

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Хандримайлов Андрій Олексійович

УДК 621.436:533.6.011.34

ВДОСКОНАЛЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВПУСКНИХ
КАНАЛІВ І КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ МАЛОЛІТРАЖНИХ
ВИСОКООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

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 “Теоретична механіка і гідравліка” Харківського національного автомобільно-дорожнього університету Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Солодов Валерій Григорович, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри теоретичної механіки і гідравліки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Григор’єв Олександр Львович, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, професор кафедри газогідромеханіки і тепломасообміну;

кандидат технічних наук, доцент
Корогодський Володимир Анатолійович, Українська державна академія залізничного транспорту, м. Харків, доцент кафедри теплотехніки та теплових двигунів.

Захист відбудеться “16” квітня 2009 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.13 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, кафедра двигунів внутрішнього згоряння, ауд. 11.

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

Автореферат розісланий “12” березня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Триньов О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Існуюча тенденція розширення застосування дизелів на легкових автомобілях і малотоннажних вантажівках стимулює виробників дизелів до проектування малолітражного автомобільного дизеля. В Україні прикладами таких двигунів є чотиритактні вихрокамерні рядні дизелі серії ДТА розмірністю 8,2/8,8, розроблені Харківським конструкторським бюро з двигунобудування (ХКБД). Однак широке застосування дизелів цього сімейства неможливе без поліпшення показників робочого процесу. Рішенням даної проблеми є як модернізація дизелів, що випускають, так і розробка нових дизелів з безпосереднім упорскуванням палива в камеру згоряння (КЗ), розташовану в поршні. Для двигунів такого типу необхідним є проектування впускних каналів високої пропускної здатності, які дозволяють створити в циліндрах упорядковані повітряні вихори заданої інтенсивності. При цьому наявність складної просторової структури течії вимагає розгляду питань проектування й доведення каналів у тривимірній постановці. Також центральним питанням для дизелів з об'ємно-плівковим сумішоутворенням є проектування КЗ, форма й розташування якої у взаємозв'язку з іншими конструкційними параметрами двигуна багато в чому визначають процес сумішоутворення. Відомі алгоритми розрахунку просторової течії вимагають адаптації для розрахунку вихрових стисливих течій низької швидкості в областях з рухомими границями. Викладене вище дозволяє зробити висновок, що тема даної дисертації, присвяченої поліпшенню аеродинамічних характеристик та дослідженню газодинаміки впускних каналів і КЗ малолітражних високообертових дизелів в тривимірній постановці, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі “Теоретична механіка і гідравліка” ХНАДУ і включає результати досліджень, які пов'язані з виконанням держбюджетних науководослідних робіт і завдань, у яких здобувач брав участь як співвиконавець окремих розділів: Державне завдання № 787 “Автомобільні дизелі ЗДТНА та 4ДТНА для вантажопасажирських автомобілів підвищеної прохідності”; НДР № 10-53-03 “Теоретичні основи моделювання турбулентних течій газових сумішей з хімічними й фазовими перетвореннями” (№ДР 0103U001439) – у частині розвитку методу моделювання течії газу; НДР № 10-53-07 “Теорія керування процесами горіння за допомогою електричного поля” (№ДР 0107U001007) – у частині розвитку методу моделювання течії повітря для дослідження процесів горіння. Обраний напрям дисертаційного дослідження відповідає “Державній програмі розвитку двигунобудування України на 1996-2000 рр.”, затвердженій Постановою Кабінету Міністрів України від 16.01.1996 р. № 95.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вдосконалення аеродинамічних характеристик впускних каналів і КЗ малолітражних високооберто-

вих дизелів з використанням математичної моделі течії газу у впускному тракті і циліндрі двигуна. Для цього вирішувались наступні завдання:

- розробка математичної моделі руху газу у впускних каналах, циліндрі та КЗ дизеля;

- розвиток програмного комплексу *MTFS* шляхом модернізації його для рішення стаціонарних і нестаціонарних задач газодинаміки в системі впускного тракту і циліндра ДВЗ з урахуванням руху поршня й клапанів;

- розрахункове і експериментальне дослідження аеродинамічних характеристик впускних каналів дизеля;

- вибір раціональної форми впускних каналів і клапанів дизеля з точки зору підвищення витрати повітря і забезпечення необхідного рівня інтенсивності закручення заряду в циліндрі;

- дослідження процесу вихроутворення в циліндрі і КЗ дизеля та впливу на нього конструкційних і режимних параметрів.

Об'єктом дослідження є газодинамічні процеси у впускних каналах, циліндрі й напіврозділених КЗ малолітражних високооберткових дизелів з об'ємно-плівковим сумішоутворенням.

Предметом дослідження є аеродинамічні характеристики впускних каналів і КЗ малолітражних високооберткових дизелів.

Методи дослідження містили математичне моделювання газодинамічних процесів у впускних каналах, циліндрі і КЗ, а також експеримент зі статичної продувки впускних каналів на установці зі спрямляючою решіткою. Розрахунки здійснювалися для в'язкої турбулентної течії стисливого газу в тривимірній постановці шляхом апроксимації рівнянь Нав'є-Стокса, осереднених по Рейнольдсу-Фавру, скінчено-об'ємним методом другого порядку точності за простором і часом на основі наближеного розв'язання задачі Рімана.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- отримані нові дані щодо узгодження руху границь, апроксимації за часом другого порядку точності, введення корекції стисливості для течій малої швидкості і їх впливу на адекватність математичної моделі течії газу у впускному тракті і циліндрі двигуна на тактах впуску й стиску;

- за результатами верифікації двох моделей турбулентності для розрахунку задач газодинаміки ДВЗ доведено, що кращою по критерію точності визначення інтенсивності турбулентних пульсацій є модель Ментера (*SST*) у порівнянні з моделлю Спаларта-Аллмараса (*SA*);

- доведено, що виконання уточнених вимог до геометричних характеристик гвинтового і тангенціального впускних каналів забезпечує підвищення інтенсивності вихрового руху заряду без значного зниження витрати повітря;

- встановлено механізм впливу кромки КЗ на структуру течії повітря в КЗ при наявності початкового закручення заряду відносно осі циліндра.

Практичне значення отриманих результатів для дослідження газодинамічних процесів в двигунах полягає у розбудові програмного комплексу

MTFS, що дозволяє проводити розрахунки взаємозалежних тривимірних нестационарних в'язких турбулентних течій у впускних каналах і циліндрі з урахуванням руху клапанів і поршня.

Обґрунтовано вибір раціональних геометричних характеристик впускних каналів, клапанів і КЗ дизеля 4 ЧН 8,8/8,2 (4ДТНА2), що дозволяє підвищити величину вихрового відношення без значного зниження витрати повітря. Визначено раціональне значення висоти підйому клапанів дизеля 4ДТНА2, при якому подальше її збільшення не призводить до істотного підвищення витрати повітря і вихрового відношення, що дозволяє уточнити закон руху клапанів. Визначено вплив інтенсивності закручення заряду відносно осі циліндра на процес вихроутворення в напіврозділеній КЗ дизеля 4ДТНА2 наприкінці такту стиску.

Результати досліджень увійшли до звіту по Державному завданню № 787 “Автомобільні дизелі 3ДТНА та 4ДТНА для вантажопасажирських автомобілів підвищеної прохідності”, крім того, елементи програмного комплексу для рішення задач газодинаміки ДВЗ передані для використання і впровадження Казенному підприємству “Харківське конструкторське бюро з двигунобудування”.

Особистий внесок здобувача. Основні положення дисертації, які винесено на захист, розроблені здобувачем особисто. Серед них:

- на основі урахування руху границь, апроксимації за часом з другим порядком точності, введення корекції стисливості для течій малої швидкості розроблена і підвищена точність математичної моделі течії газу у впускному тракті і циліндрі двигуна на тактах впуску й стиску;

- проведено розрахунково-експериментальні дослідження впускних каналів, клапанів і КЗ дизеля 4ДТНА2 та розроблено рекомендації щодо їхнього вдосконалення.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати роботи доповідались на: Конференції «Вдосконалення турбоустановок методами математичного й фізичного моделювання» (м. Харків, Україна, 2003 р.); X Міжнародній науково-практичній конференції «Фундаментальні й прикладні проблеми вдосконалення поршневих двигунів» (м. Володимир, Росія, 2005 р.); Ювілейній міжнародній науково-технічній конференції «Аеродинаміка: проблеми й перспективи» (м. Харків, Україна, 2006 р.); XII й XIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Транспорт, екологія – стійкий розвиток» (м. Варна, Болгарія, 2006 р., 2007 р.); XI Міжнародному конгресі двигунобудівників (с. Рибаче, Україна, 2006 р.); XI Міжнародній конференції “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” (м. Київ, Україна, 2006 р.); Науково-технічних конференціях ХНАДУ (м. Харків, Україна, 2005 – 2008 рр.).

Публікації. Основні результати дисертації представлені в 11 наукових працях, з них 7 опубліковані у фахових виданнях ВАК України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків і 2 додатків. Повний обсяг дисертації складає

164 сторінок, з них 88 ілюстрацій за текстом, 3 таблиці за текстом, 2 додатки на 2 сторінках, 153 найменування використаних джерел на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета й основні задачі роботи, охарактеризовані новизна, теоретична й практична цінність отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача в одержані результати досліджень та впровадження результатів роботи.

У першому розділі представлено критичний огляд теоретичних і експериментальних робіт, пов'язаних з проблемами дослідження газодинамічних процесів у чотиритактних дизелях. Проаналізовано основні геометричні характеристики двофункціональних впускних каналів, типи КЗ і їхній вплив на процес газообміну. Розглянуто вплив інтенсивності повітряних вихрів на показники роботи дизелів. На основі аналізу робіт вітчизняних та закордонних вчених, таких як Віхерт М.М., Драганов Б.Х., Копилов М.Л., Whitelaw J.H., Пелепейченко В.І., Дяченко В.Г., Марченко А.П., Єрощенков С.А., Парсаданов І.В. та ін., показано актуальність дослідження газодинамічних процесів для вдосконалення робочого процесу ДВЗ.

На підставі аналізу робіт, що стосуються методів дослідження газодинаміки потоку в каналах і КЗ дизелів, зроблено висновок, що основним недоліком сучасних високоточних експериментальних методів є їхня трудомісткість і необхідність використання складного коштовного устаткування, а інші експериментальні методи не забезпечують одержання результатів достатньої точності. Показано, що методи чисельного моделювання течії на основі рішення загальних рівнянь газової динаміки є найбільш перспективними в області газодинаміки впускних каналів і процесів вихроутворення в КЗ.

Виконано огляд методів рішення осереднених рівнянь Нав'є-Стокса руху стисливого газу й асоційованих рівнянь в задачах газообміну в ДВЗ, описані їхні основні переваги й недоліки. З урахуванням властивостей розглянутих методів і обчислювальних ресурсів зроблено вибір на користь неявного алгоритму Біма-Уормінга й побудованої з його застосуванням сучасної різницевої схеми на основі рішення задач Рімана і *ENO*-реконструкції параметрів всередині комірки.

Огляд і методичні дослідження поширених моделей турбулентності в рамках відомого підходу Буссінеска показали перевагу *SST* моделі Ментера над іншими моделями турбулентності для більшості течій, другою по якості моделювання визнана модель Спаларта–Аллмараса (*SA*).

У другому розділі представлено розрахунковий метод, реалізований у програмному комплексі *MTFS*, розробленому під керівництвом проф. Солодова В. Г. на кафедрі теоретичної механіки і гідравліки ХНАДУ; викладено його розвиток для рішення задач газодинаміки ДВЗ із урахуванням руху границь, підвищення апроксимації за часом, введення корекції стисливості для

течій малої швидкості. За допомогою розрахункового методу інтегруються рівняння Нав'є-Стокса, які записані у формі законів збереження для довільного об'єму $V(t)$:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho dV + \iint_{S(t)} \rho \vec{A} \vec{n} dS &= 0, \\ \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \vec{u} dV + \iint_{S(t)} \rho \vec{u} \vec{A} \cdot \vec{n} dS + \iint_{S(t)} \hat{\tau} \cdot \vec{n} dS &= 0, \\ \frac{d}{dt} \int_{V(t)} e dV + \iint_{S(t)} e \vec{A} \cdot \vec{n} dS + \iint_{S(t)} (\hat{\tau} \vec{u}) \cdot \vec{n} dS - \iint_{S(t)} (\vec{q} \cdot \vec{n}) dS &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Тут $\vec{A} = \vec{u} - \vec{v}_T$ – відносна швидкість руху газу через границю об'єму, що рухається; $\rho, \hat{\tau}, e, \vec{q}$ – густина, тензор напруження, внутрішня енергія, тепловий потік. Система (1) приводиться до системи диференціальних рівнянь в узагальненій криволінійній системі координат $\psi_i = (\xi, \eta, \zeta)$, осереднюється по Рейнольдсу-Фавру й замикається диференціальною моделлю турбулентності. До неї застосовується кінцево-об'ємна апроксимація по відомому методу Біма-Уормінга згідно з різницевою схемою М. Іванова.

Апроксимація 2-го порядку за часом введена для рішення нестационарної задачі про еволюцію газової суміші в тракті і циліндрі ДВЗ в умовах рухомих границь. За неявним алгоритмом для всієї розрахункової області застосовується процедура подвійного кроку за часом, в якій у рамках глобального кроку за фізичним часом t збіжність досягається шляхом застосування серії локальних кроків за псевдочасом τ , який є індивідуальним для кожної комірки, що забезпечує високу ефективність алгоритму при розрахунку зміни параметрів на один крок фізичного часу

$$\partial Q / \partial t \approx \Delta Q / \Delta \tau + \left[3(Q^m + \Delta Q) - 4Q^n + Q^{n-1} \right] / 2\Delta t. \quad (2)$$

Індекси m, n суть лічильники по псевдочасу й фізичному часу. При обчисленні приросту ΔQ вектора консервативних змінних $Q = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e)^T$ поля величин Q^m, Q^n, Q^{n-1} у момент псевдочасу $m\Delta t$ й у моменти фізичного часу $n\Delta t, (n-1)\Delta t$ вважаються відомими.

Алгоритм корекції стисливості для течій малої швидкості (С. Merkle) забезпечує зменшення жорсткості матриці конвективного оператора в рівняннях Нав'є-Стокса за допомогою корекції власних значень матриць Якобі D_ψ^m для малих чисел Маха. Для цього вводиться вектор примітивних змінних $q_T = (p, u, v, w, T)^T$ через перетворення $dQ = \Gamma_T dq_T$. При підстановці отриманих формул у різницеву схему виходить неявне різницеве рівняння для приросту вектора консервативних змінних ΔQ у загальній формі

$$\hat{\Gamma}_T \frac{\Delta q_T}{\Delta t} + \frac{3(Q^m + \Delta Q) - 4Q^n + Q^{n-1}}{2\Delta t} + \delta_\xi E^{m+1} + \delta_\eta F^{m+1} + \delta_\zeta G^{m+1} = RHS_\psi(Q^n, Q^{n-1}), \quad (3)$$

де δ_ψ - диференціальні оператори по напрямках ψ_i ; $RHS_\psi(Q^n, Q^{n-1})$ - права частина різницевої формули, що містить в'язкі члени; $\hat{\Gamma}_T$ - матриці корекції стисливості. Основним параметром корекції стисливості є місцеве число Маха, що обирається по характерному розміру течії, місцевій швидкості звуку. Права частина схеми обчислюється явно. Ліва частина лінеаризується й отриманий оператор факторизується по просторовим змінним

$$\left[I + \Delta t \Gamma_T \Phi_T^{-1} \sum_{(\psi)} D_\psi^m \delta_\psi \right] \Delta Q \approx \prod_{(\psi)} (I + \Delta t \Gamma_T \Phi_T^{-1} D_\psi^m \delta_\psi) \Delta Q = \Gamma_T \Phi_T^{-1} RHS^m. \quad (4)$$

Далі виконується розщеплення діагональних матриць Λ_ψ і матриць Якобі D_ψ^m на складові матриці зі знаковизначеними власними значеннями. Метод і схема зводять різницеву задачу до трьохдіагональних систем алгебраїчних рівнянь, які розв'язуються за допомогою скалярних прогонок.

Конвективні члени різницевої схеми розраховуються через вектори потоків на межах комірок, обчислених на основі рішення задачі Рімана про розпад довільного розриву, для чого використовувався варіант лінеаризованого рішення (P. Roe). Екстраполяція параметрів вектору Q на грані комірок виконується із застосуванням похідних, обчислених по ENO алгоритму (J. Yang) з 2-м порядком точності по простору. Просторові похідні у «в'язких» членах апроксимуються з 2-м порядком точності за допомогою центральних різниць.

В задачах газообміну використовувалося рівняння стану $p = \mathbf{R}pT$ с газовою сталою $\mathbf{R} = C_p - C_v$. Коефіцієнт теплоємності газу C_v передбачався кусочно-лінійним по температурі у процесі стиснення. Для підвищення економічності розрахунків течій газу в циліндрі на такті стиснення використовувалося спрощення щодо сталості температури у об'ємі циліндра для даного кроку за часом при обчисленні C_v .

Модель розрахункової області і принцип деформування сітки (рис. 1, 2). Область, що досліджується, розділена на стаціонарну та рухому зони і зону деформації сітки (рис. 2). Існування зон пояснюється наявністю примежового шару біля твердих границь розрахункової області й динамічною модифікацією сітки. Сітка є гексаедральною зі згущенням поблизу твердих границь розрахункової області; висота мінімальної комірки примежового шару становить ~ 0.01 мм. Модифікація сітки реалізована пошаровою динамічною зміною шляхом стиску/розтягування, або об'єднання/поділу паралельних шарів комірок, що знаходяться біля рухомої границі. Перерахування параметрів

при об'єднанні/поділу комірок і перерахування вузлів реалізовані простою інтерполяцією уздовж осьової координати. Постійна швидкість деформації шару сітки або границі елементарного об'єму враховується відповідно до вихідної системи рівнянь у відносних швидкостях переносу потокових членів різницевої схеми. На явному етапі схеми врахування здійснюється при рішенні задачі Рімана. У неявній частині схеми швидкості переносу присутні в матрицях Якобі D_{ψ}^m . Положення поршня та клапана перераховується залежно від кута повороту колінчастого вала (п.к.в.)

Підрозділ 2.2 присвячений тестуванню розрахункового методу в умовах усталеної і нестационарної течії, шляхом зіставлення з експериментальними даними, отриманими проф. Whitelaw J.H. (Imperial College, Лондон) методом лазерної доплеровської анемометрії потоку на виході клапанної щілини й у циліндрі двигуна (рис. 3, 4).

Аналіз результатів тестування показав, що розрахунковий метод дає задовільні результати при моделюванні усталеної і нестационарної течії газу і може використовуватися для рішення задач газодинаміки ДВЗ; SST модель дає кращі результати визначення турбулентних пульсацій у порівнянні з SA.

Третій розділ роботи присвячений дослідженню газодинамічних характеристик двофункціональних впускних каналів малолітражного високооборотного дизеля (рис. 5). У даному розділі метою дослідження було вдосконалення аеродинамічних характеристик впускних каналів, які повинні забезпечити максимальну витрату повітря і створити закручення заряду відносно осі циліндра з ефективним вихровим відношенням для поліпшення умов сумішотворення при безпосередньому упорскуванні палива в КЗ.

Для рішення цього завдання були проведені розрахункове й експериментальне дослідження методом статичної продувки впускних каналів. Досліди проводилися на експериментальній установці ХКБД, яка дозволяла вимірювати витрату повітря та крутний момент на лопатках спрямляючої решітки, що створюється закрученим потоком повітря (рис. 5, б). Обробка цих даних дозволяла обчислити вихрове відношення і коефіцієнт витрати каналу.

У розрахунковому дослідженні різницевою сіткою зі згущенням до твердих границь описувався проточний простір впускних каналів і циліндра, а також область зі спрямляючою решіткою для зіставлення з експериментом по величині крутного моменту і витрати повітря (рис. 5, а). Початкові геометричні параметри розрахункової моделі дослідження відповідали геометричним характеристикам чотириклапанної головки циліндрів вихрокамерного дизеля 4 Ч 8,8/8,2 серії ДТ (ХКБД). На вході в канали виставлялися сталі значення повного тиску й повної температури, що відповідали даним експериментальних продувок. На вихідній границі розрахункової області виставлялися атмосферні умови.

Розрахунки показали, що момент має пульсаційний характер, тому в роботі й при зіставленні з експериментом використовувалися його осереднені

значення. Нестационарність характеристик потоку в циліндрі в основному спостерігається до попадання потоку в зону спрямлюючої решітки. Дослідження газодинаміки окремо для тангенціального каналу (рис. 6, 7) показали, що закручення заряду приблизно лінійно залежить від величини підйому клапана.

Розбіжності розрахункових і експериментальних даних по витраті повітря й моменту на решітці не перевищили 5%. Значне збільшення закручення заряду досягається шляхом зменшення висоти циліндричної частини сідла клапана.

При дослідженні і вдосконаленні впускних каналів основна увага приділялася гвинтовому каналу (рис. 8, 9), тому що він вносить основний вклад у закручення заряду відносно осі циліндра. Особливістю конструкції чотириклапанної головки циліндрів було те, що напрямна втулка клапана тангенціального каналу перетинає проточну частину гвинтового каналу (рис. 5, а).

Дослідження форми частини каналу, що підводить повітря до надклапанної камери, показали, що є можливість збільшити витрату повітря на 20% і закручення заряду на 25% у порівнянні з базовим варіантом. Встановлено, що основними параметрами надклапанної камери гвинтового каналу є кут закручення спіралі $\varphi_{сп}$ і кут γ , що характеризує розташування перетину сполучення надклапанної камери з частиною каналу, яка підводить до неї повітря (рис.10). Показано, що рівень закручення заряду в основному залежить від кута закручення спіралі – чим менше $\varphi_{сп}$, тим вище закручення. Витрата повітря в основному визначається положенням перетину сполучення – зі збільшенням кута γ зростає витрата повітря (рис. 10). Раціональний вибір значень параметрів надклапанної камери ($\varphi_{сп}=150^\circ$, $\gamma=120^\circ$) дозволяє збільшити закручення заряду для гвинтового каналу в 2,5 рази при незначному зниженні витрати повітря у порівнянні з базовим варіантом.

Дослідження аеродинамічної взаємодії тангенціального й гвинтового каналів показало, що клапанні щілини можна умовно розділити на зони по ступеню впливу на закручення заряду в циліндрі. Найбільшу площу клапанних щілин займають зони витікання повітря, які власне не впливають на закручення заряду, а беруть участь тільки в наповненні циліндра. Взаємодія двох каналів не призводить до істотного зниження закручення заряду в циліндрі у порівнянні з закрученням, що створюється тільки гвинтовим каналом. За результатами статичних продувок встановлено, що, завдяки раціональному взаємному розташуванню і поліпшеній геометрії впускних каналів при їх спільній роботі, вихрове відношення в циліндрі на різних режимах роботи досягає значень $2 \div 2,16$. Результати досліджень показали, що збільшення максимального підйому клапана більше 8 мм є нераціональним, тому що не супроводжується суттєвим збільшенням закручення заряду і витрати. Більш раціональним є кут нахилу фаски впускних клапанів 45 град., у порівнянні з кутом 30

град., тому що йому відповідають більш високі (~ на 15%) значення вихрового відношення на всіх режимах роботи двигуна.

Четвертий розділ роботи присвячений дослідженню процесів наповнення й стиску на прикладі модифікованого малолітражного високообертового дизеля 4ДТНА2 з чотириклапанною головкою циліндрів та безпосереднім упорскуванням палива в КЗ.

Розрахункова область моделювалася з урахуванням руху клапанів і поршня. Розрахунки проводилися для базового й удосконаленого варіантів гвинтового каналу, з двома варіантами КЗ, а також з виїмками під клапани в днищі поршня та без них (рис. 11). Форма КЗ обиралася за результатами аналізу типів КЗ, які використовуються на сучасних малолітражних високообертових дизелях. На вхідній границі впускних каналів тиск і температура гальмування задавалися постійними.

Розрахунки процесу наповнення показали, що виїмки під клапани в днищі поршня й форма КЗ не впливають істотно на рівень швидкостей в циліндрі. Поліпшена форма гвинтового каналу призводить до значного зростання (до 30%) рівня швидкостей після 90 град. п.к.в. Структура взаємодії повітря, що витікає з клапанних щілин в циліндр, на протязі процесу наповнення змінюється не істотно. Потік з високими тангенціальними швидкостями зосереджується біля днища поршня і днища головки циліндрів. В області КЗ на такті впуску не створюється визначеної структури течії.

Розрахунки процесу стиску показали, що наявність виїмок під клапани в днищі поршня істотно знижують закручення заряду у кінці такту стиску (до 30%). Збільшення об'єму КЗ на 15% (варіант Б на рис. 11) призводить до зниження рівня значень всіх компонентів швидкості на 10-15%. Поліпшена форма гвинтового каналу призводить до збільшення тангенціальної швидкості заряду у кінці такту стиску на 25-30% (рис. 12).

По завершенню такту стиску заряд з максимальними тангенціальними швидкостями зосереджується у верхній частині об'єму КЗ, а у стінок КЗ тангенціальна швидкість заряду істотно знижується.

П'ятий розділ роботи присвячений дослідженню процесу вихроутворення в напіврозділених КЗ на прикладі дизеля 4 ЧН 8,8/8,2. Для цього моделювався такт стиску на вісесиметричній моделі (рис. 13 - 15). Початкове положення поршня відповідало моменту закриття впускних клапанів. Як початкові умови для розрахунку задавалися повний тиск і повна температура, а також розподіл швидкостей заряду в розрахунковій області моделі. Радіальна і осьова компоненти швидкості задавалися рівними нулю. Значення тангенціальної складової швидкості задавалися відповідно до закону руху твердого тіла по відомій величині початкового вихрового відношення H , яке відповідає початку процесу стиску.

Дослідження впливу вихрового відношення на газодинаміку потоку показало, що при відсутності осьового закручення заряду при витисненні з над-

поршневого простору повітря закручується в КЗ проти годинної стрілки (рис. 14). При підвищенні початкового вихрового відношення до $H = 3$ заряд закручується в протилежну сторону. Це пов'язано з тим, що в умовах осьового закручення заряду на нього діють відцентрові сили інерції, які при витисненні заряду з надпоршневого простору притискають його до бокової стінки КЗ, і потік продовжує рух за годинною стрілкою (рис. 14). При початковому закрученні заряду з вихровим відношенням $H = 1 \div 2$ у КЗ утворюються два вихори - один біля кромки, а другий ближче до осі циліндра. Даний ефект впливає на рівень швидкостей у різних точках КЗ та на рівень кінетичної енергії заряду. При збільшенні вихрового відношення зона максимуму швидкостей зміщується ближче до стінки КЗ, що є більш кращим в умовах об'ємно-плівкового сумішоутворення, тому що стінка КЗ більш інтенсивно омивається повітряним зарядом (рис. 13).

Розрахунки показують, що при збереженні вихрового відношення приблизно на однаковому рівні зміна обертів двигуна суттєво не впливає на структуру течії, а призводить тільки до пропорційного збільшення рівня швидкостей в КЗ у кінці такту стиску.

Відомо, що при відсутності закручення заряду наявність фаски або скруглення кромки КЗ призводить до зниження рівня швидкостей в КЗ у кінці такту стиску. Розрахунки показують, що з появою закручення заряду відносно осі циліндра наявність фаски або скруглення кромки призводить до зміщення зони максимуму швидкості до стінки КЗ, тому потік біля стінок КЗ рухається з більшими швидкостями (рис. 15). Однак при цьому спостерігається незначне зниження інтенсивності руху заряду в радіально-осьовому напрямку.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні поставлена та вирішена науково-практична задача з вдосконалення аеродинамічних характеристик впускних каналів і КЗ малолітражних високооберткових дизелів з використанням математичної моделі течії газу у впускному тракті і циліндрі двигуна (на прикладі дизеля 4 ЧН 8,8/8,2). Розв'язання даної задачі дозволило одержати наступні наукові і практичні результати:

1. На основі розрахункових і експериментальних досліджень доведено, що урахування у математичній моделі руху границь, підвищення апроксимації за часом до другого порядку точності, введення корекції стисливості для течій малої швидкості дозволяють проводити розрахунки взаємозалежних тривимірних нестационарних в'язких турбулентних течій у впускних каналах і циліндрі ДВЗ та підвищити їх точність.

2. На підставі аналізу результатів розрахункових та експериментальних досліджень доведено, що шляхом введення алгоритму деформування сітки, руху поршня та клапанів у програмний комплекс *MTFS*, він дозволяє отрима-

ти необхідні дані для розрахунку процесу сумішоутворення та обґрунтувати вибір раціональних геометричних характеристик впускних каналів і КЗ.

3. За результатами верифікації двох моделей турбулентності для розрахунку задач газодинаміки ДВЗ доведено, що кращою за критерієм точності визначення інтенсивності турбулентних пульсацій є модель *SST* у порівнянні з моделлю *SA*.

4. За результатами розрахунків доведено, що виконання уточнених вимог до геометричних характеристик гвинтового і тангенціального впускних каналів дає змогу підвищити інтенсивність вихрового руху заряду без значного зниження витрати повітря. Застосування отриманих даних дозволило на прикладі впускних каналів дизеля 4ЧН 8,8/8,2 збільшити закручення заряду в 2,5 рази при збереженні масової витрати повітря на тому ж рівні.

5. На основі розрахунково-експериментальних досліджень для дизеля 4 ЧН 8,8/8,2 (4ДТНА2):

- обґрунтовано вибір форми впускних каналів, клапанів і КЗ, що дозволяє підвищити витрату повітря і величину вихрового відношення;

- визначено раціональне значення висоти підйому клапанів, при якому подальше її збільшення не призводить до істотного підвищення витрати повітря й вихрового відношення.

6. Шляхом чисельного моделювання визначено вплив інтенсивності закручення заряду відносно осі циліндра на процес вихроутворення в напіврозділеній КЗ у кінці такту стиску. Отримані результати можуть бути використані для розрахунків процесу сумішоутворення в КЗ з подібними геометричними характеристиками.

7. Встановлено механізм впливу кромки КЗ на структуру течії повітря в КЗ при наявності початкового закручення заряду відносно осі циліндра. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні КЗ малолітражних високооберткових дизелів для зниження аеродинамічних втрат і поліпшення умов сумішоутворення.

8. Результати досліджень і елементи програмного комплексу впровадженні у Казенному підприємстві “Харківське конструкторське бюро з двигунобудування”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Солодов В.Г. Численна модель течення вблизи впускного клапана ДВС / В.Г. Солодов, Ю.В. Стародубцев, А.А. Хандримайлов // Двигуни внутрішнього згоряння. – Харків: НТУ “ХПІ”. –2004. – № 2. – С. 81–84.

Здобувачем проведено тестування розрахункового методу для усталених течій, шляхом зіставлення з експериментальними даними, отримана залежність характеристики витрати й структури течії поблизу впускного клапана від особливостей впускного тракту.

2. Хандримайлов А.А. Исследование структуры газового потока в щели впускного клапана ДВС / А.А. Хандримайлов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков: ХНАДУ. – 2004. – № 26. – С. 28–31.

3. Хандримайлов А.А. Численное моделирование нестационарного газового течения при наполнении цилиндра ДВС / А.А. Хандримайлов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков: ХНАДУ. – 2005. – № 29. – С. 209–212.

4. Солодов В.Г. Расчетное и экспериментальное исследование газодинамических характеристик впускного тракта и цилиндра дизеля 1ДТНА2 / В.Г. Солодов, Ю.В. Стародубцев, А.А. Хандримайлов, А.В. Грицюк, В.А. Опалев // Автомобильный транспорт. – Харьков: ХНАДУ. – 2005. – № 16. – С. 253–256.

Здобувач брав участь в експерименті ХКБД по продувці впускних каналів на статичних моделях; здобувачем виконане чисельне моделювання установленої в'язкої течії у впускних каналах складної геометрії.

5. Хандримайлов А.А. Структура течения воздушного заряда в цилиндре дизеля на такте впуска и сжатия / А.А. Хандримайлов, В.Г. Солодов // Двигуни внутрішнього згорання. – Харків: НТУ “ХП”. – 2006. – №1. – С. 89–93.

Здобувачем виконане чисельне моделювання газової течії у впускних каналах, циліндрі й КЗ на тактах впуску й стиску.

6. Хандримайлов А.А. Численное моделирование процесса статической продувки впускных каналов и нестационарного течения в цилиндре двигателя внутреннего сгорания / А.А. Хандримайлов, В.Г. Солодов // Промислова гідроліка і пневматика. – Вінниця: ВГАУ. – 2007. – № 15. – С. 25–28.

Здобувачем проведено чисельне дослідження газодинаміки турбулентної течії в'язкого газу у впускних каналах ДВЗ в стаціонарній і нестационарній умовах.

7. Хандримайлов А.О. Дослідження процесів вихроутворення в напіврозділених камерах згорання дизельних двигунів / А.О. Хандримайлов // Вісник Національного транспортного університету. – 2007. – № 14. – С. 232–235.

8. Грицюк А.В. Исследование газодинамических характеристик впускных каналов дизеля при его разработке / А.В. Грицюк, С.А. Алехин, В.А. Опалев, В.Г. Солодов, А.А. Хандримайлов // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей : X междунар. науч.-практическая конф. – Владимир: ВлГУ. – 2005. – С. 113–124.

Здобувач брав участь у дослідженні й доведенні впускних каналів дизеля 4ДТНА2 методом статичної продувки; здобувачем виконане чисельне моделювання газової течії у впускних каналах.

9. Хандримайлов А.А. Газодинамическая обработка впускных каналов экспериментального быстроходного дизеля на компьютерной модели / А.А. Хандримайлов, В.Г. Солодов // Транспорт, экология – устойчивое развитие :

ХІІ междунар. науч.-техн. конф., Варна, 18 – 20 мая 2006 г. – 2006. – № 13. – С. 145–152.

Здобувачем за допомогою моделювання течії газу проаналізована просторова структура течії у тангенціальному й гвинтовому каналах і циліндрі з решіткою, що спрямляє потік.

10. Хандримайлов А.А. Численное моделирование сжимаемых вязких турбулентных течений во впускных каналах и цилиндрах поршневых двигателей / А.А. Хандримайлов, В.Г. Солодов // *Аэрогидродинамика : проблемы и перспективы*. – Х.: Нац. аэрокосмич. ун-т “ХАИ”. – 2006. – № 2. – С. 212–233.

Здобувачем проведено дослідження структури течії у впускних каналах і КЗ різної форми, виконаний пошук їхньої раціональної форми, проведено зіставлення з експериментальними даними.

11. Khandrymailov A.A. Air charge flow pattern in a diesel cylinder during the admission and compression stroke / A.A. Khandrymailov, V.G. Solodov // *Транспорт, екологія – устойчивое развитие : XIII междунар. науч.-техн. конф.*, Варна, 10 – 12 мая 2007 г. – 2007. – № 14. – С. 539–547.

Здобувачем проаналізована просторова структура течії повітря в циліндрі на тактах впуску й стиску.

АНОТАЦІЇ

Хандримайлов А.О. Вдосконалення аеродинамічних характеристик впускних каналів і камери згоряння малолітражних високообертових дизелів. – 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 питанням вдосконалення аеродинамічних характеристик впускних каналів і КЗ малолітражних високообертових дизелів методом чисельного моделювання нестационарної газової течії.

На підставі огляду літературних джерел зроблений висновок про те, що методи чисельного моделювання течії на основі рішення загальних рівнянь газової динаміки є найбільш перспективними в області дослідження газодинаміки впускних каналів і процесів вихроутворення в циліндрі й камері згоряння. У роботі представлено розробку математичної моделі течії газу у впускному тракті і циліндрі двигуна й програмного комплексу для рішення задач газодинаміки ДВЗ із урахуванням руху границь, підвищення апроксимації за часом до другого порядку точності, введення корекції стисливості для течій малої швидкості. Проведено верифікацію розрахункового методу й отримані задовільні результати. Проведено розрахункове й експериментальне дослідження зі статичної продувки впускних каналів чотириклапанної головки циліндрів малолітражного високообертового дизеля. За результатами досліджень уточнено вимоги до геометричних характеристик впускних каналів,

виконання яких забезпечує підвищення інтенсивність вихрового руху заряду без значного зниження коефіцієнта наповнення, а також обґрунтований вибір раціональної форми досліджуваних впускних каналів і клапанів, що дозволяє знизити аеродинамічний опір і підвищити величину вихрового відношення. Виконано чисельне моделювання процесів впуску й стиску. Проаналізовано просторову структуру течії газу у впускних каналах, циліндрі й КЗ. За результатами розрахунків проаналізовано вплив геометричних і режимних параметрів на процес вихроутворення в циліндрі й КЗ.

Ключові слова: дизель, газодинаміка, впускний канал, камера згоряння, нестационарна течія, аеродинамічні характеристики.

Хандримайлов А.А. Усовершенствование аэродинамических характеристик впускных каналов и камеры сгорания малолитражных высокооборотных дизелей. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”. – Харьков, 2008.

Диссертация посвящена вопросам усовершенствования аэродинамических характеристик впускных каналов и камеры сгорания малолитражных высокооборотных дизелей методом численного моделирования вязкого нестационарного течения газа.

На основании обзора литературных источников сделан вывод, что методы численного моделирования течения на основе решения общих уравнений газовой динамики являются наиболее перспективными в области исследования газодинамики впускных каналов и процессов вихреобразования в цилиндре и камере сгорания, однако трехмерные расчетные модели вязкого турбулентного нестационарного течения сжимаемого газа во впускных каналах и цилиндре с учетом движения клапанов и поршня отсутствуют.

В работе представлена разработка математической модели течения газа во впускном тракте и цилиндре двигателя и программного комплекса для решения задач газодинамики ДВС с учетом движения границ, повышения аппроксимации по времени до второго порядка точности, введения коррекции сжимаемости для низкоскоростных течений. Проведена верификация расчетного метода и получены удовлетворительные результаты. Показаны результаты моделирования турбулентных пульсаций с использованием различных моделей турбулентности.

Проведены расчетное и экспериментальное исследования по статической продувке впускных каналов четырехклапанной головки цилиндров малолитражного высокооборотного дизеля. По результатам исследований:

- уточнены требования к геометрическим характеристикам винтового и тангенциального впускных каналов, выполнение которых обеспечивает увеличение интенсивности вихревого движения заряда, без значительного сни-

жения коэффициента наполнения. Применение полученных данных позволило на примере впускных каналов дизеля 4 ЧН 8,8/8,2 увеличить закрутку заряда в 2,5 раза при сохранении массового расхода на том же уровне;

- обоснован выбор рациональной формы впускных каналов, клапанов и камеры сгорания, позволяющий снизить потери кинетической энергии и повысить величину вихревого отношения;

- определено рациональное значение максимальной высоты подъема клапанов, при котором ее дальнейшее увеличение не приводит к существенному повышению расхода воздуха и вихревого отношения.

По результатам численного моделирования процессов впуска и сжатия:

- проанализирована пространственная структура течения во впускных каналах, цилиндре и камере сгорания;

- установлено влияние интенсивности закрутки заряда относительно оси цилиндра на процесс вихреобразования в полуразделенной КС к концу такта сжатия; полученные результаты могут быть использованы для расчетов процесса смесеобразования в КС с подобными геометрическими характеристикам;

- установлен механизм воздействия кромки КС на структуру течения воздуха в КС при наличии начальной закрутки заряда относительно оси цилиндра. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании КС малоразмерных быстроходных дизелей для снижения аэродинамических потерь и улучшения условий смесеобразования.

Ключевые слова: дизель, газодинамика, впускной канал, камера сгорания, нестационарное течение, аэродинамические характеристики.

Khandrymailov A.O. Improvement of aerodynamic characteristics of inlet ports and a combustion chamber of small-capacity high-rotation rate diesels. - Manuscript.

Thesis for a candidate degree by specialty 05.05.03 – engines and power plants. – National technical university “Kharkiv polytechnical institute”. – Kharkiv, 2008.

The dissertation is devoted to aerodynamic improvement of intake ports and combustion chambers of small-capacity high-rotation rate diesels by means of numerical simulation of the unsteady gas flow. The overview shows that methods of numerical simulation of the gas flow are the most perspective for the solution of engine gasdynamics problems. These methods allow to investigate both the gasdynamics of intake ports and the process of swirl generation in the cylinder. The development of the computation model of the gas flow in intake ports and a cylinder and the software for the solution of diesel gasdynamics problems is presented taking into consideration the movement of borders, the dual time stepping and the correction of compressibility for low velocity flows. The verification of the computation method has been carried out with the satisfactory results. The computations and experimental investigations of the steady flow through the intake ports of the

four-valve cylinder head of a small-capacity high-rotation rate diesel have been carried out. The requirements for geometrical characteristics of the inlet ports have been specified in order to increase the swirl intensity without decreasing of the gas admission. The results of the investigations allow to justify the selection of the rational form of the intake ports and valves in order to decrease their aerodynamic resistance and to increase the swirl intensity. The calculations of the admission and compression processes have been carried out. Three-dimensional structure of the gas flow in the intake ports, the cylinder and the combustion chamber has been analyzed. The results of the computations allow to define the effect of the geometrical and operation parameters on the process of the swirl generation in the cylinder and combustion chamber.

Keywords: diesel, gasdynamics, inlet port, combustion chamber, unsteady flow, aerodynamic characteristics.