбіні використані модель “короткий канал” і поняття “еквівалентна довжина”. Відповідно до моделі “короткий канал” витрата газу за довжиною каналу не змінюється, імпульс тиску уздовж каналу поширюється миттєво, а газ, через зміну параметрів, прискорюється чи сповільнюється.

Циклові параметри визначаються подвійним інтегруванням за поверхнею перерізу і часом. Переріз поділяється на розрахункові сектори, розмір і кількість яких установлюється за співвідношенням частот обертання валу двигуна і ротора турбокомпресора:

$$\Delta\Phi = 0.1 \frac{n_{\text{TK}}}{n} d\varphi, \quad j = \text{int} \left(\frac{180}{\Delta\Phi} \right) + 1.$$

Маса газу, що протікає через розрахункові сектори соплового апарата і робочого колеса, розраховується нарізно, тому що канали у вінцях парціальної турбіни розрізняються кривиною. При визначенні параметрів газу на вході у турбіну p_t , T_t використовується експериментальне значення коефіцієнта тепловіддачі випускного колектора $\alpha_{\text{ВКр}}^w$. Тиск у радіальному зазорі “сопловий апарат – робоче колесо” p'_t визначається методом послідовних наближень.

Швидкість нестационарного руху у секторі w_j обчислюється за формулою, що складена на основі визначення короткого каналу

$$w_j = \frac{w_{0j} + \sqrt{\frac{2L_t}{1+\xi_j}} \cdot \text{th} \left(\sqrt{\frac{1+\xi_j}{2}} L_t \cdot \frac{\Delta t}{l_3} \right)}{1 + \frac{w_{0j}}{\sqrt{\frac{2L_t}{1+\xi_j}}} \cdot \text{th} \left(\sqrt{\frac{1+\xi_j}{2}} L_t \cdot \frac{\Delta t}{l_3} \right)},$$

де $\Delta t = \Delta\Phi / \omega_{\text{TK}}$ – час повороту ротора турбокомпресора на кут, що дорівнює розрахунковому сектору,

L_t – наявна енергія газу на вході у розрахунковий сектор,

w_{0j} – швидкість газу у секторі на початку інтервалу часу Δt ,

l_3 – еквівалентна довжина каналу.

Значення коефіцієнта сумарних втрат у секторі ξ_j й ефективного прохідного перерізу μF_j визначаються за характеристикою турбіни, що знята у стаціонарних умовах, зворотні течії враховуються експериментальними даними $\mu F_j'$ з літератури.

Еквівалентним названо прямий короткий канал постійного прохідного перерізу, витрата газу

в якому така ж, як у дійсному каналі. Довжина еквівалентного каналу $l_3 = \int_0^l \frac{F_B}{F_{\text{ВП}}} dl$,

де l – довжина фактичного каналу по осьовій лінії,

$F_{\text{ВП}}$, F_B – прохідні площі у вхідному і вихідному перерізах.

Через складну конфігурацію каналів l_3 для соплового апарата і робочого колеса турбіни визначається графічним інтегруванням.

Зміну мольного складу газу при згорянні враховано у диференціальному рівнянні стану, значення відповідного доданка поставлені у залежність від зміни масової частки згорілого палива dx :

$$\begin{aligned} dM_x &= (M - M_A)dx, & \text{якщо} & \quad \varphi_c \leq \varphi \leq \varphi_z, \\ dM_x &= 0, & \text{якщо} & \quad \varphi < \varphi_c \text{ чи } \varphi > \varphi_z. \end{aligned}$$

У рівняння динаміки підставляється момент інерції ротора турбокомпресора ТКР-7 I_{TK} , встановлений експериментально.

У методиці рішення ФММ присутні рівняння, які апроксимують вплив в'язкісного тертя і стисненості циліндрового простору на аеродинамічні характеристики клапанних органів газорозподілу у період продувки циліндра, що складені за експериментальними даними. При режимах течії за числом Рейнольдса $Re < 30 \cdot 10^3$ коефіцієнт витрати випускних органів

$$\mu_B = 0.9435 + 8016 \cdot 10^{-9} Re - 476 \cdot 10^{-12} Re^2 + 14 \cdot 10^{-15} Re^3.$$

Стисненість характеризується віддаленням поршня від кришки циліндра, при $\bar{S} = S/S_{max} < 0.05$

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_{F_{вп}} &= 1 - \frac{1}{10 + 253(\bar{S}/\bar{H})} - \frac{15\bar{H} - 1.3}{3.6 + 1875\bar{S}} - 0.414 \exp(-184\bar{S}), \\ \bar{\mu}_{F_B} &= 1 - \frac{1}{10 + 253(\bar{S}/\bar{H})} - \frac{15\bar{H} - 1.3}{3.6 + 1875\bar{S}} - 0.322 \exp(-165\bar{S}), \end{aligned}$$

де $\bar{S}, \bar{H} = H/H_{max}$ – відносні положення поршня і відкриття клапана.

У базу даних включено дійсні залежність зниження температури наддувочного повітря в охолоджувачі від витрати і температури на вході $\Delta T_x = f(T'_k, G_A)$, зниження тиску в повітряному фільтрі $\Delta p_{\#}$, охолоджувачі Δp_x і випускній трубі $\Delta p_{вт}$.

Програмне забезпечення має модульну структуру, налагоджується на різні варіанти газоповітряного тракту і глибину розрахунково-теоретичного дослідження. Похибка розрахунків контролюється за балансовими співвідношеннями для циліндра, компресора і циліндра, циліндра і

турбіни
$$\left(1 + \frac{1}{\alpha l_0}\right) \int dm_{вп} = \int dm_B, \quad G_A \Delta t_{цп} = \sum_1^i \left(\int dm_{вп}\right),$$

$$G_A \Delta t_{цп} \left(1 + \frac{1}{\alpha l_0}\right) = \int dm_T.$$

Завдяки уточненню ФММ і методики досліджень відповідність розрахункової і експериментальної індикаторних робіт циклу підвищено на 2.3 %. Адекватність ФММ за індикаторною роботою циклу, що адаптована до розрахунку дизеля ЗЧН-12/14, складає 98.3 %.

У третьому розділі представлено методику приведення універсальної ФММ в адекватний об'єкту стан адаптацією за характеристиками згоряння у рівнянні І.І. Вібе й ідентифікацією процесів у випускному колекторі. Розрахунково-теоретичним дослідженням визначені резерви

циклової енергії на валу турбіни при удосконаленні системи ГТН і підвищенні роботоздатності газу на вході, напрямом зі створення перспективної системи для чотиритактного трициліндрового дизеля і її місце серед відомих систем. Розроблено методику вибору і пристосування системи ГТН до чотиритактного трициліндрового двигуна і умов його експлуатації.

Адаптація й ідентифікація виконуються методами планування і прогнозування експерименту за рівняннями регресії у відповідності до експериментальних індикаторних діаграм прототипу у циліндрі і випускному колекторі. Функцією мети для адаптації прийняте відношення розрахованої й експериментальної індикаторних робіт циклу

$$\bar{L}_i = L_{i_p} / L_{i_0} = 0.89958 + (97\Delta\varphi_{\text{тп}} - 675m_{\text{вб}} - 4\theta_z) \cdot 10^{-4}.$$

При отриманих значеннях $\Delta\varphi_{\text{тп}} = 15.5^\circ$, $\theta_z = 80^\circ$, $m_{\text{вб}} = 0.3$ похибка за максимальним тиском у циліндрі і частиною індикаторної роботи за час процесу згоряння не перевищує 0.4 % і 0.35 % відповідно.

Ідентифікація процесів у випускному колекторі виконана за теплою, що віддається через стінку за цикл, порівнянням розрахункових і експериментальних даних

$$Q_{\text{ВКр}}^w = -1353 + 2.3\alpha_{\text{ВКр}}^w + 18970F_{\text{ВКр}}^w + 17\Delta\varphi_{\text{п}} - 21.3\alpha_{\text{ВКр}}^w F_{\text{ВКр}}^w - 0.055\alpha_{\text{ВКр}}^w \Delta\varphi_{\text{п}} - 234.1F_{\text{ВКр}}^w \Delta\varphi_{\text{п}} + 0.66\alpha_{\text{ВКр}}^w F_{\text{ВКр}}^w \Delta\varphi_{\text{п}}$$

При $\alpha_{\text{ВКр}}^w = 275 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $F_{\text{ВКр}}^w = 0.079 \text{ м}^2$, $\Delta\varphi_{\text{п}} = 5^\circ$ (перекриття випусків із суміжних за порядком роботи циліндрів) наявна енергія газу у порожнині колектора відрізняється не більше ніж на 0.5 %.

Показником ефективності удосконаленої системи ГТН прийнято відношення циклової енергії на валу турбіни в експерименті і вихідному варіанті \bar{E}_T . Досліджено вплив коефіцієнта сепарації k_c (співвідношення тривалості випуску у робочу магістраль і на скидання), об'ємів колекторів ($\bar{V}_{\text{ВпКр}} = V_{\text{ВпКр}}/V_h$, $\bar{V}_{\text{ВКр}} = V_{\text{ВКр}}/V_h$), прохідної площі соплового апарата у вихідному перерізі ($\bar{F}_{\text{CA}_B} = F_{\text{CA}_B}/F_{\text{Bmax}}$) і розмірності турбокомпресора ($\bar{D}_T = D_T/D$). Рівняння регресії має вид

$$\bar{E}_T = E_T/E_{T_0} = 16.16 + 0.45\bar{V}_{\text{ВпКр}} + 3.6(\bar{V}_{\text{ВКр}}^2 - 2.3\bar{V}_{\text{ВКр}}) - 0.419\bar{F}_{\text{CA}_B} - 0.466\bar{D}_T + 0.592\bar{F}_{\text{CA}_B}\bar{D}_T - 11.76(k_c^2 - 1.83k_c).$$

Найбільш ефективну роботу дизель 3ЧН-12/14 показав з ізобарно-імпульсною системою газотурбінного наддуву при $V_{\text{ВпКр}} = 4500 \text{ см}^3$, $V_{\text{ВКр}} = 2250 \text{ см}^3$, установці турбокомпре-

сороа ТКР-7 із площею $F_{CA} = 12.5 \text{ см}^2$ і поділі тривалості випуску в магістралі високої і низької роботоzдатності у співвідношенні 6/7 : 1/7. Зміну E_T , η_T , g_i , η_i , Δp_T від аргументу $\Xi = \bar{V}_{\text{впкр}} / (\bar{V}_{\text{вкр}} \cdot \bar{F}_{\text{CAв}} \cdot \bar{D}_T \cdot k_c)$ у зоні оптимальної відповідності факторів показано на рис. 1. Збільшення \bar{E}_T відбувається за рахунок використання газу високої роботоzдатності, зниження імпульсності $(\Delta p/p)_T$, підвищення температури T_T і ККД турбіни η_T . Підвищення E_T на 17 % забезпечило зниження питомої індикаторної витрати палива g_i приблизно на 4 %.

Методика вибору і пристосування систем ГТН до чотиритактних трициліндрових двигунів інтегрує досвід, накопичений при виконанні розрахунково-теоретичного дослідження. Вона полягає у порівнянні розраховуваних циклових індикаторних діаграм двигуна з різними системами ГТН. Системи ГТН вдосконалюються за найменш ефективними елементами і найбільш значущими факторами, фактори ранжируються за впливом на циклову енергію на валу турбіни.

Четвертий розділ присвячений експериментальному дослідженню й удосконаленню елементів газоповітряного тракту дизеля ЗЧН-12/14. Відмінною рисою статичної стаціонарної продувки є те, що потік повітря чи газу що відробив, при відкачуванні чи нагнітанні ініціювався 1–2 циліндрами дизеля 6ЧН-12/14 однакових з об'єктом розмірності і швидкохідності, чим забезпечені ідентичність експериментальних і дійсних умов, відповідність витрат і подібність потоків. При знятті теплової характеристики охолоджувача на вхід монтувався пакет електронагрівальних елементів для регулювання температури.

Встановлено вплив в'язкісного тертя, стисненості циліндрового простору і напрямку течії на аеродинамічні характеристики клапанних органів газорозподілу у період продувки циліндра, залежність зниження температури повітря в охолоджувачі від витрати і температури на вході $\Delta T_x = f(T'_k, G_A)$, зниження тиску у повітряному фільтрі $\Delta p_\#$, охолоджувачі Δp_x і випускній трубі $\Delta p_{\text{вт}}$. У формі апроксимуючих виражень і числових даних вони включені у фізико-математичну модель і алгоритм.

Удосконалено аеродинамічні характеристики клапанних органів газорозподілу дизеля ЗЧН-12/14, з якими пов'язане виконання основних функцій ізобарно-імпульсної системи газо-турбінного наддуву: розподіл випускного газу окремих циліндрів за енергетичними рівнями і раціональне компонування порцій у колекторі відповідного об'єму і теплоенергетичних якостей, керування потоками. Заходи виконувалися нарізно й у суперпозиції штучного дроселювання і турбулізації потоку у клапанній щілині, оптимізації кута конуса посадкової фаски і радіуса кривини галтелі.

Для турбулізації газового потоку на фасках сідла і клапана виконувалися по 2 канавки прямокутного профілю 0.8×0.6 , для дроселювання таріль затоплювалася у гні-

здо на глибину $h = 1 \dots 2$ мм із зазором $\Delta = 0.01 \dots 0.05$. Ефективний кут-переріз впускних клапанних органів майже не змінився, впускних – у різних варіантах збільшився на 8.5 %, 14 % і 17 %. Кращий варіант, крім поліпшення пропускної здатності, привабливий можливістю розширення фаз газорозподілу на суміжні такти без істотного зменшення корисної роботи газу у циліндрі і збільшення зворотно закинутих мас, нечутливістю до відкладень.

При дослідженні клапанних органів діючих двигунів на раціональність сполучення геометричного й аеродинамічного факторів кут конуса посадкової фаски θ змінювався в інтервалі $22^\circ 30' \dots 67^\circ 30'$. Результати вивчення окремо коефіцієнта витрати $\mu(\varphi, \theta)$ представлені на рис. 2, значення $\mu > 1$ свідчать про умовність дослідження якостей клапанних органів методом продувок, оскільки параметри заміряються на віддаленні від мінімального перерізу. Найбільші значення ефективного кута-перерізу клапанних органів дизеля ЗЧН-12/14 припадають на $\theta = 52^\circ 30'$, щодо розповсюджених органів $\theta = 45^\circ$ збільшення складає 6 ... 7 %.

Вплив відносного радіуса кривини галтелі R/d на аеродинамічні характеристики впускних і впускних клапанів дизеля ЗЧН-12/14 перевірявся в інтервалі 0.19 ... 0.77. Як з'ясувалося, за цим фактором впускні клапани відповідають вимогам високих аеродинамічних якостей, підвищення кута-перерізу впускних клапанів на 1.7 % досягнуто збільшенням R/d до 0.48 проти 0.39 у вихідному варіанті.

Пропускную здатність впускних клапанних органів поліпшено тільки завдяки збільшенню кута конуса посадкової фаски, підвищенню аеродинамічних якостей впускних органів сприяють усі три удосконалюючі заходи. Тому виготовлені зразки, що сполучать вплив дроселювання у зазорі $\Delta = 0.01$, $h = 2$ (мм), кута конуса посадкової фаски $\theta = 52^\circ 30'$ і кривини галтелі $R/d = 0.48$ для з'ясування їхньої спільної дії. Експерименти виконані продувкою модельної голівки циліндрів газом, що відробив, і на діючому дизелі, на номінальному навантажувальному режимі. Результати обробки експериментальних даних представлені на рис. 3. У кращому варіанті збільшення кута-перерізу склало ≈ 23 %, що еквівалентно зниженню питомої індикаторної витрати палива на 1.6 %.

У п'ятому розділі наведені результати експериментального дослідження чотиритактного трициліндрового дизеля з різними системами газотурбінного наддуву у широкому спектрі експлуатаційних режимів, що виконані для верифікації результатів розрахунково-теоретичного дослідження, визначення дійсних техніко-економічних показників і місця ізобарно-імпульсної системи серед відомих систем наддуву. Ефективність заходів з удосконалення оцінювалася порівнянням навантажувальних характеристик $g_e = f(N_e)$. Через складність виготовлення 2-клапанної впускної системи запропоновано сепаратор – пристрій з імітації розподілу впускного газу за енергетичними рівнями в експериментах.

Для порівнянності і чистоти у фізичному експерименті повторено факторний простір розрахунково-теоретичного дослідження. Відмінні риси комплектації дизеля ЗЧН-12/14: 1) вихідний з імпульсною випускною системою; 2) з клапанними органами вищих аеродинамічних якостей; 3) зі збільшеним об'ємом впускного колектора й ізобарною випускною системою; 4) з математично оптимізованим об'ємом впускного колектора й ізобарно-імпульсною випускною системою; 5) те ж і з клапанними органами вищих аеродинамічних якостей. Отримані навантажувальні характеристики приведено на рис. 4.

Економічність ЗЧН-12/14 при переведенні на ізобарно-імпульсну систему наддуву покращилася на 3 %, з урахуванням газообміну клапанними органами вищої ефективності – на 4.4 %. Позитивний ефект досягнуто завдяки зменшенню майже на 30 % імпульсності у впускному колекторі, переходу до малорозмірного ТКР-7 при збереженні витратних якостей і пологості характеристики турбіни, збільшенню її ККД η_t за рахунок підвищення температури T_t . Усе разом це поліпшило продувку і наповнення циліндрів, підвищило показники ефективності циклу. Ізобарно-імпульсна система ГТН заснована на концентрації переваг і витисненні недоліків систем-аналогів, займає в їхньому ряду проміжне положення.

У п'ятому розділі також наведено похибки експериментального визначення ефективного прохідного перерізу клапанних органів газорозподілу 1.42 %, питомої індикаторної витрати палива 1.29 % і у цілому експериментального дослідження 2.71 %, вони не перевищують рекомендованого рівня і порівнювані з літературними даними.

ВИСНОВКИ

1. Удосконалено імпульсну систему ГТН чотиритактного трициліндрового дизеля на основі ідеї розподілу і використання у турбіні випускного газу високої роботоздатності. Варіант названо ізобарно-імпульсною системою, її застосуванням паливну економічність дизеля підвищено на 3 %.

2. Визначено межі доцільного використання у турбіні газу високої роботоздатності і місце ізобарно-імпульсної системи у ряду відомих систем ГТН; розроблено рекомендації з реконструкції систем ГТН двигунів з малим числом циліндрів у ізобарно-імпульсну систему.

3. Підвищено точність ФММ і методики розрахункового дослідження циклу КДВЗ обліком особливостей нестационарного руху газу в турбіні і газообміну у період продувки циліндра, це підвищило відповідність розрахункової й експериментальної індикаторних робіт циклу на 2.3 %.

4. Встановлено експериментально:

–аеродинамічно доцільний кут конуса посадкової фаски $52^\circ 30'$, можливості корекції діаграм газорозподілу штучним дроселюванням і турбулізацією потоку у клапанній щілині (а.п. №1726794 від 15.02.1991 р.), оптимальне значення радіуса кривини галтелі на випускному клапані дизеля ЗЧН-12/14; суперпозицією цих факторів кут-переріз збільшено на 23 %;

– кількісне вираження похибки аеродинамічних якостей клапанних органів газорозподілу через вплив в'язкісного тертя і стисненості циліндрового простору у період продувки циліндра;

– залежність зниження температури повітря в охолоджувачі типу “повітря – повітря” від витрати і температури на вході, її застосуванням уточнено обчислення температури повітря у впускному колекторі.

5. Запропоновано сепаратор – пристрій, що імітує розподіл впускного газу за роботоздатністю; експериментально для дизеля ЗЧН-12/14 встановлено оптимальне співвідношення тривалості випуску у робочу магістраль і на скидання $6/7 : 1/7$.

6. Розроблено програмне забезпечення з розрахунку циклу КДВЗ із обчисленням швидкості газу у турбіні за квазістаціонарною чи нестационарною методиками. Завдяки модульній структурі рішення практичних задач з вибору й оптимізації системи ГТН можливе без додаткових налагоджень.

7. Розроблено методику вибору і пристосування системи ГТН до чотиритактного трициліндрового двигуна й умов його експлуатації.

8. Застосуванням ізобарно-імпульсної системи ГТН у сполученні з аеродинамічними удосконаленнями знижено питому ефективну витрату палива дизеля ЗЧН-12/14 на 4.4 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Егоров Я.А., Мазин В.А. Влияние стеснённости цилиндрического пространства на течение рабочего тела через органы газораспределения четырёхтактного двигателя //Двигателестроение. –1990. – № 5. – С. 6 – 7.

2. Егоров Я.А., Мазин В.А. Влияние угла конуса посадочной фаски на аэродинамические характеристики клапанных органов газораспределения //Двигатели внутреннего сгорания. –Харьков: ХПИ. –1993. –Вып. 53. –С. 126 – 133.

3. Мазин В.А. Экспериментальная установка для исследования аэродинамических характеристик каналов газоздушного тракта КДВС //Труды Таврической государственной агротехнической академии. –Мелитополь: ТГАТА. – 1998. – Т. 5, вып. 2. – С. 17 – 21.

4. Мазин В.А. Золотниковое устройство изобарно-импульсной выпускной системы для разделения потока по энергетическим уровням //Труды Таврической государственной агротехнической академии. – Мелитополь: ТГАТА. – 1999. – Т. 9, вып. 2. – С. 65 – 71.

5. Егоров Я.А., Мазин В.А. Влияние галтели клапана на аэродинамические характеристики органов газораспределения //Труды Таврической государственной агротехнической академии. –Мелитополь: ТГАТА. –1999. –Т. 10, вып. 2. – С. 25 – 31.

6. Мазин В.А. Экспериментальное определение гидравлической и тепловой характеристик охладителя наддувочного воздуха //Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. –Запоріжжя: ЗДТУ. –1999. –№ 1. – С. 85 – 86.

7. Клапанные органы газораспределения двигателя внутреннего сгорания: А.с.1726794 СССР, МКИ F01L3/00 /Я.А.Егоров, В.А.Мазин (СССР). –№ 4696356; Заявлено 29.05.1989; Опубл. 15.04.1992, Бюл. № 14. – 5 с.

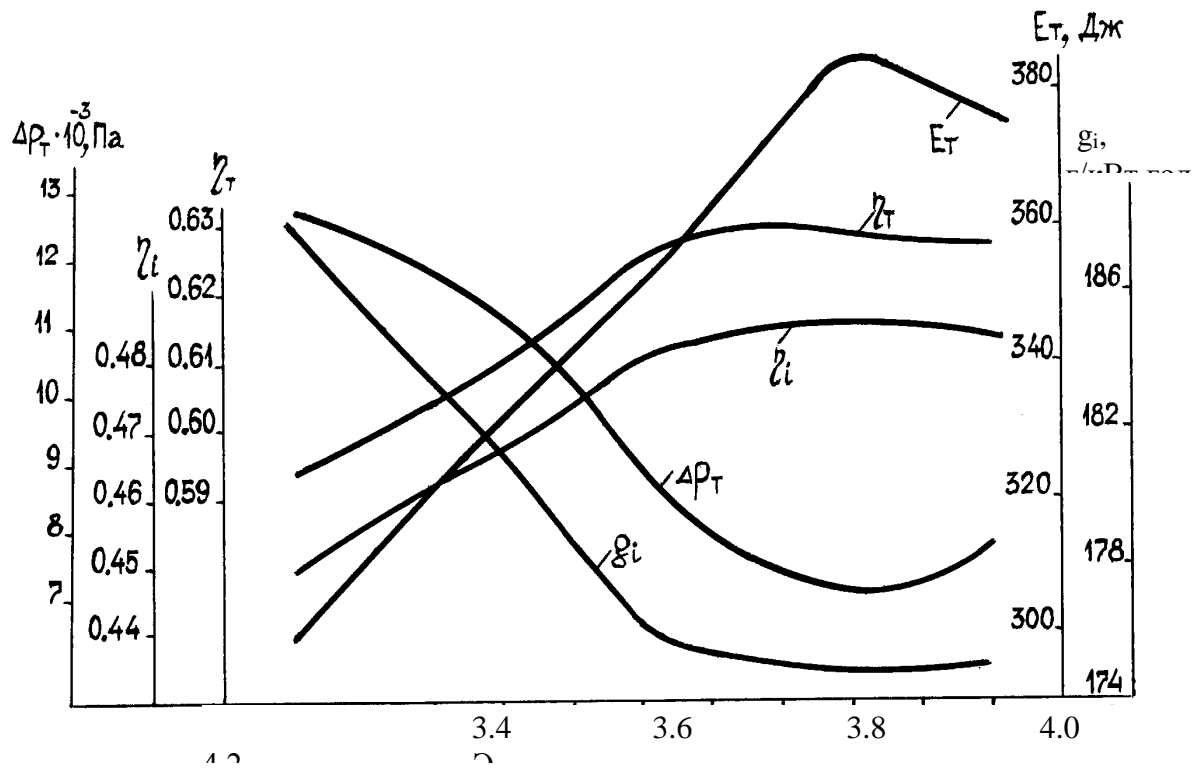


Рис. 1. Результаты вариантных расчетов с оптимизацией системы газотурбинного наддуву чотиритактного трицилиндрового дизеля

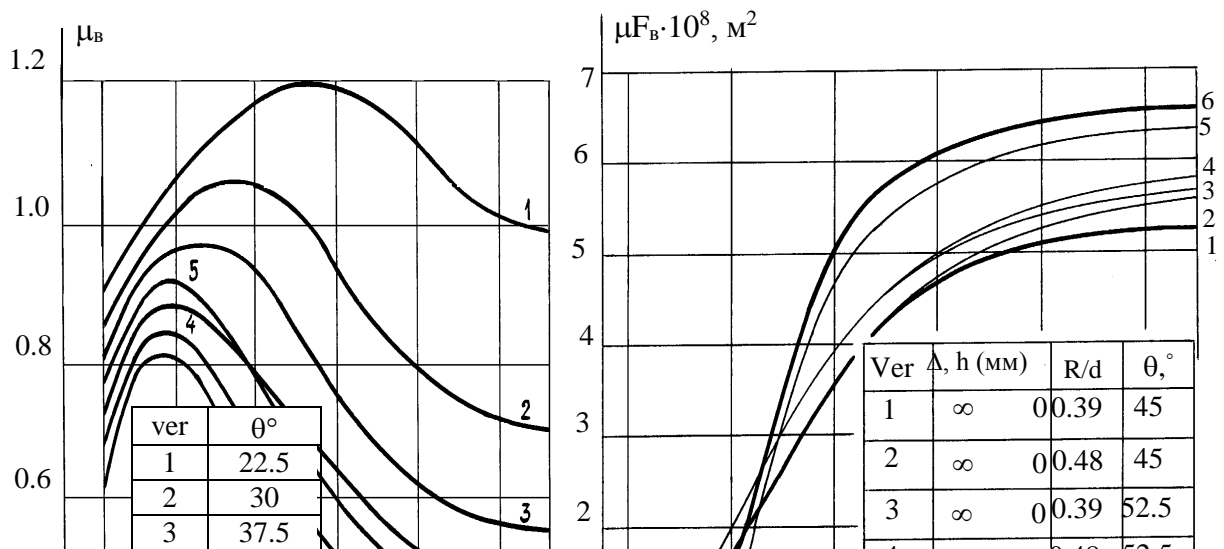


Рис. 2. Залежність коефіцієнта витрати випускних клапанних органів
ЗЧН-12/14 від кута ПКВ при різних кутах конуса посадкової фас-

ки.

Рис. 3. Дані випускного клапанного органа ЗЧН-12/14 з поліпшеними
аеродинамічними властивостями

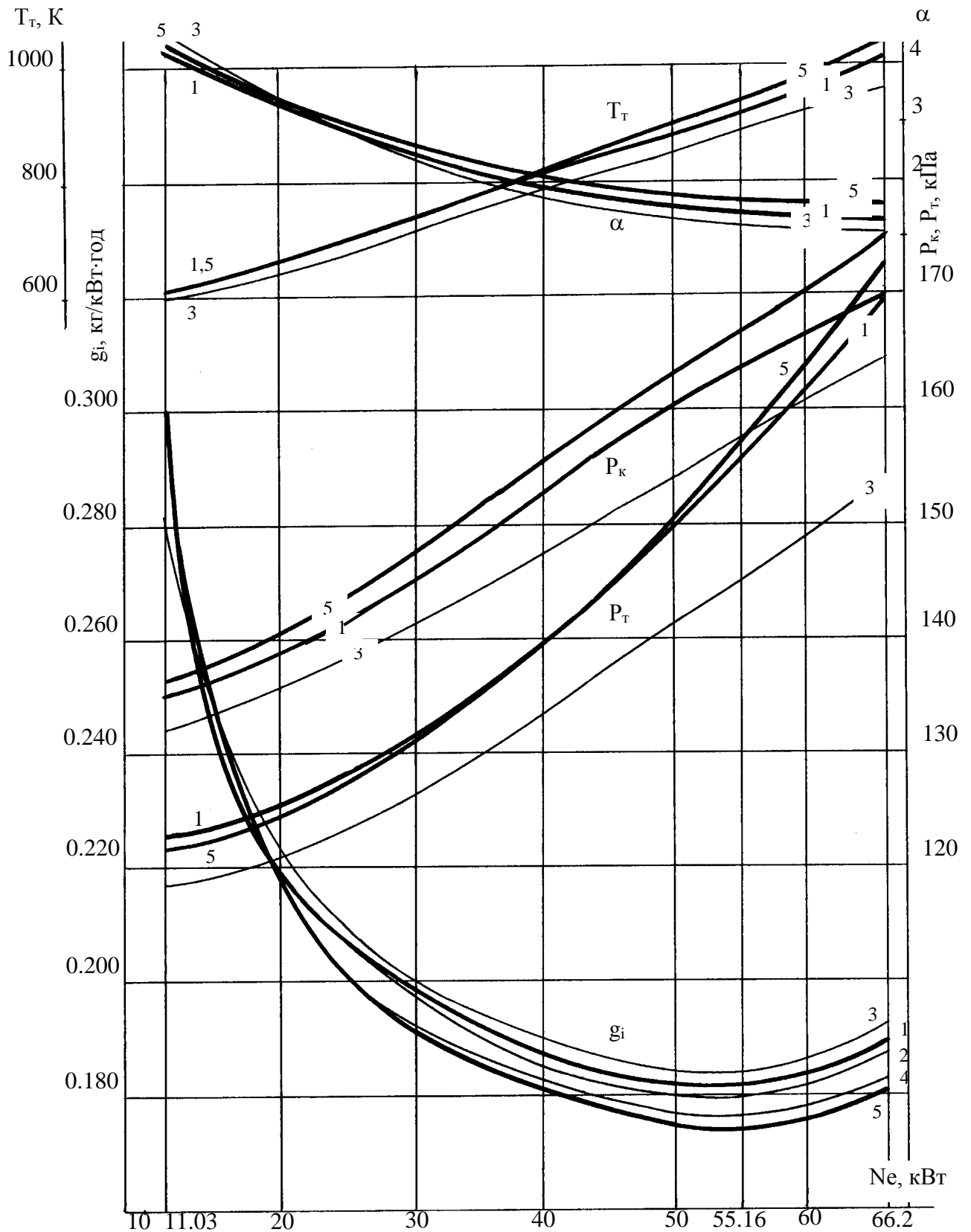


Рис. 4. Навантажувальна характеристика дизеля ЗЧН-12/14 з різними системами газотурбінного наддуву при $n=1500$ об/хв.

АНОТАЦІЇ

Мазін В.О. Розробка і дослідження системи газотурбінного наддуву чотиритактного трициліндрового двигуна. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – теплові двигуни. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2002.

Удосконалено систему газотурбінного наддуву дизеля з малим числом циліндрів, варіант названо ізобарно-імпульсною системою. Позитивний ефект досягнуто розподілом випускного газу за енергетичними рівнями, газ високої роботоздатності використовується у турбіні, низької – скидається. Розподіл виконується двома клапанними органами газорозподілу, ефективний кут-переріз яких збільшено на 23 %.

Уточнено фізико-математичну модель комбінованого двигуна внутрішнього згоряння, враховуються особливості нестационарної течії у турбіні і газообміну у період продувки циліндра. Розроблено методику вибору і пристосування системи газотурбінного наддуву до чотиритактного трициліндрового двигуна і умов його експлуатації. Навантажувальна характеристика дизеля отримана методом стендових іспитів із застосуванням сепаратора – пристрою, що імітує розподіл клапанними органами газорозподілу. Питому витрату палива в експериментах знижено на 4.4 %.

Ключові слова: комбінований двигун внутрішнього згоряння, система газотурбінного наддуву, розподіл випускного газу, клапанний орган газорозподілу, нестационарна течія, питома витрата палива.

Мазин В.А. Разработка и исследование системы газотурбинного наддува четырехтактного трехцилиндрового двигателя. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – тепловые двигатели. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2002.

Усовершенствована система газотурбинного наддува дизеля с малым числом цилиндров, вариант назван изобарно-импульсной системой. Положительный эффект достигнут разделением выпускного газа по энергетическим уровням, газ высокой работоспособности используется в турбине, низкой – сбрасывается. Разделение выполняется двумя клапанскими органами газораспределения, эффективный угол-сечение которых увеличен на 23 %.

Уточнена физико-математическая модель комбинированного двигателя внутреннего сгорания, учитываются особенности нестационарного течения в турбине и газообмена в период продувки цилиндра. Разработана методика выбора и приспособления системы газотурбинного наддува к четырехтактному трехцилиндровому двигателю и условиям его эксплуатации. Нагрузочная

характеристика дизеля получена методом стендовых испытаний с применением сепаратора – устройства, имитирующего разделение клапанными органами газораспределения. Удельный расход топлива в экспериментах снижен на 4.4 %.

Аэродинамические характеристики выпускных клапанных органов повышены искусственным дросселированием и турбулизацией потока в зазоре 0.01 между тарелью клапана и гнездом в седле глубиной 2 мм, увеличением угла конуса посадочной фаски и относительного радиуса кривизны галтели до $52^{\circ}30'$ и 0.48 соответственно. Для впускных клапанных органов значимым оказался только угол конуса фаски.

В физико-математической модели эффекты нестационарного течения в турбине учитываются через расчет скорости газа по формуле, составленной на основе модели “короткий канал” и понятия “эквивалентная длина”. Влияние вязкостного трения и стеснённости цилиндрического пространства на аэродинамические характеристики клапанных органов газораспределения описано аппроксимирующими выражениями. В базе исходных данных представлены экспериментальные характеристики охладителя наддувочного воздуха, воздушного фильтра, выпускных коллектора и трубы дизеля ЗЧН-12/14, ротора турбокомпрессора ТКР-7. Программное обеспечение имеет модульную структуру, настраивается на разные варианты газоздушного тракта и глубину расчетно-теоретического исследования. Адекватность физико-математической модели и объекта составила 98.3 %.

Методика выбора и приспособления системы газотурбинного наддува основана на сравнительном анализе расчетных цикловых индикаторных диаграмм и технико-экономических показателей двигателей. Варианты, отобранные для дальнейших исследований, совершенствуются по наименее эффективным элементам и наиболее значимым факторам, второстепенные варианты отсеиваются. Факторы ранжируются по влиянию на цикловую энергию на валу турбины, устанавливаются резервы, направления и мероприятия по совершенствованию. Для перспективного варианта определяются параметры конструкции (соотношение продолжительностей выпуска в рабочую магистраль и на сброс, объёмы коллекторов, размерность турбокомпрессора, проходная площадь соплового аппарата) и место среди аналогов.

Нагрузочные характеристики дизеля ЗЧН-12/14 с разными системами газотурбинного наддува определены при испытаниях. Изменялась продолжительность выпуска в рабочую магистраль и на сброс, такая возможность заложена в конструкции сепаратора. Предпочтение отдано изобарно-импульсной системе по результатам сопоставительного анализа.

Удельный расход топлива дизеля с изобарно-импульсной системой газотурбинного наддува снижен благодаря увеличению цикловой энергии на валу и КПД турбины, улучшению аэродинамических качеств клапанных органов газораспределения. Эффективность турбины повышена за счет общего увеличения степени расширения, снижения потерь энергии, связанных с им-

пульс-ностью и нестационарным течением газа во входном сечении, проявляющихся в формах кинематической парциальности и компрессорных режимов. Это стало возможным при использовании потока высокой работоспособности с мало изменяющимися параметрами на повышенных уровнях, когда различия между секторами турбины в каждый момент цикла незначительны.

Ключевые слова: комбинированный двигатель внутреннего сгорания, система газотурбинного наддува, разделение выпускного газа, клапанный орган газораспределения, нестационарное течение, удельный расход топлива.

Mazin V.O. Elaboration and research of gas-turbine supercharging system for four-stroke three-cylinder engine. – Manuscript.

The dissertation-paper for presenting of academic degree of candidate of technical sciences by speciality 05.05.03 – the heat engines. – National technical university “Kharkiv polytechnic institute”, Kharkiv, 2002.

The gas-turbine supercharging system of diesel engine with few number cylinders is improved, the version is called as isobar-impulsive system. The positive effect was achieved by separation of exhaust gas at energy levels, the high-capacity gas is used in the turbine, the low-capacity gas is thrown off. The separation is fulfilled by two gas-distributive valve organs whose effective angle-area has been increased to 23 %.

The physic-mathematical model of combined internal-combustion engine has been defined more precisely, peculiarities of unsteady flow of gas in turbine and gas-exchange in period of cylinder scavenging is taken into consideration now. The methods for selection and accommodation of gas-turbine supercharging system to four-stroke three-cylinder engine and its exploiting conditions has elaborated. The loading characteristic of diesel engine has been obtained by method of ring trial testes with use of separator – device for imitation of separation by gas-distributive valve organs. The specific fuel consumption is achieved lower in experiments at 4.4 %.

Key words: the combined internal-combustion engine, the gas-turbine supercharging system, separation of exhaust gas, the gas-distributive valve organ, the unsteady flow, the specific fuel consumption.

Відповідальний за випуск: к.т.н., доц. Складєвський О.М.

Підписано до друку 14.08.2002 р. Формат 60×90/16.

Папір офсетний. Віддруковано на ризографі.

Обсяг 0,9 авт. арк. Зам. № 1082. Тираж 100 прим.

Адреса редакції видавця та поліграфпідприємства ЗНТУ:
69060, м. Запоріжжя, вул. Гоголя, 64, Запорізький національний
технічний університет, редакційно-видавничий відділ