

поэтому прижимные усилия существенно возрастают (рис. 2 а).

4. При проектировании МСХ, в которых, по условиям функционирования, требуется постоянный контакт роликов, следует использовать механизм с внутренней звездочкой и по формуле (10) определять прижимное усилие общесепараторного прижимного устройства. Для бесконтактных МСХ – рационально применять наружную звездочку и согласно выражению (18) определять  $F_{no}$ .

### Литература

1. Мальцев В.Ф. Роликовые механизмы свободного хода / В.Ф. Мальцев. – М.: Машиностроение, 1968. – 416 с.
2. Пилипенко М. Н. Механизмы свободного хода / М.Н. Пилипенко. – М.: Машиностроение, 1966. – 287 с.
3. Механические передачи вертолетов / Л.Б. Бушмарин, П.П. Дементьев, Г.И. Иоффе и др.; под ред. В.Н. Кестельмана. – М.: Машиностроение, 1983. – 120 с.

Рецензія/Peer review : 24.10.2015 р.

Надрукована/Printed : 1.11.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 629.06

Д.О. ДМИТРИЄВ, Е.С. АППАЗОВ, С.А. РУСАНОВ, О.І. КЛЮЄВ

Херсонський національний технічний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗІГРІВУ ДВИГУНА З ТЕПЛОВИМ АКУМУЛЯТОРОМ ПРИ ПЕРЕДПУСКОВІЙ ПІДГОТОВЦІ

*Проведено моделювання процесу розігріву двигуна з тепловим акумулятором при його передпусковій підготовці. Розглянуті питання моделювання фазового переходу в теплоакumuлюючій речовині. Загальне рішення проводилося в два етапи: моделювання окремих частин в CFD системах та розрахунки за методом еквівалентних теплових схем.*

*Ключові слова: теплоаккумулятор, двигуни внутрішнього згорання, моделювання*

D.O. DMITRIEV, E.S. APPAZOV, S.A. RUSANOV, O.I. KLUEV

Kherson national technical university

### HEATING THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH A HEAT-ACCUMULATING ELEMENT DURING ENGINE START MODELING

*The simulations of the heating process of the engine with a heat-accumulating element during engine start are considerable. The article studies the questions of modeling the phase transition in the heat storage substance. The general solution was carried out in two stages: modeling of individual parts in CFD and calculations by the method of equivalent thermal schemes. Showing solutions for system: heat storage material - circulating fluid - internal combustion engine. The results of the simulation of the heat-accumulating element with a fuzzy boundary phase transition and phase transition in the form of a delta function.*

*Keywords: heat-accumulating, internal combustion engine, modeling*

**Вступ.** Одним з рішень, що дозволяють мінімізувати негативні наслідки холодного пуску двигунів, є передпускова тепла підготовка двигуна, реалізована за допомогою передпускових підігрівників, зокрема, теплових акумуляторів [1,2]. Акумуляування теплової енергії від різних джерел і її використання при пуску, як вказується в [1], може дати економію палива до  $15 \div 20 \%$ , а за нашими даними [3] до  $7 \div 10 \%$ .

Теплота в теплоаккумуляторах для передпускового розігріву двигуна запасється робочими тілами, що зберігаються при заданій температурі у твердому або рідкому стані в спеціальних ємностях. Розрізняють наступні основні типи теплоаккумуляування [4]:

- теплове акумуляування енергії твердими й рідкими тілами за рахунок зміни температури речовини – теплоємнісна акумуляція;
- теплове акумуляування енергії за допомогою використання теплоти фазового переходу;
- термохімічне акумуляування теплової енергії.

**Постановка задачі.** В [2,5] були розглянуті результати розрахункових досліджень гідродинаміки й теплообміну двигуна з визначенням нерівномірності прогріву блоку циліндрів і голівки блоку циліндрів, необхідним часом прогріву для заданих параметрів навколишнього середовища стосовно до акумуляторів теплоти на фазових переходах. Детальне узгодження гідродинамічної задачі в каналах двигуна й теплообміну з фазовим переходом у теплоаккумуляторі вимагає ретельної підготовки моделі теплоаккумулятора, яка повинна задовольняти з одного боку вимогам достатньої розрахункової точності, і при цьому мати відносно просту й стійку чисельну реалізацію (дослідження проводяться в рамках щорічного Гранту Президента на 2015 рік для докторів наук згідно договору та технічного завдання між Державним фондом фундаментальних досліджень та Херсонським національним технічним університетом).

**Виклад основного матеріалу.** Як відомо, на основі теплового балансу для поверхні розділу фаз

звичайно використовується умова Стефана [6]:

$$r_{ms} q_n \frac{\partial s_n}{\partial t} = l_p \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{n \rightarrow +0} - l_{ms} \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{n \rightarrow -0},$$

де  $s_n$  – переміщення границі розділу фаз у напрямку нормалі  $n$ ,  $\tau$  – час,  $T$  – температура,  $q_n$  – прихована теплота плавлення,  $\lambda_p$  і  $\lambda_{ms}$  – коефіцієнти теплопровідності рідкої й твердої фази відповідно. Крім зазначеної умови в переважній більшості задач стефанівського типу використовується умова сталості температури на міжфазній границі. Однак, у деяких випадках моделювання процесу плавлення-заморожування робочого тіла бажано здійснювати з використанням методу ефективної теплоємності [7] без явного виділення положення границь фазового переходу, з розрахунком конвективного теплопереносу в розплаві:

$$c_{ef} \mathbf{r} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla T \right) = \nabla (l_{ef} \nabla T) + q,$$

де  $c_{ef}$ ,  $\lambda_{ef}$  – ефективні значення теплоємності й теплопровідності, які враховують теплоту плавлення в задачі Стефана [7] і наявність конвективного теплопереносу,  $\mathbf{v}$  – поле швидкостей (конвективні струми),  $q$  – потужність внутрішніх джерел тепла, при їхній наявності. Для розрахунку фазового переходу ефективна теплоємність містить у собі дельта-функцію й представляється у вигляді

$$c_{ef} = c(T) + q_n d(T - T^*),$$

де  $T^*$  – температура фазового переходу.

При чисельній реалізації в кінцевому інтервалі температур  $\Delta t$  для точки фазового переходу другий доданок може бути замінений вираженням  $q_n/\Delta T$ .

Деякі теплоакумуючі речовини є матеріалами із сильно розмитими границями фазових перетворень тверде тіло – рідина. У цих випадках температурний інтервал фазових перетворень може розтягтися на десятки градусів, тому використовується температурна залежність питомої теплоємності  $c=c(T)$ , яка в області фазового переходу має один або кілька піків, при цьому область фазового переходу буде являти собою не поверхню, а шар [8]. Можлива також наявність переохолодження при кристалізації, що, наприклад, характерно для кристалогідратів без зародкоутворюючих присадок [9], однак на практиці врахування зазначеного явища проводиться рідко.

Чисельні розрахунки системи двигун – циркулююча рідина – теплоакумуючий матеріал – навколишнє середовище були проведені в два етапи. На першому етапі були розраховані параметри теплових опорів в системі двигуна та системи трубопроводів (рис.1) для різних температур теплоносія за методом скінченних об'ємів в CFD-системі, на другому етапі задача чисельно вирішувалась за методом еквівалентних теплових схем [10].

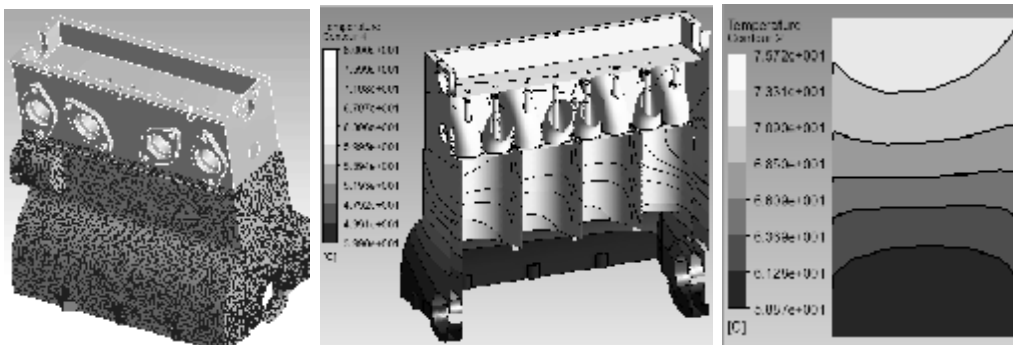


Рис. 1. Модель прогріву двигуна та циліндра за рахунок підводу теплоти від теплоакумуючої речовини.

Таке розбиття задачі на етапи було виконане для зниження потреб в розрахункових ресурсах – повна скінченно-об'ємна модель системи потребує значних комп'ютерних потужностей, у зв'язку з чим доцільно розрахунки повної системи у відповідних CFD програмах проводити на заключному етапі. Система рівнянь теплового стану для кожної ділянки має вигляд:

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} + \Lambda_{11}(T_1 - T_2) + \Lambda_{12}(T_1 - T_3) + \Lambda_{13}(T_1 - T_{nc}) = P_1,$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} + \Lambda_{21}(T_1 - T_2) + \Lambda_{22}(T_1 - T_3) + \Lambda_{23}(T_1 - T_{nc}) = P_2,$$

...

або в матричній формі:

$$[C] \cdot \mathbf{T} + [\Lambda] \cdot \mathbf{T} = \mathbf{P},$$

де  $[C]$  – матриця теплоємностей (діагональна),  $\mathbf{T}$  – стовпець температур вузлів,  $T_{nc}$  – температура навколишнього середовища,  $[\Lambda]$  – матриця теплових провідностей,  $\mathbf{P}$  – вектор потужностей теплових

джерел. Теплоємність, що відповідає теплоакumuлюючій речовині, задається кусковою функцією у відповідності з методом ефективної теплоємності.

Чисельні розрахунки розігріву двигуна за допомогою розрядки теплового акумулятора за вищевказаною методикою для речовин з розмитим (парафін, рис. 2, а) і дельтаподібним фазовим переходом (рис. 2, б) мають характерні області фазового переходу.

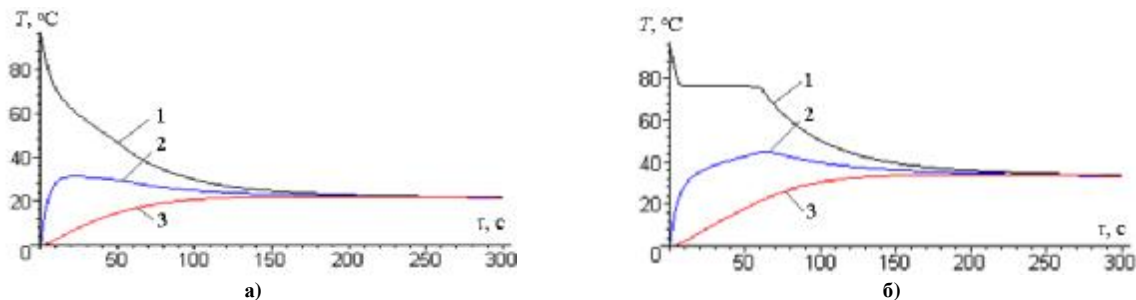


Рис. 2. Результати чисельних розрахунків розігріву двигуна за допомогою розрядки теплового акумулятора а) для речовин з розмитим (модельна речовина - парафін), б) для речовин з дельтаподібним фазовим переходом (за даними для кристалогідратів). 1 – розрядка теплоакumuлюючої речовини, 2 – прогрів охолоджуючої рідини, 3 – розігрів двигуна.

Результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними, опублікованими в [1], а модель може бути використана для вибору конструктивних параметрів теплоакumuляторів, обґрунтування застосовності теплоакumuлюючих речовин і прогнозування роботи системи в різних умовах.

**Висновки.** Розрахунки розігріву при передпусковій підготовці автомобільних двигунів доцільно робити методом ефективної теплоємності з використанням даних по фазових переходах для модельних речовин, використовуваних у якості теплоакumuляторів. Дані по ефективних теплових параметрах двигуна можуть бути отримані розрахунковим шляхом у сучасних CFD системах з можливою тарировкою моделі по наявних натурних експериментах.

### Література

1. Пыхтя В. А. Экспериментальные исследования системы предпускового разогрева двигателя с тепловым аккумулятором / В.А. Пыхтя // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2010. – № 6 (148). – С. 246-251.
2. Косенков И.А. Результаты экспериментальных исследований системы предпусковой подготовки двигателей / А.П. Картошкин, И.А. Косенков, Д.С.Агапов // Сб. науч. трудов Международной научно-технической конференции «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей». – СПб. : СПбГАУ, 2010. – С. 302 – 310.
3. Аппазов Э.С. Решения по использованию теплоаккумуляторов на основе фазового перехода твердое тело – жидкость для предпусковой подготовки автомобильных двигателей / Э.С. Аппазов, О.И. Ключев, С.А. Русанов, К.В. Луняка // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Херсон: ВНЗ «ХДМІ», 2014. – С.52–54.
4. Левенберг В.Д. Аккумуляирование тепла / Левенберг В.Д., Ткач М.Р, Гольстрем В.А. – К.: «Техника», 1991. – 112 с.
5. Аппазов Е.С. Моделирование гидродинамических та тепловых процессов при предпусковой подготовке автомобильных двигунів / Е.С. Аппазов, О.И. Ключев, С.А. Русанов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал. – Херсон: Вид-во ХДМА, 2014 - №1(10). – С. 131–136.
6. Эккерт Э.Р. Теория тепло- и массообмена / Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. – М, Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 521 с.
7. Самарский А. А. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана / А. А. Самарский, Б. Д. Моисеенко // Журнал «Вычислительная математика и математическая физика». 1965. – С. 816–827.
8. Россихин Н.А. Расчет и проектирование аккумуляторов теплоты на фазовых переходах (капсульного типа). Методические указания / Н.А. Россихин. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. – 33 с.
9. Мозговой А.Г. Теплофизические свойства теплоаккумулирующих материалов. Кристаллогидраты / А.Г. Мозговой, Э.Э. Шпильрайн и др. – М.: ИВТАН СССР, 1990. – 106 с.
10. Галайко Л.П. Сравнение методов эквивалентных тепловых схем и конечных элементов для теплового расчета вентильно-индукторного двигателя / Л.П. Галайко, Н.А. Гаевская // Вестник НГУ "ХПИ". – 2008. – №25. – С. 18–21.

Рецензія/Peer review : 8.10.2015 р.

Надрукована/Printed : 1.11.2015 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Клевцов К.М.