

С. А. РУСАНОВ

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

В. О. ПРОЦЕНКО

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-3468-4952

О. І. КЛЮЄВ

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

І. А. ШАТОХІНА

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

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛООБМІНУ СПІРАЛЬНО-КАПСУЛЬНОГО ТЕПЛОАКУМУЛЯТОРУ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ЗАСОБАМИ САЕ-СИСТЕМ

У роботі наведено результати чисельного моделювання гідродинамічних та теплообмінних процесів, що відбуваються у спірально-капсульному теплоаккумуляторі, призначеному для теплової підготовки автомобільних двигунів внутрішнього згоряння. Метою дослідження є аналіз характеру руху теплоносія у спіральних каналах теплоаккумулятора, визначення просторової нерівномірності температурного поля, визначення часу фазового переходу а також оцінювання ефективності тепловіддачі від акумулюючого матеріалу до робочої рідини.

Чисельні розрахунки виконано з використанням методів обчислювальної гідродинаміки (САЕ/CFD) на основі методу скінченних об'ємів. Для опису турбулентних режимів течії теплоносія застосовано $k-\epsilon$ модель турбулентності, що забезпечує прийнятний компроміс між точністю розрахунків і обчислювальними витратами. Моделювання враховує складну геометрію спірально-капсульної структури теплоаккумулятора, умови теплообміну між теплоносієм, корпусом та акумулюючим середовищем, фазовий перехід в теплоаккумуляторному матеріалі, а також граничні умови циркуляції під час режиму тепловіддачі.

За результатами розрахунків встановлено час фазового переходу, теплове навантаження, наявність зон нерівномірного розподілу швидкостей та температури. Виявлено, що нерівномірність прогріву окремих капсульних елементів може досягати 15–25 °С, що суттєво впливає на ефективність використання накопиченої теплової енергії.

Проведене дослідження підтверджує доцільність застосування САЕ/CFD-моделювання як ефективного інструменту для аналізу та оптимізації конструкції теплоаккумуляторів різних типів. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення геометрії каналів, підвищення рівномірності тепловіддачі та скорочення часу теплової підготовки двигуна внутрішнього згоряння, а також для подальшої розробки інтегрованих моделей систем накопичення та використання теплової енергії у транспортних засобах.

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

V. O. PROTSENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-3468-4952

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

I. A. SHATOKHINA

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

MODELING OF HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN A SPIRAL-CAPSULE THERMAL ENERGY STORAGE UNIT FOR THERMAL PREPARATION OF AUTOMOTIVE INTERNAL COMBUSTION ENGINES USING CAE SYSTEMS

The paper presents the results of numerical modeling of hydrodynamic and heat transfer processes occurring in a spiral-capsule thermal energy storage unit designed for the thermal preparation of automotive internal combustion engines. The aim of the study is to analyze the coolant flow behavior in the spiral channels of the thermal accumulator, determine the spatial non-uniformity of the temperature field, evaluate the duration of the phase change process, and assess the efficiency of heat transfer from the heat-accumulating material to the working fluid.

The numerical simulations were performed using computational fluid dynamics (CAE/CFD) methods based on the finite volume approach. Turbulent flow regimes of the coolant were described using the k - ϵ turbulence model, which provides a reasonable balance between computational accuracy and computational cost. The model accounts for the complex geometry of the spiral-capsule structure, heat exchange conditions between the coolant, the accumulator корпус, and the heat-storage medium, the phase change process within the heat-accumulating material, as well as the boundary conditions corresponding to the heat-release operating mode.

The simulation results allowed determination of the phase change duration, thermal load, and identification of zones with non-uniform distributions of velocity and temperature. It was found that temperature differences between individual capsule elements may reach 15–25 °C, which significantly affects the efficiency of utilization of the stored thermal energy.

The conducted study confirms the feasibility of applying CAE/CFD modeling as an effective tool for the analysis and optimization of thermal energy storage devices of various designs. The obtained results can be used to improve channel geometry, enhance the uniformity of heat release, and reduce the time required for thermal preparation of internal combustion engines, as well as to support further development of integrated models of thermal energy storage and utilization systems in vehicles.

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

Постановка проблеми

Формування раціонального теплового стану автомобільного двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) при передпусковій підготовці є однією із важливих задач. Підтримання оптимального температурного режиму роботи силового агрегату при пуску безпосередньо впливає на його паливну економічність, рівень шкідливих викидів, надійність та експлуатаційний ресурс. Відхилення температури основних елементів двигуна від оптимальних значень на етапі пуску та прогрівання двигуна, зокрема в умовах низьких температур навколишнього середовища, призводить до погіршення умов згоряння палива, зростання механічних втрат і зниження загальної ефективності роботи транспортного засобу.

Передпускова теплова підготовка є критично важливою як для автомобілів промислового призначення, так і для сучасних гібридних транспортних засобів, у яких двигун внутрішнього згоряння часто працює в режимі багаторазових зупинок і повторних пусків. Запуск холодного двигуна супроводжується підвищенням зношуванням його елементів, збільшенням споживаного пускового струму, погіршенням динамічних та комфортних характеристик автомобіля, а також зростанням витрат пального й токсичності відпрацьованих газів.

Негативні наслідки холодного пуску зумовлені, зокрема, низькою температурою поверхонь камери згоряння, що ускладнює процеси сумішоутворення та займання. Частина палива надходить у циліндри у рідкому стані, не встигає повністю випаровуватися та згоряти, що призводить до зниження ефективності згоряння і підвищення викидів шкідливих речовин. Використання систем нейтралізації відпрацьованих газів не забезпечує повного вирішення проблеми, оскільки каталізatori також потребують досягнення робочої температури. У міських умовах експлуатації, що характеризуються короткими поїздками, частими зупинками та повторними пусками двигуна, зазначені недоліки проявляються особливо інтенсивно.

Передпускові системи теплової підготовки можуть реалізовуватися у вигляді електричних підігрівачів, що живляться від зовнішньої мережі або бортової електричної системи, автономних підігрівачів на рідкому паливі, а також теплових акумуляторів, які накопичують теплову енергію під час роботи двигуна і використовують її перед наступним пуском. Серед зазначених рішень теплові акумулятори є перспективним напрямом, оскільки дозволяють ефективно використовувати вторинне тепло без додаткових витрат пального чи електроенергії.

Ефективність теплового акумулятора значною мірою визначається особливостями його внутрішньої конструкції, характером руху теплоносія та інтенсивністю теплообміну між акумуляуючим середовищем і робочою рідиною. У цьому контексті особливий інтерес становлять спіральні-капсульні тепло акумулятори з фазовим переходом, які забезпечують компактність, розвинену поверхню теплообміну та можливість інтенсифікації теплопередачі. Дослідження гідродинаміки та теплообміну в таких пристроях із застосуванням сучасних САЕ-методів є необхідною умовою для їх оптимізації та підвищення ефективності передпускової теплової підготовки автомобільних двигунів внутрішнього згоряння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових публікаціях [1–3] висвітлено загальні підходи та принципи реалізації передпускової теплової підготовки ДВЗ. Питання створення та експериментального дослідження комбінованих систем підігріву двигунів і транспортних засобів, розглянуто в роботах [4, 5]. Аналіз екологічних переваг і обмежень застосування теплоакумуляційних технологій у транспорті наведено в джерелах [6]. Вказані системи достатньо актуальні для гібридних автомобілів. Наприклад, дизельні двигуни сімейства TDI з робочим об'ємом 1,6 та 2,0 л, які застосовуються на значній кількості моделей автомобілів марок Volkswagen і Audi, оснащені розвиненою системою керування тепловим режимом. Дана система спрямована на прискорення виходу двигуна на робочу температуру після холодного запуску, а також на раціональне використання теплової енергії, що виділяється в процесі роботи двигуна, з метою підвищення ефективності згоряння паливної суміші. Подача охолоджувальної рідини до окремих контурів системи охолодження здійснюється за допомогою трьох незалежних насосів, робота яких регулюється відповідно до поточного режиму навантаження двигуна. Особливості використання систем накопичення тепла в гібридних автомобілях, зокрема систем збереження теплоти охолоджувальної рідини (Coolant Heat Storage System, CHSS), досліджено в роботі [7].

Конструктивні рішення сучасних систем теплової підготовки, включно з різними варіантами теплоакумуляторів, описані в публікаціях [8] та у низці патентних матеріалів [9–11]. Разом із тим аналіз доступних джерел свідчить, що питання внутрішньої гідродинаміки теплоносія та просторової нерівномірності температурних полів як у системах теплопідготовки загалом, так і безпосередньо в теплоакумуляторах, зокрема спіральні-капсульного типу, залишаються недостатньо дослідженими. Серед небагатьох робіт, у яких порушується проблема температурної неоднорідності під час теплової підготовки двигуна, можна відзначити публікації [12]. Саме наявність цього наукового пробілу визначає мету та завдання даного дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є чисельний аналіз процесів теплопередачі та просторової неоднорідності температурного поля під час роботи теплоакумулятора фазового переходу спіральні-капсульного типу авторської конструкції з визначенням часу фазового переходу. Дослідження виконується для заданого режиму роботи та визначеної схеми циркуляції підігрітої охолоджувальної рідини з використанням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) з врахуванням фазового переходу.

Викладення основного матеріалу дослідження

В якості модельного обладнання було обрано спіральні-капсульний теплоакумуляуючий апарат авторської конструкції (рис. 1, теплоізоляція не показана). Як заготовки для виготовлення капсульних елементів було використано безшовні алюмінієві труби з діаметром 22 мм та товщиною стінки 1,25 мм. Зазначені геометричні параметри обрано як компромісне рішення, що забезпечує достатньо розвинену площу теплообміну між охолоджувальною рідиною та поверхнею капсула за умови збереження прийнятної технологічної складності їх виготовлення.

Внутрішній об’єм капсул заповнювався розплавленим теплоакумуючим матеріалом – октагідратом гідроксиду барію з температурою фазового переходу 78 °С, при цьому у верхній частині повинен залишатися технологічний зазор, необхідний для компенсації теплового розширення речовини під час плавлення.

На відміну від безпосередньо капсульного теплоаккумулятору [12], для фіксації та впорядкування просторового розташування капсул усередині корпусу теплоаккумулятору були спроектовані металеві напрямні спіралі. Запропонована конструктивна схема дозволяє поділити внутрішній об’єм теплоаккумулятору на окремі напрямні секції та суттєво збільшити довжину шляху руху теплоносія в межах пристрою, що сприяє більш повному відбору теплової енергії за один цикл циркуляції, при цьому спіральний рух з тангенціальним підключенням патрубків зменшує гідравлічний опір теплообмінника. Теплоаккумулятор покривається шаром теплоізоляції (не показано на рисунках).

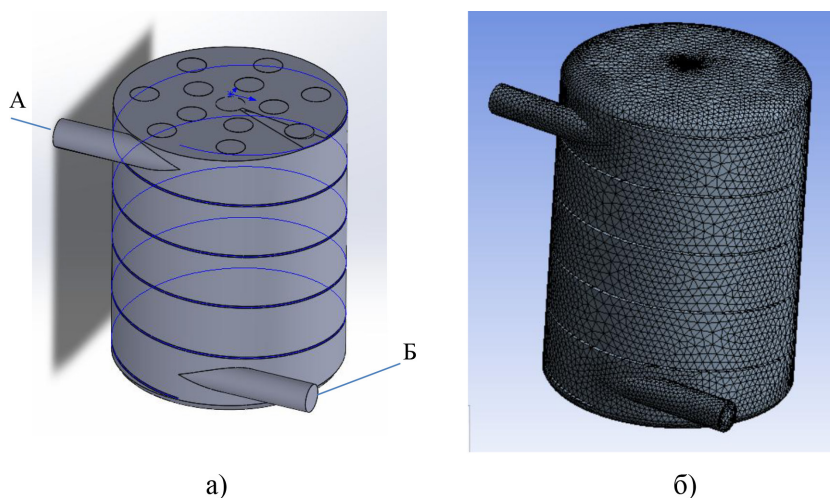


Рис. 1. CAD-модель ТА (а) з вказаними патрубками подачі рідини (А) та виводу (Б) та сітка скінченних об’ємів (б)

Доцільність застосування CFD-моделювання у дослідженні процесів теплової підготовки двигунів внутрішнього згоряння з використанням спіральних-капсульних теплоаккумуляторів зумовлена складним характером гідродинамічних і теплотехнічних явищ, що відбуваються всередині теплоаккумуляційного пристрою. Експериментальні методи дослідження в таких умовах не завжди забезпечують достатню просторову роздільну здатність для достовірного визначення температурних полів та характеристик потоку, особливо на початкових стадіях відбору накопиченого тепла.

Застосування методів обчислювальної гідродинаміки дозволяє детально відтворити структуру руху теплоносія у спіральних і лабіринтних каналах теплоаккумулятору, кількісно оцінити локальні градієнти температури та швидкості, а також ідентифікувати зони з пониженою інтенсивністю теплообміну. Такий підхід забезпечує поглиблений аналіз процесів тепловіддачі від акумулюючого матеріалу до охолоджувальної рідини та створює підґрунтя для обґрунтованої оцінки ефективності конструкції теплоаккумулятору, вибору раціональної схеми циркуляції теплоносія і коригування параметрів теплоаккумуляційної системи з метою підвищення ефективності передпускової теплової підготовки двигуна.

Модельна задача полягала в аналізі теплообміну в апараті з врахуванням фазового переходу від його початку для рідини, що поступає в теплоаккумулятор з вхідною температурою 5 °С та витратою $0,145 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (що забезпечується зовнішньою помпою) в нестационарній постановці.

Фазовий перехід враховувався у відповідності з методом ефективної теплоємності [12] без явного виділення положення границь фазового переходу, з розрахунком конвективного теплопереносу в розплаві:

$$c_{\text{эф}} \rho \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \mathbf{v} \nabla T \right) = \nabla (\lambda_{\text{эф}} \nabla T) + q, \tag{1}$$

де $c_{\text{эф}}$, $\lambda_{\text{эф}}$ – ефективні значення теплоємності й теплопровідності, які враховують теплоту плавлення в задачі Стефана [12] і наявність конвективного теплопереносу, \mathbf{v} – поле швидкостей (конвективні струми), q – потужність внутрішніх джерел тепла, при їхній наявності. Для опису процесу фазового переходу використовується підхід ефективної теплоємності, у межах якого теплоємнісна характеристика матеріалу доповнюється δ -подібною складовою та подається у відповідному аналітичному вигляді

$$c_{\text{эф}} = c(T) + q_n \delta(T - T^*), \tag{2}$$

де T^* – температура фазового переходу.

Під час чисельної реалізації в межах скінченного температурного інтервалу ΔT , що відповідає зоні фазового переходу, другий доданок доцільно апроксимувати відношенням питомої теплоти фазового переходу до ширини цього інтервалу температур $q_n/\Delta T$. Для модельної задачі $\Delta T = 2^\circ\text{C}$, $q_n = 240$ кДж/кг.

Вибір адекватної моделі турбулентності є важливим етапом постановки чисельної задачі. Для дослідження теплогідродинамічних процесів у системі охолодження під час передпускової теплової підготовки двигуна застосовано модель турбулентності $k-\varepsilon$. Дана модель дозволяє з достатньою точністю описувати розподіли швидкостей і температури при відносно невеликих обчислювальних витратах, що є особливо доцільним у межах параметричних і порівняльних досліджень.

Модель $k-\varepsilon$ добре відповідає умовам течії в замкнених каналах системи охолодження, для яких характерний квазіусталений режим руху теплоносія. Її використання забезпечує коректне відтворення узагальноної структури потоку та температурного поля. При цьому виконано контроль значень безрозмірного параметра u^+ у приповерхневих зонах з метою дотримання коректних умов застосування обраної турбулентної моделі.

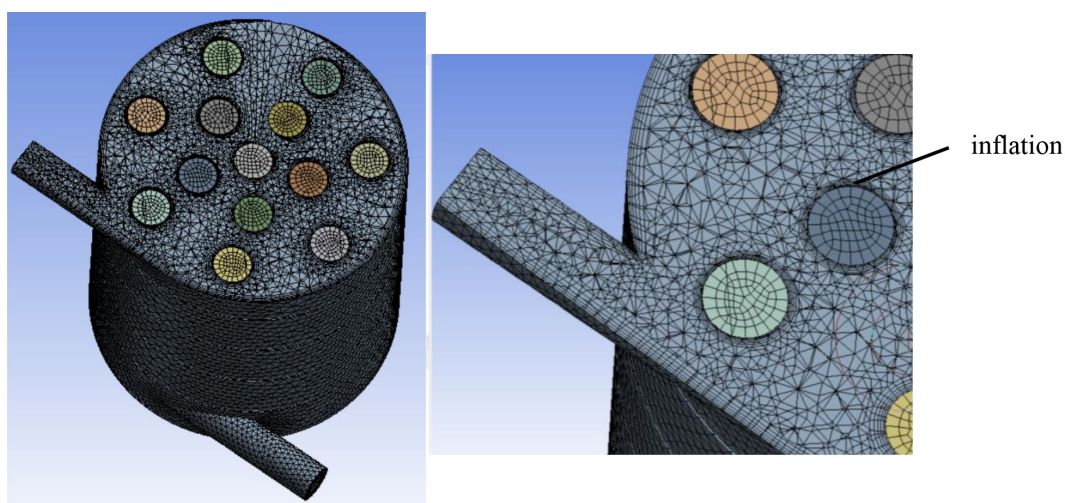


Рис. 2. Сітка скінченних об'ємів з шаром (inflation) призматичних комірок

Для розв'язання гідродинамічної частини задачі граничні умови задавалися у вигляді вхідної швидкості, визначеної на основі заданої витрати теплоносія, а для зливного каналу використовувалася умова типу Outlet. У тепловій постановці на вході потоку була задана температура охолоджувальної рідини, що становить 5°C . Для коректного опису теплообміну між окремими областями моделі застосовано різні типи інтерфейсів: на межі контакту твердого тіла з рідиною використано умову Conservative Interface Flux, для сполучення рідинних областей задано інтерфейс типу General Connection, тоді як для зовнішніх поверхонь твердих доменів встановлено граничну умову тепловіддачі.

За результатами розрахунків було отримано температурні карти фреймів нестационарної задачі для 120 с прогріву. Температурні карти та лінії току показані на рис. 3.

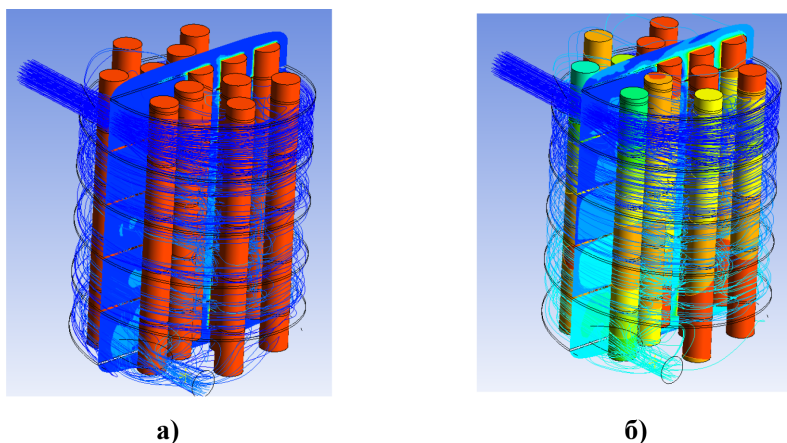


Рис. 3. Карта поля температур та лінії току на початкових кроках за часом (а) та на проміжних кроках (б)

На рис. 4 (а) показано графік температур всередині однієї з капсул у часі. На рис. 4 (б) показано графік температур у часі рідини для вихідного патрубку. З рис. 4 (а) бачимо, що час фазового переходу становить близько 57 с, після чого йде подальша швидка розрядка теплоаккумулятору. Починаючи з 20-ї секунди роботи (рис. 4, б) тепловий перепад між входом та виходом становить не менш, ніж $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, досягаючи пікового значення в $31 - 5 = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ близько 70-ї секунди роботи.

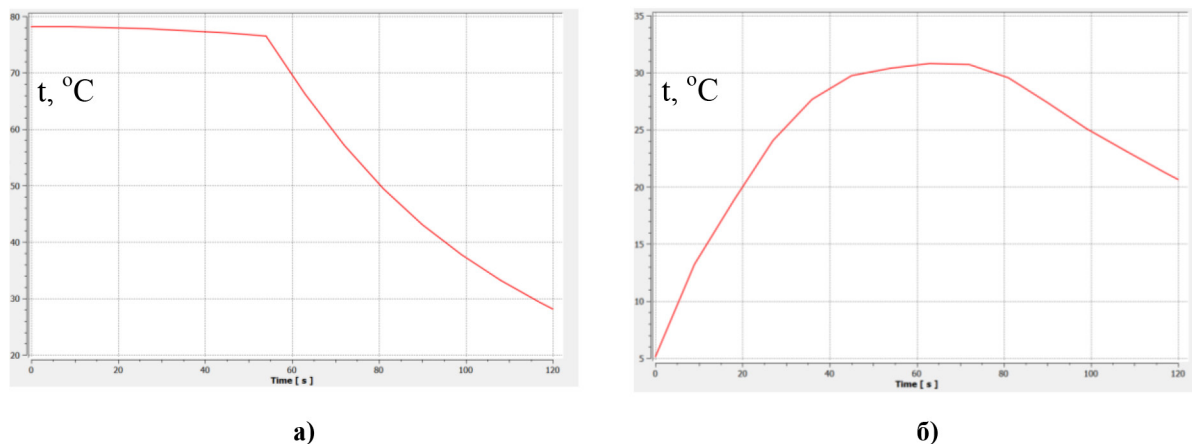


Рис. 4. Графік температур всередині капсули у часі (а) та графік температур у часі рідини для вихідного патрубку (б)

Розраховані поля швидкостей теплоносія та відповідні лінії току, представлені на рис. 3, дозволяють проаналізувати як загальну ефективність тепловіддачі у спірально-капсульному теплоаккумуляторі, так і локальні особливості процесів теплообміну між охолоджувальною рідиною та капсульними елементами. Отримані результати є інформативними для оцінювання рівномірності відбору накопиченої теплової енергії в межах усього об'єму теплоаккумулятора.

Аналіз розподілу швидкостей показує, що рух теплоносія в каналах між капсулами має просторово неоднорідний характер. Найбільш характерною особливістю є формування зон з пониженою швидкістю течії у ділянках під кришкою та днищем. У зазначених областях інтенсивність конвективного теплообміну знижується, що призводить до менш ефективного відбору тепла від теплоакуюючого матеріалу та формування нерівномірного температурного поля, що підтверджується відповідними картами розподілу температури. Ці місця доречно узгоджувати з величиною технологічних зазорів, необхідних для компенсації теплового розширення речовини під час плавлення.

Додатково встановлено, що в межах спірально-капсульного теплоаккумулятора спостерігається суттєва неоднорідність температури капсульних елементів: різниця між найбільш нагрітими та найменш прогрітими зонами може досягати близько $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. У окремих ділянках поверхонь капсул та прилеглих каналів ця різниця зростає до $30\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такий характер температурного розподілу є важливим з точки зору термічних напружень і може впливати на ефективність тепловіддачі та довговічність теплоаккумулятора в умовах циклічної експлуатації.

Загальний гідравлічний опір тепло акумулятора становить $\approx 100\text{ Па}$. Вказані гідравлічні втрати дуже незначні у порівнянні з втратами на подолання опору патрубків та трубопроводів зовнішньої системи теплопідготовки та каналів двигуна, тому можуть бути знехтувані при загальному гідравлічному розрахунку помпи.

Висновки

Виконане чисельне моделювання підтверджує високу інформативність CFD-аналізу для дослідження гідродинамічних і теплотехнічних процесів, що відбуваються у спірально-капсульному теплоаккумуляторі, призначеному для теплової підготовки автомобільних двигунів внутрішнього згорання. Отримано детальні дані щодо розподілу швидкостей і температури теплоносія в каналах теплоаккумулятора, що дозволило комплексно оцінити ефективність відбору накопиченої теплової енергії та рівномірність прогріву капсульних елементів.

Встановлено час фазового переходу теплоакуюючого матеріалу. Знайдено теплове навантаження між входом та виходом не становить менш, ніж $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, досягаючи пікового значення в $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результати розрахунків показали, що рух охолоджувальної рідини в умовах складної спірально-лабіринтної геометрії супроводжується формуванням зон з пониженою швидкістю потоку, особливо у ділянках під кришкою та днищем. Наявність таких зон призводить до локального зниження інтенсивності теплообміну та формування помітних температурних градієнтів у теплоакуюючому матеріалі та елементах конструкції теплоаккумулятора. Виявлена нерівномірність теплового поля свідчить про необхідність обґрунтованого вибору геометрії каналу, конфігурації капсул і параметрів циркуляції теплоносія з метою підвищення ефективності тепловіддачі.

Проведений аналіз підтверджує, що CFD-розрахунки є обов'язковим етапом комплексного проектування та оптимізації систем теплової підготовки двигунів із використанням теплоаккумуляційних пристроїв. Чисельне моделювання забезпечує не лише кількісну оцінку теплових і гідравлічних характеристик теплоаккумулятора, але й дозволяє здійснювати інженерну перевірку доцільності застосування різних схем циркуляції, конструктивних рішень і типів теплоакмулюючих елементів. Такий підхід формує науково обґрунтовану основу для підвищення енергоефективності систем теплопідготовки, скорочення часу теплової підготовки та подальшої розробки інтегрованих моделей повного циклу роботи теплоаккумуляційних систем – від накопичення теплоти до її передачі у ключові зони двигуна під час запуску.

Список використаної літератури

1. 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
2. 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
3. Anghelache G., Boriaru N. General Preheating System for Cold Starting of Internal Combustion Engine//*SAE Technical Paper* 940107. 1994. DOI: 10.4271/940107
4. 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.
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. 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
7. Волков В. П., Грицук І. В., Володарець М. В., Погорлецький Д. С., Симоненко Р. В. Особливості дослідження теплоенергетичних характеристик теплоакмулюючого 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
8. Ключев О.І., Русанов С.А., Шатохіна І.А. Нові конструкції теплових акумуляторів для передпускової підготовки двигунів внутрішнього згоряння автомобілів//*Вісник ХНТУ*. 2024. № 1(88). С. 41–48.
9. 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 згоряння: пат. на корисну модель № 137780 Україна: МПК F02N 15/00, F24H 7/00. – Заявл. 03.04.2019; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21.
10. 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.
11. Луняка К. В., Ключев О. І., Русанов С. А., Ключева О. О., Коновалов Д. В. Тепловий акумулятор для передпускового прогріву двигуна внутрішнього згоряння: пат. на корисну модель № 149067 Україна: МПК F02N 15/00, F24H 7/00. Заявл. 26.05.2021; опубл. 13.10.2021, Бюл. № 41.
12. 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.

References

1. 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>
2. 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>
3. 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>
4. 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.
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. 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>
7. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., Volodarets, M. V., Pohorletsyky, 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
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Dmytriiev, D. O., Appazov, E. S., Rusanov, S. A., & Kliuiev, O. I. (2015). Modeliuvannia protsesu rozihrovu dvyhuna z teplovyim 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.

Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026