

**С. А. РУСАНОВ**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-1003-4867

**О. І. КЛЮЄВ**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0001-6803-0706

**Д. О. ДМИТРІЄВ**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0001-8200-351X

**І. А. ШАТОХІНА**

старший викладач кафедри транспортних систем і технічного сервісу  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-5767-3674

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА НЕРІВНОМІРНОСТІ РОЗІГРІВУ ГОЛОВКИ ТА БЛОКУ ЦИЛІНДРІВ ПРИ ПЕРЕДПУСКОВІЙ ТЕПЛОВІЙ ПІДГОТОВЦІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ

*У роботі представлено результати чисельного моделювання процесів теплопередачі під час передпускової теплової підготовки двигуна внутрішнього згорання із використанням системи рідинного підігріву. Метою дослідження є визначення просторової нерівномірності прогріву елементів двигуна, зокрема блоку та головки циліндрів, а також оцінювання гідродинамічних характеристик теплоносія у каналах системи охолодження. Для виконання розрахунків застосовано метод скінченних об'ємів з використанням  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності, яка забезпечує адекватний баланс між точністю результатів та обчислювальною ефективністю при турбулентних режимах руху рідини. Циркуляція при теплопідготовці за схемою, що моделюється, організована з входом через випускний клапан антифризу та виходом через зливний патрубок.*

*Отримані результати дозволили ідентифікувати застійні зони, що формуються у ділянках, віддалених від вхідного патрубка, та призводять до суттєвої нерівномірності температурного поля. Встановлено, що перепад температур у головці блоку циліндрів може досягати  $20^{\circ}\text{C}$ , а в стінках циліндрів – до  $30-40^{\circ}\text{C}$ . Нижня частина картера практично не бере участі у процесі теплообміну, що свідчить про неповноту прогріву двигуна під час попередньої теплової підготовки. Розрахований загальний перепад тиску в системі становить близько  $1658\text{ Па}$ .*

*Проведене дослідження підтверджує важливість використання CFD-моделювання як ключового інструменту для комплексного аналізу систем передпускового підігріву. Такі розрахунки дають змогу оптимізувати геометрію каналів, схеми циркуляції теплоносія та параметри теплообмінного обладнання, що, у підсумку, підвищує ефективність використання накопиченого тепла і сприяє скороченню часу виходу двигуна на робочий тепловий режим. Отримані результати можуть бути використані для подальшої побудови інтегрованих моделей повного циклу теплопідготовки транспортних двигунів.*

**Ключові слова:** передпусковий підігрів, чисельне моделювання, гідродинаміка, теплообмін, чисельні методи, системи автоматизованого моделювання.

S. A. RUSANOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Transport Systems  
and Technical Service  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-1003-4867

O. I. KLIUIEV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Transport Systems  
and Technical Service  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0001-6803-0706

D. O. DMYTRIIEV

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0001-8200-351X

I. A. SHATOKHINA

Senior Lecturer at the Department of Transport Systems  
and Technical Service  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-5767-3674

## COMPUTER SIMULATION OF HYDRODYNAMICS AND HEATING NON-UNIFORMITY OF THE CYLINDER HEAD AND BLOCK DURING PRE-START THERMAL CONDITIONING OF AUTOMOTIVE ENGINES

*The paper presents the results of numerical simulation of heat transfer processes during the pre-start thermal conditioning of an internal combustion engine using a liquid heating system. The main objective of the study is to determine the spatial non-uniformity of heating within the engine components—particularly the cylinder block and cylinder head—and to evaluate the hydrodynamic characteristics of the coolant in the cooling system channels. The calculations were performed using the finite volume method combined with the  $k-\epsilon$  turbulence model, which provides an appropriate balance between computational efficiency and accuracy under turbulent flow conditions. In the simulated preheating configuration, coolant circulation is organized with the inlet through the antifreeze outlet valve and the outlet through the drain pipe.*

*The obtained results made it possible to identify stagnant zones forming in regions remote from the inlet pipe, which lead to significant temperature field non-uniformity. It was found that the temperature difference in the cylinder head can reach up to 20°C, while in the cylinder walls it can reach 30–40°C. The lower part of the engine crankcase practically does not participate in the heat exchange process, indicating incomplete heating of the engine during pre-start thermal conditioning. The total pressure drop in the system was calculated to be approximately 1658 Pa.*

*The conducted study confirms the importance of CFD modeling as a key tool for comprehensive analysis of pre-start heating systems. Such simulations allow optimization of channel geometry, coolant flow schemes, and heat exchanger parameters, ultimately improving the efficiency of stored heat utilization and reducing the time required for the engine to reach its operating thermal regime. The obtained results can be further used in developing integrated models of the complete thermal preparation cycle for vehicle engines.*

**Key words:** pre-start heating, numerical simulation, hydrodynamics, heat transfer, numerical methods, computer-aided modeling systems.

### Постановка проблеми

Забезпечення правильного теплового режиму двигуна внутрішнього згоряння автомобіля, підтримка стабільної та оптимальної температури його роботи є достатньо важливим інженерним завданням. Від ефективності підтримання теплового режиму залежать екологічні показники транспортного засобу, економія пального та зручність його експлуатації.

Одним з важливих питань теплового режиму є питання передпускової підготовки двигуна. В першу чергу проблема передпускової підготовки постає в холодну пору року і особливо стосується промислового автопарку, але ж проблема актуальна й для гібридних транспортних засобів, для яких вона може бути навіть ще більш нагальною. Холодний пуск знижує строки міжремонтної експлуатації та сприяє загальному скороченню строка служби

двигуна, приводить до зростання споживаного стартером пускового струму, погіршує комфорт початку руху в зимових умовах, погіршує економічні характеристики двигуна (зокрема, підвищує витрати пального), екологічні показники. Зменшення кількості шкідливих викидів під час запуску та прогрівання двигуна ускладнюється низькою температурою його елементів і потребою збагачувати паливно-повітряну суміш для забезпечення стабільного займання. Наявність каталізатора не вирішує цієї проблеми, адже для ефективного функціонування він також має досягти робочої температури. Погіршення сумішоутворення та запалення є наслідком того, що частина палива надходить у циліндри у вигляді крапель, що не випарувалися, і не встигає згоріти. Проблема стає ще більш відчутнішою під час експлуатації автомобіля в міських умовах, що характеризуються частими зупинками й повторними пусками двигуна, а також короткими відрізками поїздок. Часті зупинки й повторні пуски двигуна особливо відчутні для гібридних автомобілів.

У процесі розвитку автомобільної техніки зазначену проблему намагалися вирішувати шляхом застосування різних технічних засобів. Проте використання додаткових термостатів, жалюзі радіатора, утеплення моторних відсіків, використання віскомуфт не відповідає підвищеним вимогам до експлуатаційних характеристик та екологічності двигуна. Одним з найефективніших методів вирішення вказаної проблеми є передпусковий підігрів двигуна, який здійснюється за допомогою спеціальних підігрівачів. Залежно від принципу дії передпускові підігрівачі розділяються на електричні підігрівачі від мережі 220 В, електричні підігрівачі 12 В, автономні підігрівачі (працюють на бензині чи дизелі), теплові акумулятори. Перераховані пристрої мають кожен свою низку переваг та недоліків, тим не менше одним з основних критеріїв їх працездатності є можливість досягнення рівномірної та достатньої для комфортного пуску температури головки та блоку циліндрів за прийнятний відрізок часу.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

В роботах [1-4] розглянуто основні позиції щодо процесу передпускової підготовки двигунів внутрішнього згоряння. В роботах [5, 6] надано відомості щодо розробки та дослідження комбінованої системи підігріву двигунів і транспортних засобів (CHS). Екологічні аспекти використання теплоакумуляційної техніки вказані в [7,8]. Аспекти використання теплопідготовки в гібридних автомобілях (насамперед, Coolant Heat Storage System, CHSS) вказані в роботі [9]. Конструкції нових систем теплопідготовки описані в [10] та низці патентів, серед яких вкажемо [11-13]. Але з аналізу публікацій виявляється, що питанню нерівномірності розподілу температур двигуна в процесі теплової підготовки присвячено невелику кількість публікацій. З наявних відмітимо статтю [14,15]. Вказаний пробіл і обумовлює цілі даної статті.

#### **Формулювання мети дослідження**

З вказаного вище випливає формулювання мети дослідження: метою даної публікації є аналіз нерівномірності прогріву двигуна внутрішнього згоряння при тепловій підготовці двигуна засобами теплоакумуляційної техніки за заданим режимом роботи та схемою подачі підігрітого антифризу засобами CFD моделювання.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Необхідність проведення CFD-розрахунків у дослідженні процесів передпускового прогріву двигунів внутрішнього згоряння обумовлена складністю теплових процесів, що відбуваються в системі охолодження та елементах двигуна. Традиційні експериментальні методи не завжди дозволяють точно визначити розподіл температури в різних зонах блоку циліндрів і головки, особливо на початкових етапах підігріву. Використання чисельного моделювання (CFD) дає змогу відтворити реальну картину руху теплоносія, оцінити локальні перепади температур і швидкості потоку, а також виявити ділянки із недостатнім прогрівом. Такий підхід забезпечує глибше розуміння механізмів теплообміну під час передпускової підготовки та дозволяє зробити висновки щодо придатності конструкції каналів охолодження до передпускової підготовки, надати перевагу тому чи іншому режиму циркуляції теплоносія та провести підлаштування параметрів теплоакумуляційної системи.

В якості розрахункової задачі було вибрано чотирьохциліндровий двигун внутрішнього згоряння (рис. 1). Розрахункова область була поділена на чотири зони: дві тверді – що відповідають блоку циліндрів і головці блока циліндрів, та дві проточні – для каналів охолоджувальної рідини в цих елементах. За рахунок різного згущення сіток для твердих доменів та проточних (проточні потребують значно більшої щільності сітки), вдалося знизити (у порівнянні з [15]) число скінченних об'ємів до 2 млн. Незалежність результатів від щільності сітки перевірили шляхом порівняння результатів розрахунків для одного з режимів на більш детальних і спрощених сітках. Поверхні проточних доменів вистилалися інфляцією призматичних комірок (рис. 2) із контролем параметра  $y^+$  на поверхнях.

Окремим питанням є вибір моделі турбулентності для задачі. Для моделювання процесів теплообміну в системі охолодження під час передпускового підігріву двигуна була обрана  $k-\epsilon$  модель турбулентності. Незважаючи на те, що режим течії характеризується турбулентністю з числами Рейнольдса, що не досягають  $20\cdot 30\cdot 10^3$ , ця модель залишається одним із найпоширеніших та перевірених підходів для технічних задач, пов'язаних із рухом рідин у складних геометріях. Вона забезпечує прийнятну точність опису поля швидкостей і температур при відносно помірних обчислювальних витратах, що робить її доцільним вибором на етапі порівняльного чи параметричного аналізу. Модель  $k-\epsilon$  добре узгоджується з умовами течії в замкнених каналах системи охолодження, де

відбувається переважно усталений рух рідини. Її використання дозволяє коректно відтворити загальну картину розподілу швидкостей і температури, що є достатнім для оцінки рівномірності прогріву елементів блоку та головки циліндрів. При цьому було забезпечено контроль параметра  $u^+$  у приконтактних областях для дотримання вимог застосування даної моделі.

Модель таким чином складалася з рівнянь нерозривності та руху для осереднених полів швидкостей та тиску при нестационарному русі

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0; \tag{1}$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{u} \right) = -\operatorname{grad} p^* + \operatorname{Div} (v_e \hat{\mathbf{d}}) + \mathbf{f}_V, \tag{2}$$

де

$$p^* = p + \frac{2}{3} \rho k, \quad d_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad v_e = v + v_t,$$

$k$  – питома кінетична енергія турбулентності,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ,  $v$  – кінематичний коефіцієнт в’язкості рідини,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $v_t$  – турбулентна в’язкість,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $p$  – осереднений тиск, Па,  $\mathbf{u}$  – осереднений вектор швидкості,  $\text{м}/\text{с}$ ,  $\mathbf{f}_V$  – вектор масових сил,  $\text{м}/\text{с}^2$ ,  $\partial \mathbf{u} / \partial \mathbf{x}$  – тензор градієнтів швидкості, та додаткових рівнянь  $k$ - $\varepsilon$  моделі

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla k = \nabla \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \varepsilon, \tag{3}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \varepsilon = \nabla \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}, \tag{4}$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \tag{5}$$

де  $\varepsilon$  – швидкість дисипації турбулентної енергії,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ ,  $P_k = 2v_t \hat{\mathbf{d}} : \hat{\mathbf{d}}$  – генерація енергії.

Емпіричні константи в наведених рівняннях становлять:

$$C_\mu = 0.0845, \quad C_{1\varepsilon} = 1.42, \quad C_{2\varepsilon} = 1.68, \quad \sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.72.$$

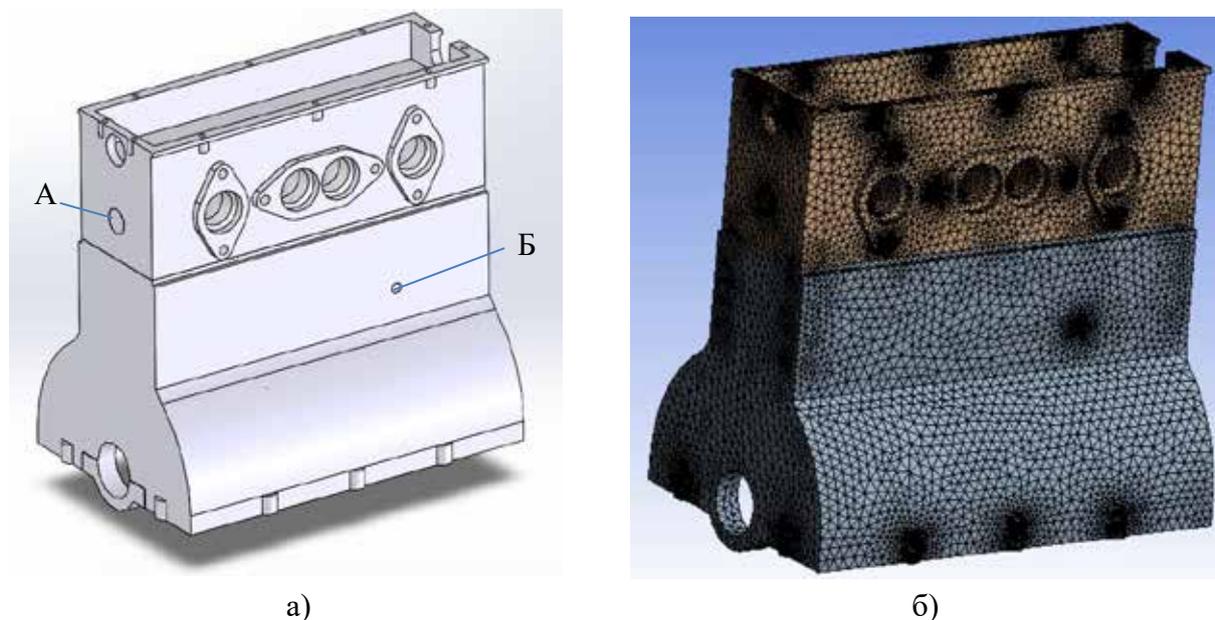


Рис. 1. CAD-модель двигуна (а) з вказаними патрубками подачі рідини (А) та виводу (Б) та сітка скінченних об’ємів (б)

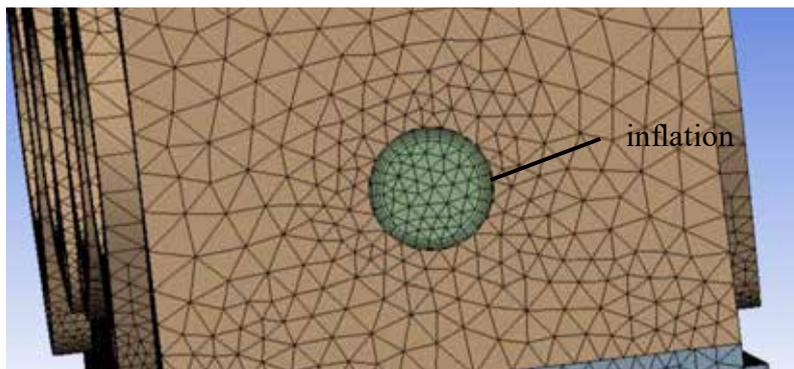


Рис. 2. Сітка скінченних об’ємів з шаром (inflation) призматичних комірок

На відміну від [15] подача рідини для теплової підготовки в схемі обігріву була проведена через випускний канал (позначено як А на рис. 1, а) з виходом через зливний патрубок охолоджуючої рідини (Б). Граничні умови для гідродинамічної задачі таким чином задають вхідну швидкість з перерахунку витрати 2 л/хв, та Outlet для зливного каналу. Граничні умови для теплової задачі включають температуру вхідної рідини 60 °С, для моделювання взаємодії між окремими зонами були встановлено: для межі тверде-рідина застосовано умову Conservative Interface Flux, для межі рідина-рідина – тип з’єднання General Connection, а для зовнішніх поверхонь твердих областей задано умову тепловіддачі. У відповідності з [15] коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  при природній конвекції визначався з критеріального рівняння  $Nu = 0.75(Gr \cdot Pr)^{0.25}$ , де  $Nu$  – критерій Нусельта,  $Gr$  – критерій Грасгофа,  $Pr$  – критерій Прандтля, звідки отримували  $\alpha \approx 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Температура навколишнього середовища задавалась  $t_0 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

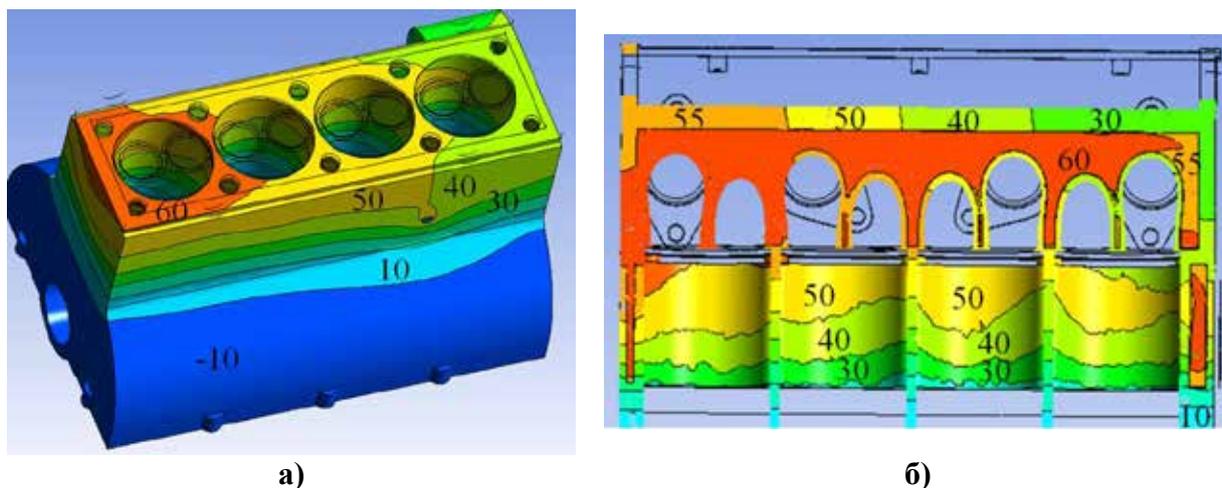


Рис. 3. Карта поля температур в в блоці циліндрів (а) та в головці блоку циліндрів (б)

За результатами CFD-розрахунку далі аналізуються тепловий та гідродинамічний стан системи на момент часу, що відповідає 180-й секунді роботи теплооброблюючого пристрою. Такий часовий інтервал було обрано як характерний для завершення перехідного періоду нагріву, коли температура теплоносія та твердих елементів системи досягає квазівстановлених значень, та комфортний щодо самої процедури теплопідготовки для користувача. Отримані поля температур та лінії току наведено на рис. 3 та рис. 4 відповідно. Вони дають змогу оцінити як загальну ефективність процесу прогріву, так і локальні особливості розподілу температури в елементах двигуна.

З аналізу поля швидкостей видно, що течія рідини у внутрішніх каналах блоку й головки циліндрів є неоднорідною. Найбільш помітною є поява застійних зон у тих частинах системи, які розташовані протилежно до вхідного патрубку. У цих областях швидкість руху теплоносія істотно знижується, що, у свою чергу, призводить до зменшення інтенсивності теплопередачі між рідиною та стінками. В результаті формується нерівномірне температурне поле, що відображено на картах розподілу температури.

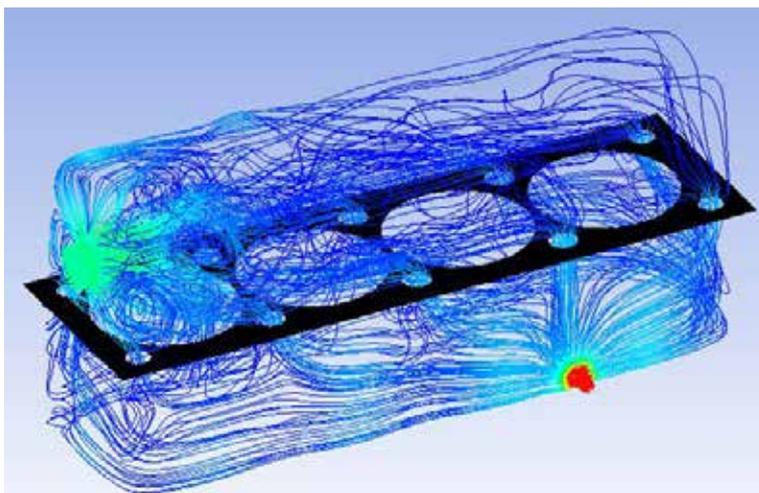


Рис. 4. Лінії току для циркуляції рідини при тепловій підготовці

Отримані результати підтверджують, що, як і зазначалося в роботі [15], прогрів окремих циліндрів відбувається з помітним градієнтом температур. Додатково виявлено нерівномірність температурного поля у головці блоку циліндрів: перепад температури між найбільш нагрітою та найхолоднішою її ділянками сягає близько 20°C. На поверхнях самих циліндрів ця різниця є ще більш вираженою – у межах 30-40°C. Такий характер розподілу температур може впливати на теплові деформації елементів та потенційно знижувати довговічність двигуна.

Треба також зазначити, що нижня частина картера двигуна практично не бере участі у процесі теплообміну під час розглянутого режиму теплової підготовки. Це свідчить про те, що прогрів здійснюється переважно у верхній частині двигуна, тоді як температурний вплив на зону картера є незначним. Таким чином, коректніше говорити не про повну теплову обробку двигуна, а лише про часткове прогрівання його основних елементів.

Окремим питанням є вибір відповідної помпи для забезпечення циркуляції в колі теплопідготовки. Загальний перепад тиску при тепловій обробці на двигуні становить 1657,82 Па. Вказані гідравлічні втрати розраховані без врахування патрубків та трубопроводів зовнішньої системи теплопідготовки та самого теплоаккумулятору, що потребує додаткових експериментальних даних або чисельних розрахунків.

#### Висновки

У результаті проведеного чисельного моделювання за рахунок високої інформативності CFD-аналізу при дослідженні процесів передпускової теплової підготовки двигунів внутрішнього згорання отримані всебічні дані щодо гідравлічної та теплової складової процесу тепло підготовки чотирьохциліндрового двигуна внутрішнього згорання. Отримані результати дали змогу комплексно оцінити просторовий розподіл температури та швидкості теплоносія в каналах системи охолодження, виявити зони нерівномірного прогріву, а також визначити вплив гідродинамічних особливостей потоку на ефективність теплопередачі. Циркуляція при теплопідготовці організована з входом через випускний клапан антифризу та виходом через зливний патрубок. Встановлено, що циркуляція рідини у складній геометрії каналів супроводжується утворенням застійних ділянок, особливо у зонах, віддалених від вхідного патрубка, що призводить до суттєвих температурних градієнтів у блоці та головці циліндрів. Така нерівномірність підтверджує необхідність ретельного підходу щодо вибору типу теплоакмулюючого пристрою та насосу з метою підвищення рівномірності теплового поля.

Проведений аналіз демонструє, що CFD-розрахунки є невід'ємним етапом комплексного моделювання повного циклу теплопідготовки двигуна. Вони забезпечують не лише кількісну оцінку теплових характеристик, але й дозволяють здійснювати інженерну перевірку доцільності застосування тих чи інших схем циркуляції, конфігурацій каналів або типів теплоакмуляційних елементів. Такий підхід створює основу для раціонального вибору конструкції теплообмінного обладнання, підвищення енергоефективності системи підігріву та скорочення часу виходу двигуна на робочі температурні умови. Отримані результати можуть бути використані для подальшої розробки інтегрованих моделей, що описують повну роботу кола теплопідготовки двигуна – від накопичення теплоти до її передачі у ключові зони двигуна при запуску.

#### Список використаної літератури

1. Kim D. S., Park Y. J., Lee S. W. et al. A study on characteristics and control strategies of cold start operation for improvement of harmful exhaust emissions in SI engines//*Journal of Mechanical Science and Technology*. 2008. Vol. 22. P. 141–147. DOI: 10.1007/s12206-007-1017-6.

2. Anghelache G., Boriaru N. General Preheating System for Cold Starting of Internal Combustion Engine//*SAE Technical Paper* 940107. 1994. DOI: 10.4271/940107.
3. Stecki J., Cichocki W., Garbacik A., Szewczyk K. Heating Systems for Cold Starting of IC Engines//*SAE Technical Paper* 920002. 1992. DOI: 10.4271/920002.
4. Gabriel A. Study on the Possibility of Facilitating Internal Combustion Engine Starting at Very Low Temperatures//*SAE Technical Paper* 920038. 1992. DOI: 10.4271/920038.
5. Gritsuk I., Volkov V., Gutarevych Y., Mateichyk V., Verbovskiy V. Improving engine pre-start and after-start heating by using the combined heating system // *SAE Technical Paper* 2016-01-8071. 2016. DOI: 10.4271/2016-01-8071.
6. Gritsuk I. V. The Development and the Study of the Combined Heating System of Engines and Vehicles//*The Herald of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2015. Vol. 70. P. 23–32.
7. Klets D., Gritsuk I., Makovetskyi A., Bulgakov N. et al. Information Security Risk Management of Vehicles//*SAE Technical Paper* 2018-01-0015. 2018. DOI: 10.4271/2018-01-0015.
8. Gritsuk I., Volkov V., Mateichyk V., Gutarevych Y. et al. The Evaluation of Vehicle Fuel Consumption and Harmful Emission Using the Heating System in a Driving Cycle//*SAE International Journal of Fuels and Lubricants*. 2017. Vol. 10, No. 1. P. 236–248.
9. Волков В. П., Грицук І. В., Володарець М. В., Погорлецький Д. С., Симоненко Р. В. Особливості дослідження теплоенергетичних характеристик теплоакуюлюючого матеріалу для здійснення комбінованого прогріву гібридного транспортного засобу//*Наукові нотатки*. 2019. Вип. 65. С. 39–46. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn\\_2019\\_65\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2019_65_8).
10. Ключев О. І., Русанов С. А., Шатохіна І. А. Нові конструкції теплових акумуляторів для передпускової підготовки двигунів внутрішнього згорання автомобілів//*Вісник ХНТУ*. 2024. № 1(88). С. 41–48.
11. The system of coolant optimal temperatures in ICE: пат. 103729 Україна: МПК (2013.01) F01P 3/22, B60H 1/04, B60K 11/00 / Гутаревич Ю. Ф., Матейчик В. П., Грицук І. В., Волков В. П., Каграманян А. О., Комов П. Б., Комов О. Б., Поддубняк В. Ю., Сергієнко М. І., Краснокуцька З. І.; заявник і патентовласник Національний транспортний університет. № ua 103729; заявл. 30.10.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7. 17 с. : іл.
12. Ключев О. І., Русанов С. А., Аппазов Е. С., Луняка К. В., Коновалов Д. В., Мацків Б. В. Тепловий акумулятор системи передпускового прогріву двигуна внутрішнього згорання: пат. на корисну модель № 137780 Україна: МПК F02N 15/00, F24H 7/00. Заявл. 03.04.2019; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21.
13. Луняка К. В., Ключев О. І., Русанов С. А., Ключева О. О., Коновалов Д. В. Тепловий акумулятор для передпускового прогріву двигуна внутрішнього згорання: пат. на корисну модель № 149067 Україна: МПК F02N 15/00, F24H 7/00. Заявл. 26.05.2021; опубл. 13.10.2021, Бюл. № 41.
14. Дмитрієв Д. О., Аппазов Е. С., Русанов С. А., Ключев О. І. Моделювання процесу розігріву двигуна з тепловим акумулятором при передпусковій підготовці//*Вісник Хмельницького національного університету*. 2015. № 5. С. 54–58.
15. Аппазов Е. С., Ключев О. І., Русанов С. А. Моделювання гідродинамічних та теплових процесів при передпусковій підготовці автомобільних двигунів// *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон: Вид-во ХДМА, 2014. № 1(10). С. 131–136.

#### References

1. Kim, D. S., Park, Y. J., Lee, S. W., et al. (2008). A study on characteristics and control strategies of cold start operation for improvement of harmful exhaust emissions in SI engines. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 141–147. <https://doi.org/10.1007/s12206-007-1017-6>
2. Anghelache, G., & Boriaru, N. (1994). General preheating system for cold starting of internal combustion engine. *SAE Technical Paper* 940107. <https://doi.org/10.4271/940107>
3. Stecki, J., Cichocki, W., Garbacik, A., & Szewczyk, K. (1992). Heating systems for cold starting of IC engines. *SAE Technical Paper* 920002. <https://doi.org/10.4271/920002>
4. Gabriel, A. (1992). Study on the possibility of facilitating internal combustion engine starting at very low temperatures. *SAE Technical Paper* 920038. <https://doi.org/10.4271/920038>
5. Gritsuk, I., Volkov, V., Gutarevych, Y., Mateichyk, V., & Verbovskiy, V. (2016). Improving engine pre-start and after-start heating by using the combined heating system. *SAE Technical Paper* 2016-01-8071. <https://doi.org/10.4271/2016-01-8071>
6. Gritsuk, I. V. (2015). The development and the study of the combined heating system of engines and vehicles. *The Herald of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 70, 23–32.
7. Klets, D., Gritsuk, I., Makovetskyi, A., Bulgakov, N., et al. (2018). Information security risk management of vehicles. *SAE Technical Paper* 2018-01-0015. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0015>
8. Gritsuk, I., Volkov, V., Mateichyk, V., & Gutarevych, Y. (2017). The evaluation of vehicle fuel consumption and harmful emission using the heating system in a driving cycle. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 10(1), 236–248.

9. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., Volodarets, M. V., Pohorlets'kyi, D. S., & Symonenko, R. V. (2019). Osoblyvosti doslidzhennia teploenerhetychnykh kharakterystyk teploakumuliuuchoho materialu dlia zdiisnennia kombinovanoho prohrivu hibrydnogo transportnoho zasobu [Features of studying the thermal-energy characteristics of heat-accumulating material for combined heating of a hybrid vehicle]. *Naukovi Notatky*, 65, 39–46. Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn\\_2019\\_65\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2019_65_8)
10. Kliuiev, O. I., Rusanov, S. A., & Shatokhina, I. A. (2024). Novi konstruktsii teplovykh akumulatoriv dlia peredpuskovoï pidhotovky dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia avtomobiliv [New designs of thermal accumulators for pre-start preparation of internal combustion engines of vehicles]. *Visnyk KhNTU*, 1(88), 41–48.
11. Hutariievych, Yu. F., Mateichyk, V. P., Hrytsuk, I. V., Volkov, V. P., Kagramanian, A. O., Komov, P. B., Komov, O. B., Poddubniak, V. Yu., Serhiienko, M. I., & Krasnokutska, Z. I. (2013). *The system of coolant optimal temperatures in ICE* (Patent No. UA 103729). National Transport University. Filed October 30, 2012. Published April 10, 2013, Bulletin No. 7.
12. Kliuiev, O. I., Rusanov, S. A., Appazov, E. S., Luniaka, K. V., Konovalov, D. V., & Matskiv, B. V. (2019). *Teplovyi akumulator systemy peredpuskovoho prohrivu dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia* [Thermal accumulator of the pre-start heating system of an internal combustion engine] (Utility Model Patent No. UA 137780). Filed April 3, 2019. Published November 11, 2019, Bulletin No. 21.
13. Luniaka, K. V., Kliuiev, O. I., Rusanov, S. A., Kliuieva, O. O., & Konovalov, D. V. (2021). *Teplovyi akumulator dlia peredpuskovoho prohrivu dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia* [Thermal accumulator for pre-start heating of an internal combustion engine] (Utility Model Patent No. UA 149067). Filed May 26, 2021. Published October 13, 2021, Bulletin No. 41.
14. Dmytriiev, D. O., Appazov, E. S., Rusanov, S. A., & Kliuiev, O. I. (2015). Modeliuvannia protsesu rozihrovu dvyhuna z teplovym akumulatorom pry peredpuskovii pidhotovtsi [Modeling the process of engine heating with a thermal accumulator during pre-start preparation]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu*, 5, 54–58.
15. Appazov, E. S., Kliuiev, O. I., & Rusanov, S. A. (2014). Modeliuvannia hidrodinamichnykh ta teplovykh protsesiv pry peredpuskovii pidhotovtsi avtomobilnykh dvyhuniv [Modeling of hydrodynamic and thermal processes during pre-start preparation of automotive engines]. *Naukovyi Visnyk Khersonskoi Derzhavnoi Morskoï Akademii*, 1(10), 131–136. Kherson: KhDMA Publishing.

Дата першого надходження рукопису до видання: 11.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 10.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025