УДК 621.436

Касімов А.М., Серпухов О.В., канд. техн. наук; Коритченко К.В., д-р техн. наук; Пархомчук О.В.

МОДЕЛЮВАННЯ СТИСНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ЗАРЯДУ З ТЕМПЕРАТУРНИМ ГРАДІЄНТОМ У ДИЗЕЛЬНОМУ ДВИГУНІ ТИПУ 6ТД

Постановка проблеми. Потужні дизельні двигуни, які використовуються в якості силових установок на зразках бронетанкового озброєння та техніки, мають різноманітні за способами дії пристрої і системи полегшення пуску в умовах низьких температур. Головним завданням вищевказаних пристроїв і систем є забезпечення надійного самозаймання палива та, відповідно, надійного запуску двигуна. Для вирішення цього завдання до складу пристроїв і систем полегшення пуску в умовах низьких температур входять підігрівачі повітря різноманітних типів дії. Але, як правило всі ці підігрівачі здійснюють підігрівання всього повітряного заряду, що в свою чергу призводить до збільшення часу підігрівання, великих втрат тепла на шляху переміщення повітря до камери згорання двигуна, великих енерговитрат на живлення підігрівачів, і не забезпечують надійного запуску двигунів у холодну пору року в умовах обмеженого часу. Це суттєво знижує бойову готовність танкових підрозділів.

Якщо підігрівати тільки частку повітряного заряду то ефективність роботи і енергоефективність підігрівачів значно зросте, але існує ризик змішування цієї частки з основним повітряним зарядом в циліндрі двигуна під час такту стиску і, як наслідок, не створення в циліндрі двигуна в кінці такту стиску температури, за якої забезпечується надійне самозаймання палива.

Актуальним є завдання прогнозування полів температури, тиску та концентрації компонентів повітряного заряду з початковим температурним градієнтом під час стиснення в циліндрі двигуна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання процесів стиснення повітряного заряду проводиться з метою підвищення ефективності робочого процесу у деяких типах поршневих двигунів. Експериментальні дослідження процесу стиснення з охолодженням повітряного заряду виконані в роботі [1]. Запропоновано теоретичне обґрунтування зменшення більш ніж у два рази максимальної температури і тиску в кінці процесу стиснення і більш ніж на 20% витрат роботи на стиснення повітряного заряду за рахунок охолодження заряду шляхом розпилювання води. Але це не є актуальним для дизельних двигунів, у яких вирішальним фактором працездатності є досягнення високої температури в кінці такту стиску, особливо в умовах холодного пуску.

Математична модель, яка описана у роботі [2], дозволяє досліджувати процеси згорання у дизельному двигуні, що відбувається в умовах релаксації енергії коливального збудження у повітряному заряді порівняно з попереднім підігріванням повітряного заряду на вході в циліндр двигуна. В даній моделі досягнуто підвищення тиску на 20 % у ВМТ для коливально-збудженого заряду, що забезпечує підвищення індикаторних показників на режимі холодного пуску не менш, ніж у 1,2 рази у порівнянні з підігріванням повітря за умови однакових витрат енергії. Але використання даної моделі можливе тільки за умови підігрівання всього повітряного заряду, що, як показує практика, є малоефективним і призводить до великих енерговитрат не забезпечуючи надійний запуск холодного двигуна.

© А.М. Касімов, 2018

Таким чином, для оцінки перспективності використання способу полегшення холодного пуску дизельного двигуна шляхом розігрівання лише частки повітряного заряду потребується розробка та чисельне дослідження процесу стиснення повітряного заряду в дизельному двигуні в умовах нерівномірного розігрівання.

Метою роботи є чисельне дослідження зміни полів температури, тиску та концентрації компонентів повітряного заряду з початковим температурним градієнтом під час стиснення.

Постановка задачі моделювання, початкові та граничні умови. В основу вирішення науково-технічної задачі прискореного холодного пуску дизельних двигунів запропоновано формування температурно-градієнтного заряду у його циліндрах [3]. Формування такого заряду здійснюється під час такту впуску за рахунок заповнення циліндру повітрям з різною температурою. Приймалось, що підігрівання заряду здійснювалось поза камерою згорання в результаті змішування холодного повітря з продуктами згорання. Під час такту стиску відбувається теплообмін між повітряним зарядом та стінками камери згорання, а також відбувається процес термодифузії у температурно-градієнтному заряді. Для надійного запалювання палива за таким методом пуску є важливим зростання температурного градієнту під час стиснення. Перевірка наявності умов для пуску двигуна в даній роботі здійснена шляхом чисельного 3D-моделювання процесу стиснення повітряного заряду у всесвітньовідомому та апробованому програмному середовищі ANSYS, ліцензованому в НТУ “ХПІ”. Постановка задачі моделювання здійснювалась стосовно двигуна 6ТД. Цей двигун є безклапанним, двотактним, опозитним із зустрічно-рухомими поршнями. Діаметр циліндра дорівнює 120 мм. Максимальна відстань між поршнями складає 245 мм.

Таким чином моделювалось стиснення газу, що здійснювалось двома поршнями, які синхронно рухаються назустріч один одному (рис. 1). Поршні задавались у вигляді плоских границь *1*, *2*, що є непроникненими для газу, та які рухаються. Перед початком стиснення частина газового заряду *3* являла собою повітря, а інша частина *4* заряду – є сумішь повітря з продуктами згорання вуглеців (CO_2, H_2O, N_2). Витоками газового заряду під час стиснення між поршнем та циліндром нехтувалось.

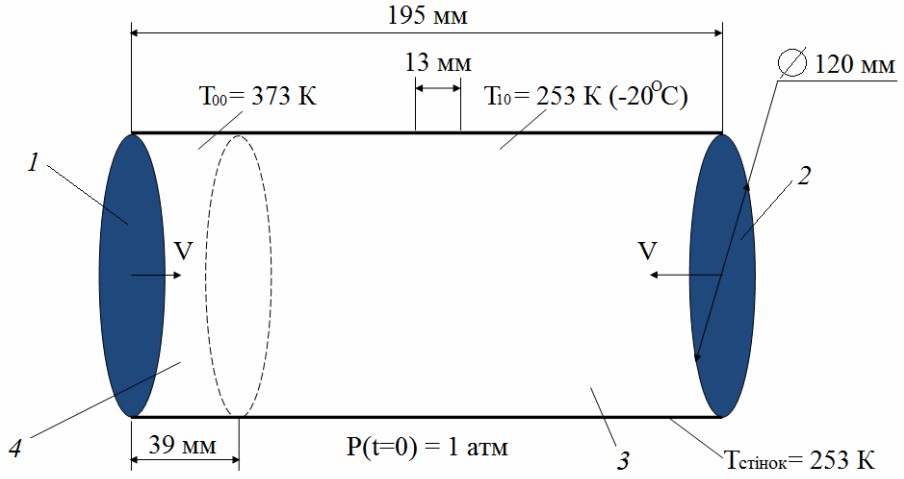

Рисунок 1 – Графічне зображення початкових умов моделювання

Початкова відстань між поршнями перед початком стиснення дорівнювала 195 мм. Ця відстань відповідає кутам закриття впускного та випускного вікон у двигуні 6ТД. Типова частота пускових обертів двигуна дорівнює 100-300 $хв^{-1}$. Шляхом перерахунку пускової частоти, та з урахування конструкції кривошипно-шатуного механізму, швидкість руху кожного з поршнів задавалась рівнянням $v(t) = 0{,}943 \cdot \sin(5\pi \cdot (t + 0{,}056))$ в м/с. Розрахунок здійнювався в інтервалі часу Δt = 0,144 с, що дорівнює часу такту стиску за прийнятих пускових обертів. Кінцева відстань між поршнями, що виникає у ВМТ, дорівнювала 13 мм. За цієї відстані кінцевий об'єм відповідає об'єму камери згорання двигуна 6ТД у ВМТ.

Розрахунок проведено за наступних початкових умов. Приймалось, що температура повітря, яке потрапляє у циліндр двигуна (область 3 на рис. 1) дорівнювала 253 К. Температура поверхонь, що формують об'єм стиснення, задавалась сталою на час стиснення та дорівнювала 253 К. Склад, температура та висота шару області підігрітого газу (суміш повітря з продуктами згорання вуглеців, що відповідає області 4 на рисунку 1, приймались наступними: температура дорівнювала 373 К, висота шару дорівнювала 39 мм, об'ємні частки компонентів суміші повітря з продуктами згорання $O_2/CO_2/H_2O/N_2$ відповідали співвідношенням 291/4/5/1190.

Основні рівняння математичної моделі. Для опису процесу стискання повітряного заряду в циліндрі двигуна використано модель однофазної багатокомпонентної течії. Для чисельного дослідження поставленої задачі використовується система рівнянь Нав'є – Стокса [4, 5, 6, 7], яка включає закони збереження маси, імпульсу та енергії нестаціонарної просторової течії в рамках підходу Ейлера в декартовій системі координат (x_i, $i = 1, 2, 3$), в загальному вигляді:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0\,, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0\,, \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}((\rho E + p)u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) = 0\,, \tag{3}$$

де ρ – густина, u – швидкість, t – час, p – тиск, E – енергія, τ – тензор напруг, q – тепловий потік, нижні індекси означають підсумовування за відмінних напрямків.

Тензор напруг розраховувався за виразом

$$\tau_{ik} = -2\mu\left(\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_\kappa}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_\kappa}\right) - \frac{1}{3} div\vec{u}\,\delta_{i\kappa}\right), \tag{4}$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості; $\delta_{i\kappa}$ – дельта Кронекера.

При обчисленні густини, тиску та ентальпії h шарового повітряного заряду використовуються правила змішування:

$$\frac{1}{\rho} = \sum_{b=1}^{B} \frac{1}{\rho_b}, \tag{5}$$

$$p = \sum_{b=1}^{B} p_b, \tag{6}$$

$$h = \sum_{b=1}^{B} c_b h_b, \tag{7}$$

де c – концентрація компоненти.

Для визначення концентрації компонентів у повітряному заряді система рівнянь (1-7) доповнена рівнянням для визначення концентрацій компонентів:

$$\frac{\partial \rho c_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho u_k c_b\right) = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\left(D_{ij} + D_{ij}^t\right)\frac{\partial c_b}{\partial x_k}\right), b = 1,2,...,B, \tag{8}$$

де c_b – концентрація b-го компоненту повітряного заряду $\left(\sum_{b=1}^{B} y_b = 1\right)$; D_{ij} та D_{ij}^t – коефіцієнти молекулярної і турбулентної дифузії, які підпорядковуються закону Фіка, так що $D_{ij} = D\delta_{ij}, D_{ij}^t = \delta_{ij}\frac{\mu_t}{\sigma}$.

Дифузійний тепловий потік моделюється за допомогою рівняння

$$q_k = -\left(\frac{\mu_l}{\Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma}\right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k}, \tag{9}$$

де μ_l – ламінарна в'язкість; μ_t – турбулентна в'язкість; Pr – число Прандтля; σ – число Шмідта; c_p – питома теплоємність за постійним тиском; T – температура.

Теплофізичні властивості рідкого середовища визначались за рівняннями стану, емпіричними та напівемпіричними залежностями. Тобто використовувались залежності густини, в'язкості, теплопровідності, питомих теплоємностей, коефіцієнтів дифузії компонентів рідкого середовища від тиску, температури і концентрації компонентів середовища.

Для рішення нестаціонарних рівнянь Нав'є-Стокса використано метод усереднення за Рейнольдсом.

Результати чисельного дослідження. Розподіл температури та концентрації вуглекислого газу CO_2 у повітряному заряді перед початком стиснення представлено на рис. 2. Дослідження цих параметрів дозволяє виявити вплив термічної та концентраційної дифузій на стан повітряного заряду під час його стиснення.

За результатами чисельного дослідження під час стиснення наявність температурного градієнта у повітряному заряді зберігається (рис. 3, 4). Зокрема, за 80 град. до ВМТ у шарі заряду, який мав початкову підвищену температуру 373 К, температура газу зростає до 550 К (рис. 3). У іншій частині заряду, де початкова температура дорівнювала 253 К, температура газу зростає до 400 К. У ВМТ температура шару з попереднім підігріванням досягає 1000 К, а у шарі без підігрівання досягає лише 600 К (рис. 4).

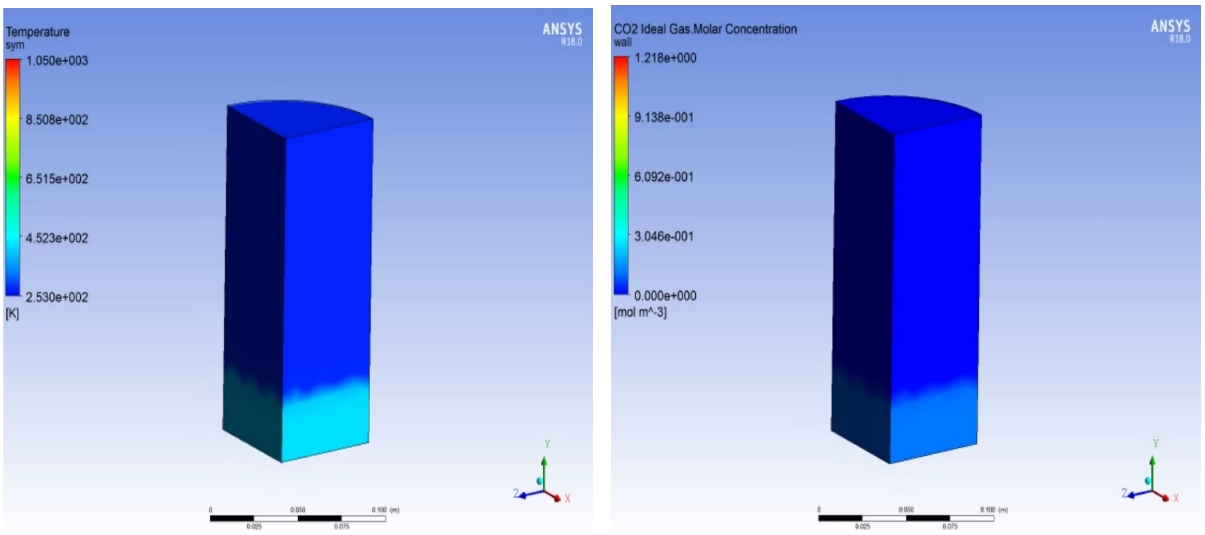

Рисунок 2 – Розподіл температури (ліворуч) та концентрації CO_2 (праворуч) у повітряному заряді перед початком стиснення

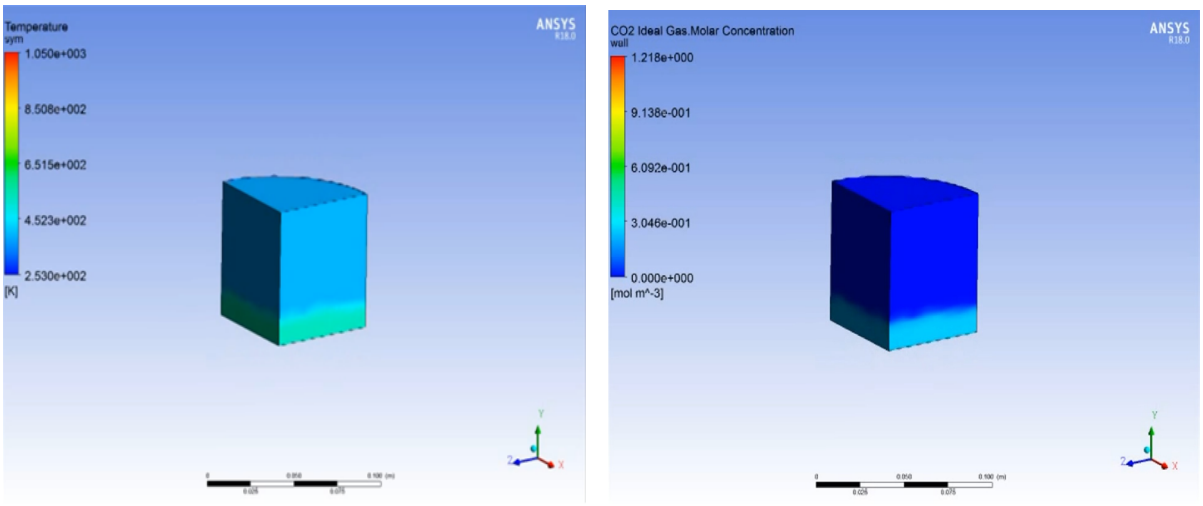

Рисунок 3 – Розподіл температури (ліворуч) та концентрації CO_2 (праворуч) у повітряному заряді за 80 град. до ВМТ

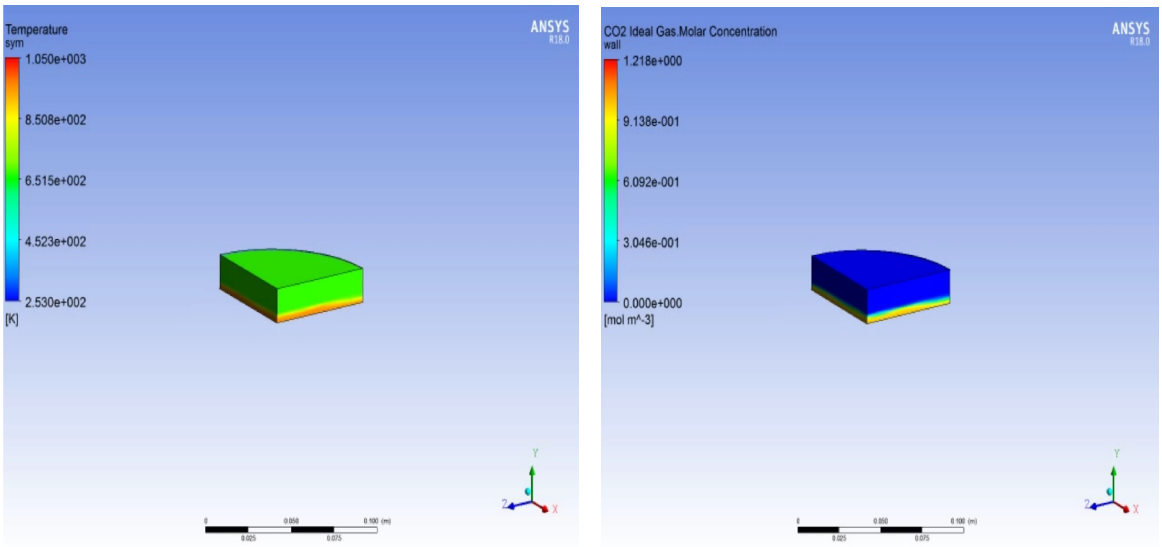

Рисунок 4 – Розподіл температури (ліворуч) та концентрації CO_2 (праворуч) у повітряному заряді у ВМТ

Таким чином, під час стиснення відбувається зростання різниці температур між шарами у заряді з 120 К до 400 К. При цьому, за результатами дослідження полів концентрації, змішування між шарами практично не відбувається.

Як перед початком стиснення, так і під час стиснення тиск у повітряному заряді зростає практично одночасно у різних шарах заряду (рис. 5). За результатами розрахунку маємо, що у двигуні 6 ТД на пускових обертах тиск у ВМТ досягає понад 3,5 МПа, що відповідає експериментальним даним.

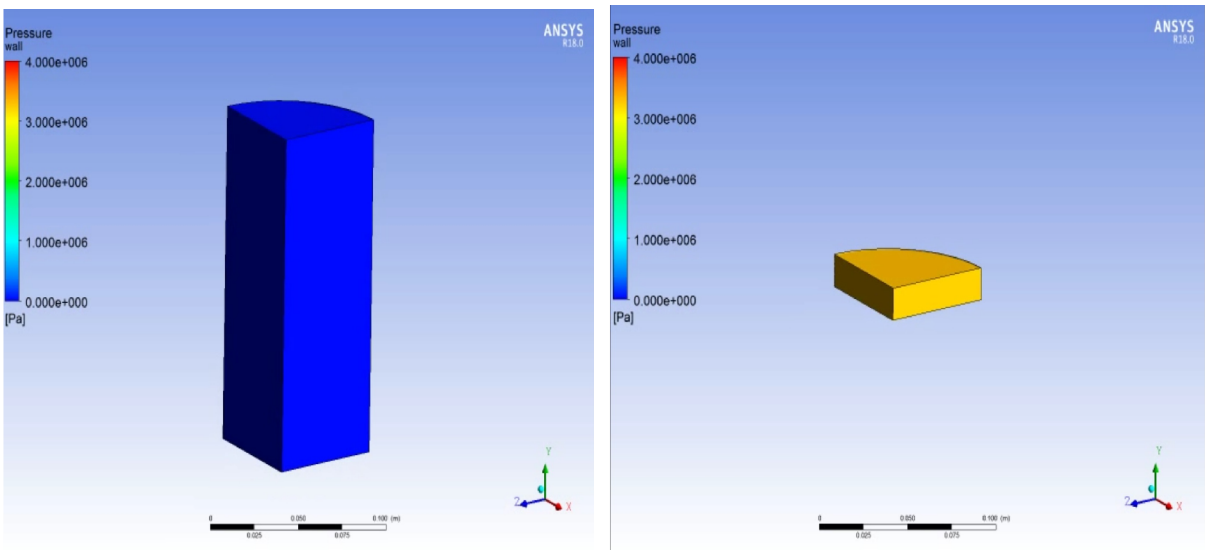

Рисунок 5 – Розподіл тиску газу у повітряному заряді у НМТ (ліворуч) та ВМТ (праворуч)

Відомо, що надійний запуск дизельного двигуна відбувається, коли температура заряду досягає 650 – 850 К. За отриманими результатами маємо, що умови для надійного запалювання палива у циліндрі двигуна виникають лише у шарі заряду з попередньо підвищеною температурою. Тобто, без підігрівання частки повітряного

заряду у двигуні, що досліджувався, умови для пуску двигуна не досягаються.

Таким чином, потрапляння палива у високотемпературний шар заряду призведе до його надійного самозаймання. Згорання палива у цьому шарі забезпечить подальше зростання тиску у камері згорання, чим буде досягнуто умови для самозаймання палива, яке потрапило у низькотемпературний шар заряду.

Висновок. Розроблена математична модель стиснення дозволила здійснити чисельне дослідження зміни полів температури, тиску та концентрації компонентів повітряного заряду з початковим температурним градієнтом у циліндрі двигуна 6ТД. За результатами дослідження виявлено, що під час стиснення повітряного заряду в дизельному двигуні в умовах нерівномірного розігрівання зберігається наявність температурного градієнта у повітряному заряді. За умови, коли температура шару у заряді має початкову температуру 373 К, у кінці такту стиску температура цього шару досягає 1000 К. За рахунок цього створюються умови для надійного самозаймання палива. Виявлено, що під час стиснення змішування між різними за температурою шарами газового заряду практично не відбувається. Тиск у ВМТ на пускових обертах досягає понад 3,5 МПа, що відповідає експериментальним даним.

У подальшому планується дослідження впливу завихрень повітря, що виникають у циліндрі двигуна в момент наповнення його повітряним зарядом внаслідок тангенціального нахилу бокових стінок впускних вікон циліндру [8], на стиснення повітряного заряду в циліндрі двигуна в умовах його нерівномірного розігрівання.

Література: ***1.*** *Белоусов Е В. Моделирование процесса сжатия с охлаждением воздушного заряда путём распыления воды в рабочем цилиндре ДВС / Е. В. Белоусов // Двигатели внутреннего сгорания [Научно-технический журнал. Харьков: НТУ «ХПИ»] – 2006.– №1. – С. 72 – 77.* ***2****. Марченко А. П. Математичне моделювання холодного пуску дизельних двигунів зі збудженим повітряним зарядом / А. П. Марченко, К. В. Коритченко, В. М. Замана, І. І. Сукачов, Ю. І. Кістерний // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Транспортне машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – № 18. – С. 112 – 119.* ***3.*** *Заявка на винахід України А2018 02175 від 03.03.2018р. «Пристрій для полегшення запуску дизельних двигунів» / Серпухов О. В., Коритченко К. В., Касімов А. М., Трофименко С. В.; заявник ВІТВ НТУ «ХПІ».* ***4****. Годунов С. К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др.[под ред. С. К Годунова] – М. : Наука, 1976. – 400 с.* ***5****. Пирумов У. Г. Численные методы газовой динамики / У. Г. Пирумов, Г. С. Росляков. – М : Высшая школа, 1987. – 232 с.* ***6****. Черный Г. Г. Газовая динамика / Черный Г. Г. – М. : Наука, 1988. – 424 с.* ***7****. Сергель О. С. Прикладная газодинамика / О. С. Сергель. – М. : Машиностроение, 1981. – 374 с.* ***8****. Алёхин С. А. Улучшение газодинамических характеристик впускных окон в двухтактном дизеле с противоположно движущимися поршнями типа 6ТД / С. А. Алёхин, В. А. Опалев, П. Я. Перерва // Двигатели внутреннего сгорания [Научно-технический журнал. Харьков: «НТУ ХПИ»] – 2006. – №1. – С. 78 – 81.*

Bibliography (transliterated): ***1****. Belousov E V. Modelirovanie processa szhatiya s ohlazhdeniem vozdushnogo zaryada putyom raspyleniya vody v rabochem cilindre DVS / E. V. Belousov // Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Nauchno-tekhnicheskij zhurnal. Har'kov: NTU «HPI»] – 2006.– №1. – S. 72 – 77.* ***2****. Marchenko A. P. Matematichne modelyuvannya holodnogo pusku dizel'nih dviguniv zi zbudzhenim povitryanim zaryadom / A. P. Marchenko, K. V. Koritchenko, V. M. Zamana, I. I. Sukachov, YU. I. Kisternij // Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu «HPI»: zb. nauk. pr. Temat. vip.: Transportne mashinobuduvannya. – Harkiv : NTU «HPI». – 2011. – № 18. –*

S. 112 – 119. ***3****. Zayavka na vinahid Ukraïni A2018 02175 vid 03.03.2018r. «Pristrij dlya polegshennya zapusku dizel'nih dviguniv» / Serpuhov O. V., Koritchenko K. V., Kasimov A. M., Trofimenko S. V.; zayavnik VITV NTU «HPI».* ***4****. Godunov S. K. CHislennoe reshenie mnogomernyh zadach gazovoj dinamiki / Godunov S. K., Zabrodin A. V., Ivanov M. YA. i dr.[pod red. S. K Godunova] – M. : Nauka, 1976. – 400 s.* ***5****. Pirumov U. G. CHislennye metody gazovoj dinamiki / U. G. Pirumov, G. S. Roslyakov. – M : Vysshaya shkola, 1987. – 232 s.* ***6****. CHernyj G. G. Gazovaya dinamika / CHernyj G. G. – M. : Nauka, 1988. – 424 s.* ***7****. Sergel' O. S. Prikladnaya gazodinamika / O. S. Sergel'. – M. : Mashinostroenie, 1981. – 374 s.* ***8****. Alyohin S. A. Uluchshenie gazodinamicheskih harakteristik vpusknyh okon v dvuhtaktnom dizele s protivopolozhno dvizhushchimisya porshnyami tipa 6TD / S. A. Alyohin, V. A. Opalev, P. YA. Pererva // Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Nauchno-tekhnicheskij zhurnal. Har'kov: «NTU HPI»] – 2006. – №1. – S. 78 – 81.*

Касімов А.М., Серпухов О.В., Коритченко К.В., Пархомчук О.В.

МОДЕЛЮВАННЯ СТИСНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ЗАРЯДУ З ТЕМПЕРАТУРНИМ ГРАДІЄНТОМ У ДИЗЕЛЬНОМУ ДВИГУНІ ТИПУ 6ТД

Розроблена математична модель стиснення повітряного заряду з температурним градієнтом в дизельному двигуні. Проведено чисельне дослідження зміни полів температури, тиску та концентрації компонентів повітряного заряду з початковим температурним градієнтом у циліндрі двигуна 6ТД. Виявлено зростання різниці температур між шарами у заряді, що мають різну температуру перед початком стиснення. Підтверджено можливість забезпечення умови для надійного самозаймання палива у разі використання повітряного заряду з температурним градієнтом.

Касимов А.М., Серпухов А.В., Коритченко К.В., Пархомчук А.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖАТИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАРЯДА С ТЕМПЕРАТУРНЫМ ГРАДИЕНТОМ В ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ ТИПА 6ТД

Разработана математическая модель сжатия воздушного заряда с температурным градиентом в дизельном двигателе. Проведено численное исследование изменения полей температуры, давления и концентрации компонентов воздушного заряда с начальным температурным градиентом в цилиндре двигателя 6ТД. Выявлен рост разницы температур между слоями в заряде, имеющих различную температуру перед началом сжатия. Подтверждена возможность обеспечения условия для надежного самовоспламенения топлива при использовании воздушного заряда с температурным градиентом.

A. Kasimov, O. Serpukhov, K. Korytchenko, O. Parkhomchuk

MODELING OF AIRCRAFT STORAGE WITH TEMPERATURE GRADIENT IN DIESEL ENGINE TYPE 6TD

The mathematical model of compression of an air charge with a temperature gradient in a diesel engine is developed. A numerical study was carried out to change the fields of temperature, pressure and concentration of components of an air charge with an initial temperature gradient in a cylinder of the engine 6TD. The growth of temperature difference between charge layers with different temperature before compression is revealed. The possibility of providing a condition for reliable self-ignition of fuel in the case of using an air charge with a temperature gradient has been confirmed.