

Współpraca akumulatora ciepła z układem chłodzenia silnika spalinowego

ZYGMUNT LIPNICKI¹, ARKADIUSZ RUBASZEWSKI²

¹Politechnika Zielonogórska, ²Elektrociepłownia „Zielona Góra” S.A.

W pracy rozważa się możliwości zastosowania akumulatora ciepła, którego działanie oparte jest na przemianie fazowej, do wspomagania pracy silnika spalinowego w niskich temperaturach. Ciepło przez jego stopienie w trakcie normalnej eksploatacji silnika. W momencie rozruchu zimnego silnika stopiony wcześniej materiał PCM krzepnie, oddając ciepło krzepnięcia plynowi chłodzącemu, powodując jego szybki wzrost temperatury. Proponowana jest również koncepcja konstrukcji akumulatora ciepła: jego geometria oraz właściwości termofizyczne materiału przemiany fazowej. Proponowany prosty jednowymiarowy niestacjonarny model teoretyczny pozwala w zadowalający sposób określić parametry konstrukcyjne i parametry pracy akumulatora: czas topienia i krzepnięcia, moc grzania w zależności od czasu. Z analizy modelu wynika, że początkowa moc cieplna akumulatora jest relatywnie największa. Właściwość ta jest bardzo korzystna w pracy akumulatora ciepła.

1. Wprowadzenie

Akumulatory ciepła, których działanie oparte jest na wykorzystaniu przemiany fazowej (ciepła krzepnięcia) były opisane w wielu publikacjach [1, 2, 3, 4]. Szczególnie interesujące są jednak zastosowania tego typu akumulatorów w konkretnych urządzeniach technicznych. W pracy [4] opisano próbę zastosowania akumulatora ciepła do wspomagania pracy silników autobusowych przy niskich temperaturach. Proponowany tu akumulator ciepła zbudowano z układu cienkich walcowych kapsulek, wypełnionych czynnikiem podlegającym przemianie fazowej. Obliczenia teoretyczne opisujące wymianę ciepła wykonano numerycznie, a następnie sprawdzono eksperymentalnie. Stosowana metoda wymaga kłopotliwych obliczeń numerycznych. Rozwiązanie konstrukcyjne tego akumulatora ciepła wydaje się mało efektywne z powodu osiągniętej małej mocy grzania w porównaniu z jego masą.

W niniejszej pracy proponowany jest akumulator ciepła zbudowany z płaskich plastrów wypełnionych czynnikiem PCM (phase change material) podlegającym przemianie fazowej. Przyjęty kształt i wymiary elementów składowych akumulatora umożliwiają zastosowanie prostego modelu fizycznego zjawiska do teoretycznego opisu.

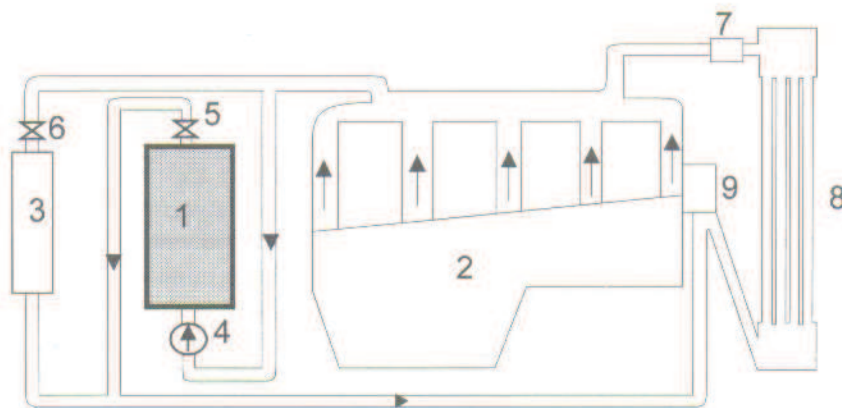
W rozważanym akumulatorze powierzchnia wymiany ciepła jest relatywnie duża, a więc możliwe jest osiągnięcie względnie dużej mocy grzania.

Silniki spalinowe stosowane w pojazdach, mimo że powstały ponad sto lat temu, mają wiele wad. Bezpośrednio po uruchomieniu temperatura ich jest niska i z tego względu nie jest możliwa optymalna praca. Praca zimnego silnika jest bardzo uciążliwa dla środowiska naturalnego i jest przyczyną nadmiernego zużycia paliwa oraz samego silnika. Silnik spalinowy po uruchomieniu powinien pracować pewien czas, aby osiągnąć swoje nominalne parametry pracy. W celu eliminacji tej wady stosowane są różnego rodzaju dodatkowe urządzenia grzejne, które czerpią energię z zewnątrz i są niewygodne w stosowaniu.

Akumulator ciepła współpracujący z silnikiem spalinowym ma niwelować niedogodności „zimnego startu”, a zarazem nie wymaga zasilania z zewnątrz. Ciepło, które będzie ogrzewało silnik przed jego uruchomieniem, jest wcześniej zakumulowane, podczas normalnej pracy. Silnik spalinowy tylko do ok. 40% energii uzyskanej z paliwa przetwarza na pracę mechaniczną. Reszta energii odprowadzana jest do otoczenia w następstwie unoszenia ciepła przez spaliny i układ chłodzenia silnika. Zadaniem akumulatora ciepła jest zatrzymanie części ciepła z układu chłodzenia silnika za pomocą materiału PCM. Materiał PCM znajdujący się w akumulatorze ciepła podczas pracy silnika roztapia się, pobierając ciepło chłodzenia silnika. Po wyłączeniu silnika materiał PCM w izolowanym akumulatorze pozostaje w stanie roztopionym. W chwili uruchomienia silnika wychłodzonego podczas postoju, włącza się elektryczną pompkę, która przetacza płyn chłodzący przez akumulator i silnik. Materiał PCM krzepnie oddając ciepło i ogrzewając ciecz chłodzącą, a tym samym blok oraz głowicę silnika. Po niedługim czasie osiąga on taką temperaturę, że problem „zimnego startu” staje się dużo mniej uciążliwy.

Do korzyści wynikających ze współpracy akumulatora ciepła z silnikiem pojazdu można zaliczyć: zmniejszenie zatruć środowiska, spadek zużycia paliwa, mniejsze zużycie silnika, poprawa bezpieczeństwa i komfortu użytkowania pojazdu.

2. Propozycja zastosowania akumulatora ciepła do silnika spalinowego



Rys. 1. Akumulator ciepła w układzie chłodzenia silnika.

Fig. 1. The heat accumulator in the cooling system

Sposób zastosowania akumulatora ciepła w samochodzie przedstawia rys. 1. Urządzenie powinno być włączone w układ chłodzenia silnika równolegle z nagrzewnicą (3). Ustawienie akumulatora ciepła (1) powinno być tak dobrane, aby podczas przepływu płynu chłodzącego uniknąć jego zapowietrzenia, a zarazem przewody łączące były jak najkrótsze.

Pracę akumulatora ciepła w układzie chłodzącym silnika można podzielić na następujące fazy:

1. Faza ładowania akumulatora.

Podczas jazdy otwarty jest elektrozawór (5). Część płynu chłodzącego, obiegającego układ chłodzenia dzięki pompie (9) przepływa przez akumulator (1), roztopiając materiał PCM. Pompa wimikowa (4) w tym czasie nie pracuje, lecz przepuszcza krążący płyn dzięki jej małym oporom przepływu.

2. Faza spoczynkowa akumulatora.

W chwili wyłączenia silnika zamykany jest elektrozawór (5), co zapobiega konwekcji swobodnej w układzie chłodzącym i przepływowi energii do układu. Materiał PCM w dobrze izolowanym cieplnie akumulatorze (1) pozostaje w stanie ciekłym.

3. Faza rozładowywania akumulatora.

W momencie uruchomienia zimnego silnika zamka się zawór nagrzewnicy (6) i włącza na określony czas pompa (4) przy otwartym elektrozaworze (5). Ciecz chłodząca obiega układ akumulator ciepła (1) — silnik (2), omijając nagrzewnicę (3) i chłodnicę (8), która jest odcięta przez zamknięty zawór termostatu (7). Materiał PCM karnie oddając ciepło płynowi chłodzącemu i w dalszej kolejności silnikowi.

4. Faza końcowa.

Po określonym czasie działania wyłącza się pompa (4), zawór (5) pozostaje otwarty, po uruchomieniu silnika (2) otwiera się zawór nagrzewnicy (6). Pompa (9) pracuje wraz z silnikiem, a obiegający płyn chłodzący powoduje, że akumulator początkowo ogrzewa pracujący już silnik pozostałością zakumulowanego ciepła. Ponownie nagrany silnik topi materiał PCM w akumulatorze.

3. Model teoretyczny zjawiska

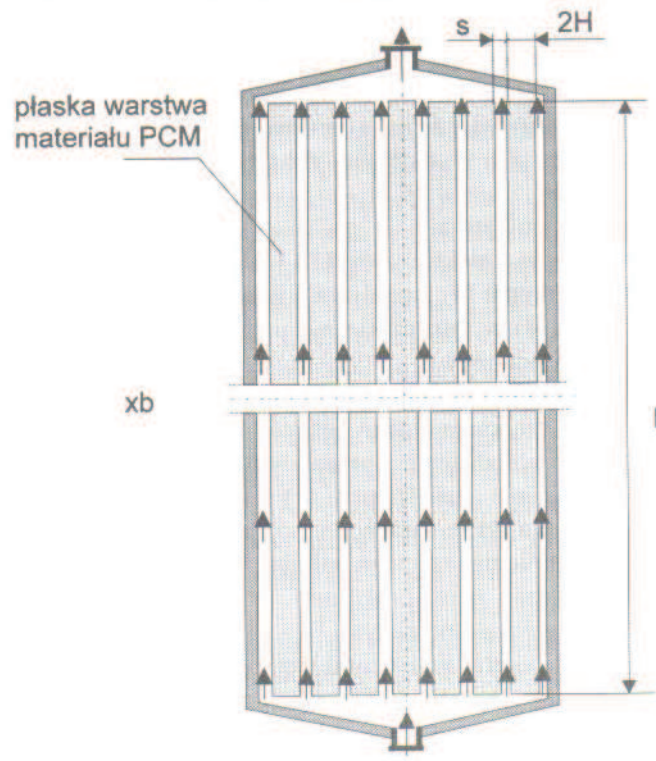
Akumulator ciepła (rys. 2) składa się z wielu jednakowych elementów zbudowanych z płaskich warstw materiału PCM o grubości $2H$, szerokości b , długości l każdy i ograniczonych z dwóch stron cienkimi metalowymi płytami. Na zewnątrz elementów znajdują się płaskie kanały o szerokości s , w których przepływa płyn chłodzący odbierający ciepło przemiany fazowej (ciepło krzepnięcia).

Geometrię części symetrycznej rozważanego elementu i model zjawiska przedstawiono na rys. 3.

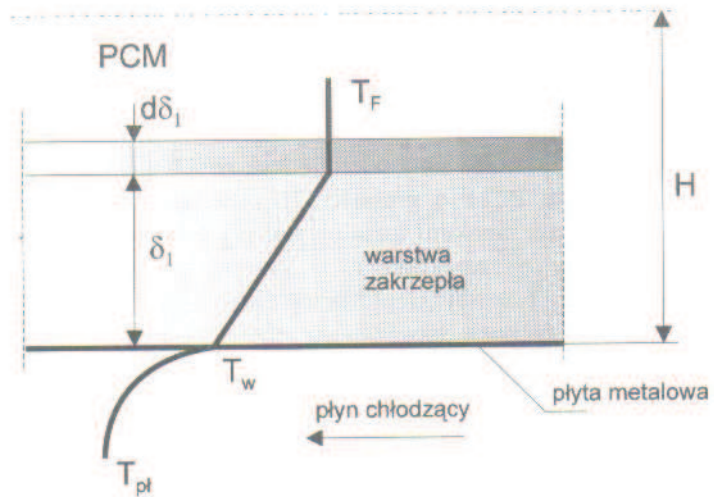
Ciepło przemiany fazowej, które wydziela się w trakcie procesu krzepnięcia na powierzchni rozdziału faz, w układzie jednowymiarowym opisuje proste równanie

$$\dot{q} = \rho \cdot L \cdot \frac{d\delta_1}{dt}, \quad (1)$$

gdzie: L jest ciepłem krzepnięcia materiału, ρ gęstością, δ_1 grubością warstwy zakrzepłej, a t czasem.



Rys. 2. Akumulator ciepła.
Fig. 2. The heat accumulator



Rys. 3. Model krzepnięcia i przepływu ciepła.
Fig. 3. The solidification model of PCM

Strumień ciepła \dot{q} przepływający, w kierunku spadku temperatury (rys. 3), od krzepnącego materiału PCM doznaje oporu przepływu na powstającej warstwie zakrzepłej i w wyniku oporu przejmowania ciepła od płaskiej płyty do przepływającego płynu chłodzącego (wydzielanie się ciepła jest tymi zjawiskami zdeterminowane). Opór ciepły przez samą płytę pominięto, gdyż metal z którego ona jest wykonana ma bardzo dużą przewodność cieplną. Część strumienia ciepła, która jako mała w dalszych rozważaniach będzie pominięta, jest akumulowana w warstwie zakrzepłej.

Strumień ciepła przepływający od krzepnącego materiału PCM opisują więc równania:

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{\delta_1} \cdot (T_F - T_W) = \alpha \cdot (T_W - T_{pl}), \quad (2)$$

gdzie T_F , T_W , T_{pl} oznaczają odpowiednio temperaturę krzepnięcia, temperaturę ścianki i temperaturę płynu chłodzącego, a λ i α współczynniki przewodzenia ciepła materiału PCM i przejmowania ciepła od płyty do płynu chłodzącego.

Przekształcając odpowiednie powyższe wyrażenia otrzymano równanie różniczkowe określające położenie powierzchni rozdziału faz

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot L}{\lambda} \cdot \frac{d\delta_1^2}{dt} + \frac{\rho \cdot L}{\alpha} \cdot \frac{d\delta_1}{dt} = T_F - T_{pl}, \quad (3)$$

które sprowadzono następnie do postaci bezwymiarowej

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{d\delta^2}{d\tau} + \frac{1}{Bi} \cdot \frac{d\delta}{d\tau} = 1, \quad (4)$$

gdzie:

$\delta = \frac{\delta_1}{H}$ — jest bezwymiarową grubością warstwy zakrzepłej,

$\tau = Ste \cdot Fo$ — jest czasem bezwymiarowym,

$Ste = \frac{c \cdot (T_F - T_{pl})}{L}$ — jest liczbą Stefana,

$Fo = \frac{t \cdot a}{H^2}$ — jest liczbą Fouriera

$Bi = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda}$ — jest liczbą Biota,

c — jest ciepłem właściwym warstwy zakrzepłej,

a — jest współczynnikiem dyfuzji cieplnej warstwy zakrzepłej.

Rozwiązaniem równania różniczkowego (4) przy warunku początkowym

$$\delta = 0 \quad \text{dla} \quad \tau = 0, \quad (5)$$

jest równanie

$$\frac{1}{2} \cdot \delta^2 + \frac{1}{Bi} \cdot \delta - \tau = 0, \quad (6)$$

Tego typu rozwiązanie można spotkać w literaturze [1].

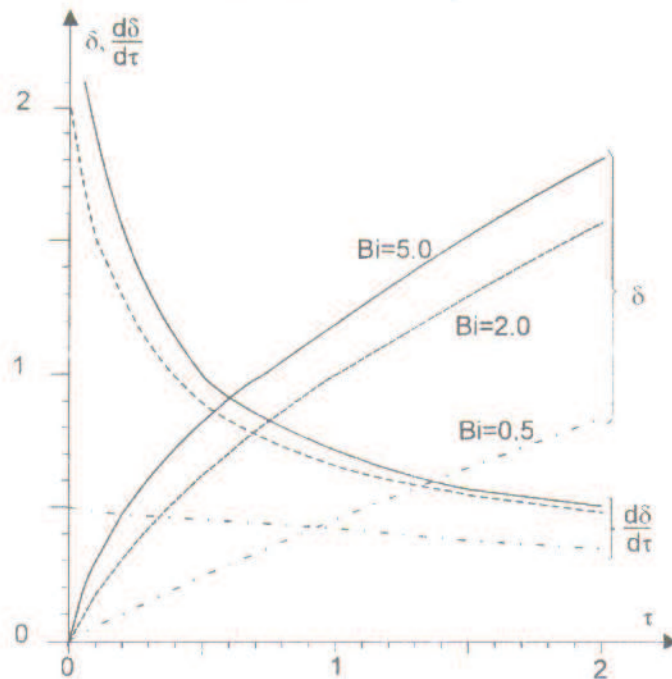
Z praktycznego punktu widzenia interesujące rozwiązanie w rozważanym przypadku ma postać:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{Bi^2} + 2 \cdot \tau} - \frac{1}{Bi}. \quad (7)$$

Szybkość narastania grubości warstwy zakrzepłej opisuje z kolei równanie:

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Bi^2} + 2 \cdot \tau}}. \quad (8)$$

Graficznie zależności (7) i (8) przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Grubość i szybkość narastania warstwy zakrzepłej dla różnych liczb Biota.
Fig. 4. The placement of solidification front for the different Biot numbers

Moc grzania jednego elementu oblicza się z równania:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= q \cdot L \cdot \frac{d\delta_1}{dt} \cdot F_i = \frac{q \cdot L \cdot \alpha}{H} \cdot Ste \cdot F_i \cdot \frac{d\delta}{d\tau} \text{ [kW]} \\ \frac{\dot{Q}}{\frac{q \cdot L \cdot \alpha}{H} \cdot Ste \cdot F_i} &= \frac{d\delta}{d\tau} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Bi^2} + 2 \cdot \tau}} \frac{d\delta}{d\tau}(0) = Bi, \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie F_i jest powierzchnią jednego elementu.

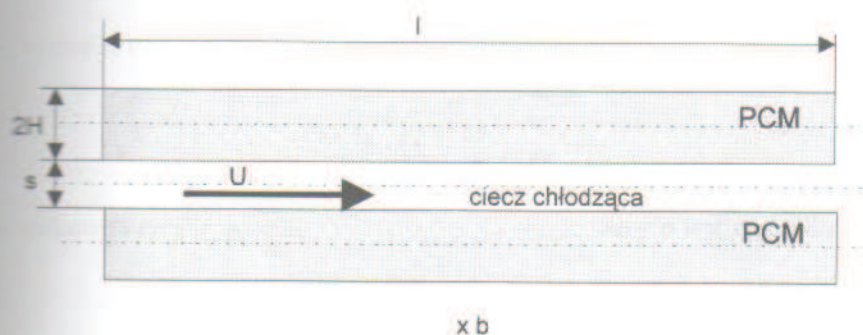
Ciepłota ilość ciepła krzepnięcia wydzielona z jednego elementu w czasie t wynosi:

$$Q = \int_0^t \dot{Q} \cdot dt = \rho \cdot L \cdot F_i \cdot \int_0^t \frac{d\delta_1}{dt} \cdot dt = \rho \cdot L \cdot F_i \cdot \int_0^t d\delta_1 = \rho \cdot L \cdot F_i \cdot [\delta_1(t) - \delta_1(0)], \quad (10)$$

$$Q = \rho \cdot L \cdot F_i \cdot H \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{Bi^2} + 2 \cdot \tau} - \frac{1}{Bi} \right) \text{ [kJ]}$$

3.1. Przykładowe obliczenia projektowe samochodowego akumulatora ciepła

Samochodowy akumulator ciepła składa się z siedmiu płaskich pinowych plasterków wypełnionych materiałem PCM i obudowanych cienką blachą metalową. Ciepło krzepnięcia wydzielone w każdym plasterze przejmowane jest przez przepływający w układzie chłodzenia płyn chłodzący. Schemat pojedynczego plasterka przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Schemat geometryczny elementu akumulatora ciepła.
Fig. 5. The element of the heat accumulator

Dane obliczeniowe:

- temperatury początkowa, końcowa i średnia płynu chłodzącego wynoszą odpowiednio:

$$T_p = -10^\circ\text{C}, \quad T_k = 20^\circ\text{C} \quad \text{i} \quad T_{sr} = 5^\circ\text{C} (T_{sr} = T_{pl});$$

- wydajność pompki obiegowej $\dot{V} = 40 \text{ l/min}$;
- parametry termofizyczne czynnika chłodzącego w temperaturze średniej (glikol etylowy):
 - lepkość kinematyczna $\nu_p = 4,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,
 - liczba Prandtla $Pr = 27,6$,
 - współczynnik dyfuzji ciepła $\alpha_p = 0,148 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,
 - współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda_p = 0,582 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,
 - ciepło właściwe $c_p = 3,83 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,
 - gęstość $\rho_p = 1030 \text{ kg}/\text{m}^3$;

- parametry termofizyczne materiału PCM (n-oktakożan $C_{28}H_{58}$):
 ciepło krzepnięcia $L = 253,3$ kJ/kg,
 współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda = 0,267$ W/(m·K),
 gęstość $\rho = 900$ kg/m³,
 współczynnik dyfuzji ciepła $\alpha = 1,55 \cdot 10^{-7}$ m²/s,
 ciepło właściwe $c = 1,92$ kJ/(kg·K);
- długość, szerokość, wysokość plastra i szerokość szczeliny kanału przepływowego wynoszą odpowiednio:

$$L = 0,380 \text{ m}, \quad b = 0,300 \text{ m} \quad \text{ i } \quad 2H = 0,007 \text{ m}, \quad s = 0,003 \text{ m};$$

- masa płynu chłodzącego w układzie $m_p = 4$ kg;
- masa bloku silnika spalinowego ;
- średnie ciepło właściwe bloku silnika $c_b = 0,42$ kJ/(kg·K).

Obliczenia:

Ciepło potrzebne do ogrzania płynu chłodzącego wraz z blokiem silnika:

$$Q = (m_p \cdot c_p + m_b \cdot c_b) \cdot (T_k - T_p) = 649 \text{ kJ},$$

a odpowiadająca minimalna masa materiału PCM ma wartość:

$$m = \frac{Q}{L} = 2,56 \text{ kg}.$$

Liczba Stefana jest równa:

$$\text{Ste} = \frac{c \cdot (T_F - T_{sp})}{L} = 0,432.$$

Współczynnik przyjmowania ciepła między płytą metalową a płynem chłodzącym dla bardzo cienkiego płaskiego kanału i w pełni rozwiniętego przepływu przyjęto na podstawie literatury[5]. Liczba Nusselta w rozważanym przypadku wynosi

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot 4 \cdot s}{\lambda_p} = 7,55,$$

a stąd współczynnik przyjmowania ciepła przyjmuje wartość:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_p}{4 \cdot s} = 366 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}},$$

a odpowiadająca mu liczba Biota:

$$\text{Bi} = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda} = 4,11.$$

Bezwymiarowy czas całkowitego skrzepnięcia płaskiej warstwy materiału PCM na podstawie wzoru (6) wynosi:

$$\tau_c = \frac{1}{2} = \delta^2 + \frac{1}{Bi} \cdot \delta = 0,743,$$

współmierną liczbą Fouriera:

$$Fo_c = \frac{\tau_c}{Ste} = 1,72$$

czas wymiarowy:

$$t_c = \frac{Fo_c \cdot H^2}{\alpha} = 135,9 \text{ s.}$$

Moc grzania i całkowite ciepło przemiany (patrz wzór 9) przyjmują odpowiednie wartości:

— w chwili początkowej:

$$\dot{Q}(0) = \frac{\varrho \cdot L \cdot \alpha}{H} \cdot Ste \cdot F \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Bi^2} + 2 \cdot 0}} = 28,61 \text{ kW},$$

— w chwili końcowej:

$$\dot{Q} = \frac{\varrho \cdot L \cdot \alpha}{H} \cdot Ste \cdot F \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Bi^2} + 2 \cdot \tau_c}} = 5,60 \text{ kW},$$

— całkowite ciepło grzania:

$$Q_c = \varrho \cdot L \cdot F \cdot H \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{Bi^2} + 2 \cdot \tau} - \frac{1}{Bi} \right) = 1,273 \text{ MJ},$$

— średnia moc grzania w czasie t_c :

$$\bar{Q} = \frac{Q_c}{t_c} = 9,37 \text{ kW}.$$

4. Wnioski

Akumulator ciepła oparty na wykorzystaniu przemiany fazowej, współpracujący z układem chłodzenia silnika samochodowego, wydawnie może poprawić jego pracę przede wszystkim w okresie zimowym. Przedstawiony akumulator ciepła osiąga stosunkowo dużą moc grzania, szczególnie w okresie początkowym jego pracy, co należy uznać za bardzo istotną zaletę. Proponowany model teoretyczny zjawiska może być użyteczny przy wstępnym projektowaniu tego typu urządzeń.

Zakres zastosowania przedstawionego w pracy akumulatora ciepła jest dużo szerszy. Oprócz wspomaganie pracy samochodowego silnika spalinowego zasilanego paliwem ciekłym lub gazowym, może być wykorzystany w innych urządzeniach, gdzie istnieje potrzeba dostarczenia dużego strumienia ciepła w początkowej fazie pracy.

Literatura

- [1] VISKANTA R.: *Phase-change heat transfer*. Chapter 5, Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, L. G.A., Editor, CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, pp. 153–222, 1983.
- [2] DOMAŃSKI R., MOSZYŃSKI J.R.: *Możliwości i problemy magazynowania energii cieplnej*, Biuletyn Informacyjny Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej, Nr 62, s. 28–58, 1983.
- [3] LIPNICKI Z.: *Krzepnięcie cieczy przepływającej w kanale chłodzącym*, Wydawnictwo Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra 1999.
- [4] VASILEV L.L., BURAK V.S., KULAKOV A.G., MISHKINIS D.A., BOHIAN P.V. (eds. HUTTER, WANG Y., BEHRENDT H.): *Heat storage for a bus petrol internal-combustion engine*, Advanced In Cold Region Thermal Engineering and Sciences, Springer-Verlag, pp. 585–594, 1999.
- [5] SHAH R.K., LONDON A.L.: *Laminar flow forced convection in ducts*, Academic Press, New York, San Francisco, London 1978.

The co-operation of the heat accumulator with the internal combustion engine system cooling

Summary

The paper presents a possible application of thermal energy accumulator, of which action is based on the phase exchange, to support the work of the internal combustion engine in the low temperature conditions. The heat change phase (latent heat) is accumulated in material PCM (phase change material) by its melting in normal time exploitation. For the starting of the cold engine the melted earlier material PCM solidifying. The heat from the PCM flows to the cooling liquid. It causes the fast increase of the temperature of the cooling liquid. The construction of the accumulator heat, both, the geometrical and the physical properties of the material are proposed. The simple one dimension unsteady theoretical model was used. This model allows finding both the construction parameters and the working parameters: the melting and solidifying time, the power of heat dependent on the time. From the theoretical analysis results, that the initial heat power of the accumulator is relatively the highest. This property is very important in the working of this accumulator.