



Robert ZARZYCKI*, Zbigniew Bis**, Krzysztof WALACIK***

Badania procesu rozmrażania węgla w wagonach kolejowych

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych procesu rozmrażania węgla w wagonach kolejowych. Transport węgla w czasie zimy może powodować problemy z jego rozładunkiem, a tym samym zagrażać ciągłości dostaw paliwa do elektrowni oraz podnosić koszty jego dostawy. Konieczne jest jego rozmrażanie, które realizowane jest najczęściej z wykorzystaniem promienników podczerwieni. Rozmrażanie węgla w wagonach kolejowych wymaga nagrzania ścian wagonów do założonej bezpiecznej temperatury i utrzymania jej przez cały czas procesu rozmrażania.

W pracy omówiono metodykę wyznaczania i obliczania zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła dla warstwy węgla. Przeprowadzone badania eksperymentalne oraz symulacje numeryczne wykazały, że w przypadku niekorzystnych warunków atmosferycznych nastąpić może zamarznięcie warstwy węgla w czasie 8 godzin na głębokość około 100 mm. W takim przypadku minimalny czas rozmrażania, który zapewni rozmrożenie warstwy węgla na głębokość około 65 mm i umożliwi rozładunek wynosi około 1 godziny.

SŁOWA KLUCZOWE: węgiel kamienny, transport kolejowy, rozmrażanie węgla

* Dr inż.,** Prof. dr hab. inż. – Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Katedra Inżynierii Energii, Częstochowa; e-mail: zarzycki@is.pcz.czest.pl, zbis@is.pcz.czest.pl

*** Mgr inż. – 2 Kwarki Krzysztof Walacik, Ignachy; email: 2kwarki@g-mail.com

Wprowadzenie

Rozwój cywilizacji powoduje wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną oraz ciepło. Polska energetyka zawodowa opiera się w 84% na wykorzystaniu paliw kopalnych (Gawlik i in. 2013). Wydobycie węgla kamiennego odbywa się głównie w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, na którego obszarze znajdują się wszystkie czynne kopalnie, z wyjątkiem jednej – Lubelski Węgiel Bogdanka S.A. – działającej na terenie Lubelskiego Zagłębia Węglowego (Gawlik i in. 2013). Ze względów logistycznych znaczna część elektrowni zawodowych zlokalizowana jest w rejonach wydobycia węgla kamiennego. Przesył energii elektrycznej na znaczne odległości powoduje jej straty oraz konieczność budowy odpowiedniej infrastruktury do jej przesyłu. Wymusza więc to konieczność budowy elektrowni zawodowych w miejscach znacznie oddalonych od stref wydobycia paliwa. Przykładem takich elektrowni mogą być Kozienice, Opole, Dolna Odra, Połaniec, Stalowa Wola i inne. Paliwo do tych obiektów energetycznych dostarczane jest najczęściej transportem kolejowym, a następnie magazynowane na placu składowym. Na placach tych musi być składowana wymagana minimalna ilość paliwa zapewniająca pracę elektrowni i elektrociepłowni nawet na 30 dni (Dz. U. z 2012 r. poz. 1059, Dz. U. z 2003 r. Nr 39, poz. 338, Dz. U. z 2010 r. Nr 108, poz. 701). Pomimo istnienia zapasu paliwa na placu składowym konieczne jest jego bieżące uzupełnianie (Dz. U. z 2012 r. poz. 1059) poprzez transport węgla wagonami kolejowymi. Ciągłość dostaw węgla do elektrowni zależy od wielu czynników, a mianowicie: dostępności paliwa na rynku, sytuacji politycznej, sytuacji gospodarczej, infrastruktury dotyczącej transportu, warunków atmosferycznych w szczególności w okresie zimowym. W czasie zimy transport węgla może być zagrożony ze względu na trudności z komunikacją składów towarowych, jak i z trudnością z jego rozładunkiem.

1. Transport kolejowy węgla

Transport węgla do elektrowni odbywa się najczęściej wagonami odkrytymi tzw. węglarkami o ładowności około 60 ton. Transport węgla może odbywać się z prędkością do 120 km/h w zależności od trasy składu oraz rodzaju wagonów. Załadunek węgla odbywa się mechanicznie za pomocą czerpaków, taśmociągów lub suwnic w miejscach jego wydobycia, natomiast rozładunek realizowany jest w elektrowniach i elektrociepłowniach najczęściej na wywrotnicach czołowych lub bocznych (PKP CARGO S.A. 2013).

W okresie zimowym podczas opadów atmosferycznych śniegu lub śniegu z deszczem na podłodze wagonu i ścianach może znajdować się warstwa śniegu. W przypadku załadunku wilgotnego paliwa może nastąpić jego przymarzanie do podłogi oraz ścian bocznych wagonu. W przypadku transportu węgla składem kolejowym, który trwać może kilka lub kilkanaście

godzin (w zależności od lokalizacji kopalni i elektrowni) przy temperaturach poniżej zera następuje przemarzanie węgla na głębokość, uniemożliwiająca rozładowanie wagonu z użyciem wywrotnic. Konieczne jest wtedy ręczne lub mechaniczne rozładowywanie wagonów, co znacznie wydłuża czas rozładunku oraz podnosi jego koszty. Aby uniknąć tego problemu zamrożone wagony kolejowe przed ich rozładunkiem przetaczane są do rozmrażalni. Rozmrażalnie to budynki z umieszczonym wewnątrz torowiskiem, pozwalającym na wjazd składu lub części składu kolejowego. Wewnątrz rozmrażalni znajdują się urządzenia pozwalające na nagrzewanie ścian oraz podłogi wagonów kolejowych. Proces rozmrażania realizowany może być z wykorzystaniem gorącej pary wodnej, gorącego powietrza, gorących spalin, jednak najczęściej stosuje się elektryczne promienniki podczerwieni. Zastosowanie tego typu źródła ciepła pozwala na ciągłą kontrolę procesu rozmrażania, a w przypadku godzin nocnych pozwala wykorzystać tanią energię elektryczną. Promienniki podczerwieni charakteryzują się dużą trwałością i niezawodnością, łatwą obsługą i sterowaniem oraz wysoką temperaturą powierzchni dochodzącą do 300°C. Zastosowanie elektrycznych promienników podczerwieni pozwala na efektywne prowadzenie procesu rozmrażania węgla w wagonach kolejowych.

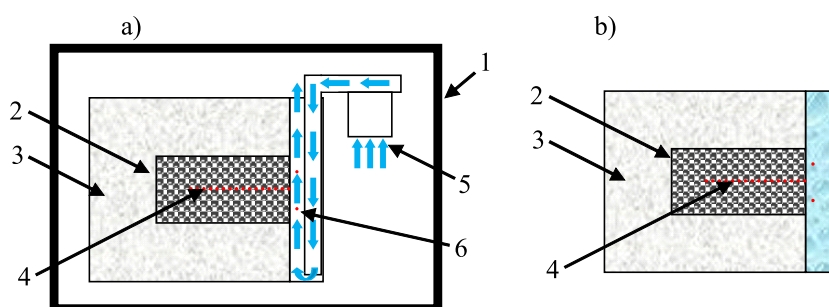
Względy konstrukcyjne wagonu kolejowego oraz bezpieczeństwa pożarowego dotyczące nagrzewania wagonów zawierających paliwo nie pozwalają na przekraczanie temperatury 90°C na powierzchni blachy burty wagonu oraz temperatury 50°C w sąsiedztwie układów jezdnych wagonu. Odpowiednie ułożenie promienników oraz optymalne prowadzenie procesu rozmrażania pozwala na dotrzymanie ustalonych granic bezpieczeństwa i maksymalne skrócenie procesu rozmrażania węgla.

2. Badania eksperymentalne procesu zamrażania i rozmrażania węgla

Analiza przepływu ciepła w warstwie węgla w wagonie kolejowym wymaga znajomości szeregu parametrów fizycznych, a mianowicie współczynnika przewodzenia ciepła węgla, ciepła właściwego węgla, jego rozkładu ziarnowego oraz wilgotności. Określenie dwóch ostatnich wielkości jest zadaniem prostym, jednak pomimo ich znajomości trudno jest ustalić parametry procesu przewodzenia ciepła przez materiał w postaci granulatu węgla w wagonie kolejowym. Wartość współczynnika przewodzenia węgla (skały) zależy od miejsca jego wydobycia, pokładu oraz kierunku przepływu ciepła prostopadłego lub równoległego do uwarstwienia skały (węgla). Literatura dotycząca badania współczynnika przewodzenia węgla podaje zakres jego zmienności w kierunku uwarstwienia w przedziale od 0,244 do 0,72 W/(m K) (Chmura 1968). Wartości ciepła właściwego węgla (skały) zależności od jego postaci (bezpostaciowy, krystaliczny). Najczęściej dla węgla kamiennego wartości ciepła właściwego bliskie są 1200 J/(kg K) (Chmura 1968). Powyższe wartości zależą od miejsca wydobycia, pokładu i powinny być wyznaczone

dla danego rodzaju węgla. Brak znajomości tych parametrów i wpływu rozmiaru ziarnowego węgla na proces przewodzenia ciepła przez warstwę granulatu wymaga określenia zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła, który będzie zawierał w sobie właściwości danego węgla oraz wpływ rozmiaru ziarnowego, a także jego wilgotności na proces przewodzenia ciepła przez materiał w postaci granulatu.

W celu określenia zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła przeprowadzono badania eksperymentalne procesu zamrażania (rys. 1a) z wykorzystaniem komory klimatycznej oraz rozmrażania (rys. 1b) węgla kamiennego o wilgotności 5% i średnim ziarnie 2 mm. Badania te przeprowadzono z wykorzystaniem układu, pozwalającego na analizę jednowymiarowego przepływu ciepła przez warstwę węgla. Układ ten stanowił prostopadłościan granulatu węgla (2) (rys. 1a) o wymiarach 200×200×400 mm. Węgiel otoczony był z pięciu stron warstwą styropianu (3) o grubości 150 mm. Z jednej strony granulat węgla stykał się bezpośrednio z blachą (symulująca ścianę wagonu), która stanowiła jedyne miejsce przepływu ciepła z i do warstwy granulatu węgla, co pozwalało analizować proces przewodzenia ciepła jako zagadnienie jednowymiarowe. Wewnątrz złoża rozmieszczono czujniki (4) temperatury PT100 w odstępach 20 mm, o dokładności $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$.



Rys. 1. Widok procesu zamrażania warstwy węgla w komorze klimatycznej a), widok procesu rozmrażania warstwy węgla b)

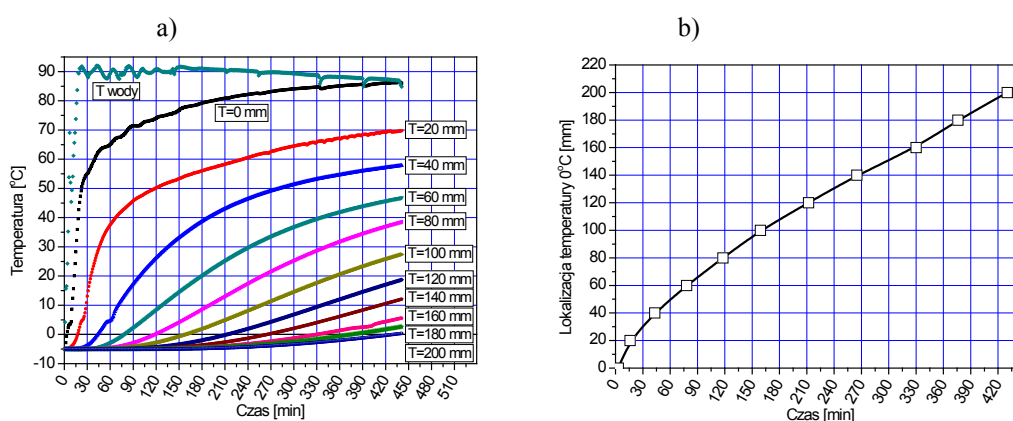
Fig. 1. The view of the freezing process, the carbon layer in a climate chamber), defrosted back in the process of the coal layer b)

Proces zamrażania węgla realizowano w komorze klimatycznej, w której umieszczono badaną próbkę granulatu węgla. W celu intensyfikacji procesu przepływu ciepła przez metalową przegrodę do warstwy węgla zabudowano układ (5) (rys. 1a), którego zadaniem było wymuszenie przepływu zimnego powietrza zawartego w komorze klimatycznej w sąsiedztwie ścianki z granulatem węgla. W celu kontroli temperatury powietrza przepływającego w sąsiedztwie ścianki umieszczono w przepływie dwa niezależne czujniki (6) (rys. 1a) temperatury PT100. Za pomocą rejestratora *JUMO LOGOSCREEN nt* rejestrowano wartości temperatury z 18 czujników pomiarowych PT100, w tym 16 wewnątrz warstwy granulatu węgla. Proces zamrażania prowadzono do czasu, aż całe złożo węgla uzyskało jednorodną temperaturę równą panującej w komorze klimatycznej.

Ze względu na ograniczoną prędkość przepływu zimnego powietrza w sąsiedztwie ścianki wyniki procesu zamrażania w komorze klimatycznej nie mogły odwzorować rzeczywistego procesu zamrażania. Główną przyczyną jest prędkość powietrza przepływającego w sąsiedztwie ścian wagonu podczas jazdy składu kolejowego, która może dochodzić do 120 km/h. Prędkość ma decydujący wpływ na współczynnik wnikania ciepła od otoczenia do ścianek wagonu. Można przypuszczać, że przy tak dużych prędkościach temperatura ścian wagonu bliska jest temperaturze otaczającego powietrza.

Zamrożone złożę granulatu węgla o ustalonej temperaturze poddano procesowi rozmrażania (rys. 1b). Założono, że w trakcie procesu rozmrażania temperatura na powierzchni blachy w sąsiedztwie warstwy węgla powinna być stała w trakcie całego procesu rozmrażania i wynosić 90°C. W celu zapewnienia tego założenia przestrzeń w sąsiedztwie blachy wypełniono wodą, która w przeciągu 15 minut została nagrzana do 90°C, po czym przez cały czas procesu utrzymywana była na założonym poziomie.

W trakcie badań przeprowadzono kilkanaście procesów zamrażania i rozmrażania węgla. W ramach niniejszej pracy przedstawione zostaną wybrane dwa procesy rozmrażania węgla do temperatury -5° oraz -13°C . Na rysunku 2a przedstawiono proces rozmrażania węgla zamrożonego do temperatury -5°C . Temperatura oznaczona jako „T wody” określa wartość temperatury wody, której zadaniem jest ogrzewanie węgla poprzez metalową ściankę. Widoczny wzrost temperatury wody do 90°C w ciągu około 15 minut odpowiada warunkom nagrzewania ścianki wagonu, jakie będą miały miejsce przy realizacji rozmrażania węgla w wagonach kolejowych (czas ten porównywalny jest z czasem osiągnięcia pełnej mocy cieplnej od uruchomienia promiennika podczerwieni). Widoczne nieznaczne fluktuacje temperatury „T wody” wynikają z konieczności uzupełniania poziomu wody w zbiorniku, która odparowuje podczas procesu nagrzewania węgla.

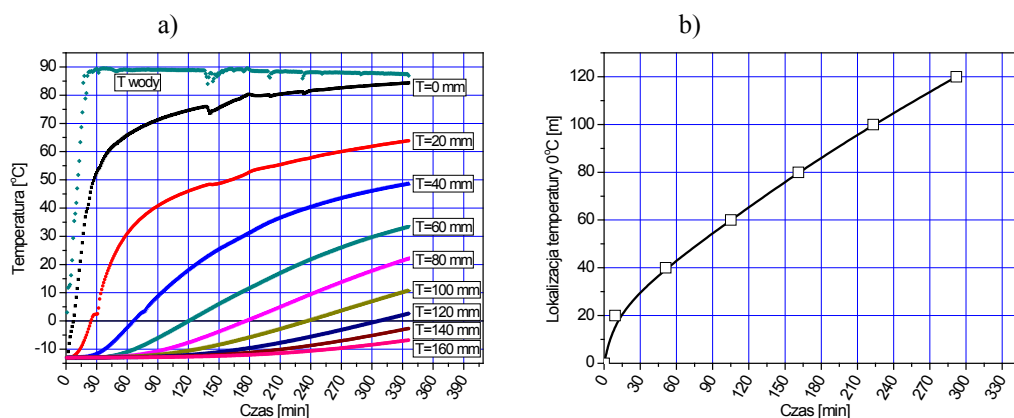


Rys. 2. Profile temperatury w trakcie nagrzewania węgla o temperaturze -5°C temperaturą ścianki 90°C a), lokalizacja położenia temperatury 0°C w czasie procesu nagrzewania b)

Fig. 2. The temperature profiles during heating coal at a temperature of -5°C and 90°C wall temperature), the location position of 0°C during the heating process b)

Analizując czasowe profile temperatury w trakcie procesu nagrzewania węgla o temperaturze początkowej -5°C widoczne jest, że największe gradienty temperatury występują w sąsiedztwie gorącej ścianki (dla lokalizacji czujnika PT100 na ściance ($T = 0 \text{ mm}$) i w odległości 20 i 40 mm ($T = 20$ i $T = 40 \text{ mm}$) w głąb złoża węgla, licząc od gorącej ścianki. Analizując przedstawione dane (rys. 2a) można wyznaczyć miejsce i czas, w którym nastąpi przejście temperatury przez wartość 0°C , co jest równoznaczne z rozmrożeniem warstwy węgla. Lokalizację położenia temperatury 0°C w czasie w trakcie procesu nagrzewania warstwy węgla o temperaturze -5°C ścianką temperaturze 90°C przedstawiono na rysunku 2b.

Wyniki procesu nagrzewania zamrożonej warstwy węgla od temperatury -13°C zestawiono analogicznie na rysunku 3.



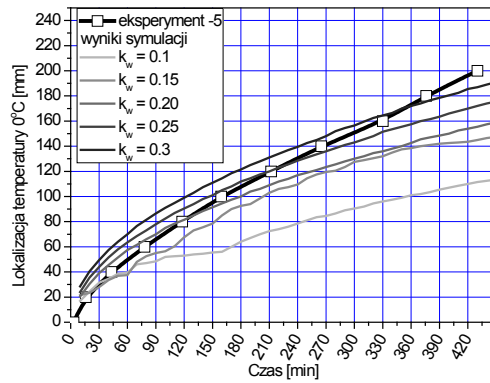
Rys. 3. Profile temperatury w trakcie nagrzewania węgla o temperaturze -13°C temperaturą ścianki 90°C a), lokalizacja położenia temperatury 0°C w czasie procesu nagrzewania b)

Fig. 3. The temperature profiles during heating coal at a temperature of -13°C and 90°C wall temperature), the location position of 0°C during the heating process b)

Grubość zamrożonej warstwy węgla wyznaczyć można drogą obliczeń numerycznych z wykorzystaniem metody różnic skończonych. Realizacja obliczeń wymaga założenia odpowiednich warunków brzegowych oraz znajomości zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła przez warstwę granulatu węgla (mieszanka węgla, powietrza oraz wilgoci). Konieczne jest określenie zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła dla warstwy węgla. Znając lokalizację położenia temperatury 0°C w czasie w trakcie procesu nagrzewania warstwy węgla o temperaturze -5°C ścianką o temperaturze 90°C przeprowadzono szereg obliczeń symulacyjnych procesu rozmrażania węgla dla różnych zastępczych współczynników przewodzenia warstwy węgla w celu porównania uzyskanych rezultatów obliczeń z eksperymentem.

Na rysunku 4 zestawiono wyniki obliczeń symulacyjnych dla zmiennej wartości zastępczego współczynnika przewodzenia warstwy węgla od 0,1 do 0,3 $\text{W}/(\text{m K})$ wraz z wynikami uzyskanymi w trakcie badań eksperymentalnych rozmrażania dla -5°C . Największą zgodność z eksperymentem obserwuje się dla wartości zastępczego współczynnika przewodzenia węgla

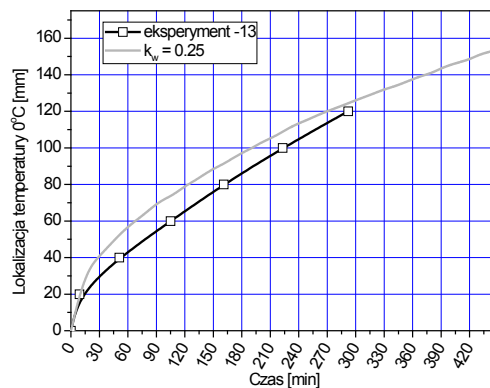
$k_w = 0,25 \text{ W/(m K)}$. Taką wartość można więc przyjąć jako zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła dla użytej w badaniach warstwy węgla.



Rys. 4. Lokalizacja położenia temperatury 0°C w czasie w trakcie procesu nagrzewania węgla o temperaturze -5°C ścianką o temperaturze 90°C oraz obliczeń dla wartości współczynnika przewodzenia węgla od 0,1 do 0,3 W/(m K)

Fig. 4. The location of the position of 0°C during the process of heating coal at a temperature of -5°C wall temperature of 90°C and the calculations for the thermal conductivity of coal from 0.1 to 0.3 W/(m K)

Dla określonego zastępczego współczynnika przewodzenia warstwy węgla przeprowadzono obliczenia symulacyjne procesu rozmrażania dla eksperymentu, gdzie złożę węgla o temperaturze -13°C poddane było rozmrażaniu ścianką o temperaturze 90°C . Na rysunku 5 porównano wyniki obliczeń numerycznych oraz eksperymentu.



Rys. 5. Lokalizacja położenia temperatury 0°C w czasie w trakcie procesu nagrzewania węgla o temperaturze -13°C ścianką o temperaturze 90°C oraz obliczeń symulacyjnych dla wartości współczynnika przewodzenia węgla $0,25 \text{ W/(m K)}$

Fig. 5. Location of position 0°C during the process of heating of coal at a temperature of -13°C wall temperature of 90°C and simulation calculations for the thermal conductivity of coal of $0,25 \text{ W/(m K)}$

Uzyskana zgodność eksperymentu z wynikami obliczeń symulacyjnych pozwala na zastosowanie takiej metody do określania zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła dla warstwy

węgla na potrzeby obliczeń symulacyjnych procesu zamrażania i rozmrażania węgla o danych parametrach, głównie wilgotności. Uzyskana wartość zastępczego współczynnika przewodzenia węgla $k_w = 0,25 \text{ W/(m·K)}$ może zostać wykorzystana do obliczeń procesu zamrażania i rozmrażania węgla w wagonach kolejowych dla węgla o wilgotności 5%. W przypadku zmiany wilgotności węgla należy każdorazowo określić wartość zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła.

3. Model numeryczny procesu zamrażania i rozmrażania węgla

Proces zamrażania i rozmrażania warstwy węgla (którego wilgotność może sięgać ponad 20%) analizowano z wykorzystaniem opracowanego programu, wykorzystując metodę różnic skończonych. Przyjęto na potrzeby obliczeń, że czas całkowity transportu węgla nie przekracza 8 godzin. Założono, że węgiel ładowany do wagonów ma temperaturę $+5^\circ\text{C}$ i wilgotność całkowitą 20%. W przypadku obecności wilgoci (wody) w warstwie węgla proces jej ochładzania i ogrzewania w sytuacji przejścia w danym miejscu wagonu przez temperaturę 0°C wiąże się z przemianą fazową wody w lód lub odwrotnie, co związane jest z odebraniem lub dostarczeniem do procesu utajonego ciepła przemiany fazowej dla wody.

Proces zamrażania i rozmrażania węgla należy rozpatrywać jako zagadnienie nieustalone ze względu na to, że wraz z upływem czasu następuje zmiana temperatury w danym punkcie wagonu (rozważanego obszaru obliczeniowego), a dodatkowo może wystąpić tam także przemiana fazowa wody. W opracowanym na potrzeby realizacji obliczeń kodzie obliczeniowym uwzględniono przemianę fazową wody, zastosowano zastępcze wartości ciepła właściwego oraz zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła mieszaniny rozmrożonej i rozmrożonej, których sposoby obliczania przedstawiono poniżej.

Obliczenia numeryczne procesu zamrażania i rozmrażania węgla przeprowadzono dla następujących przyjętych parametrów:

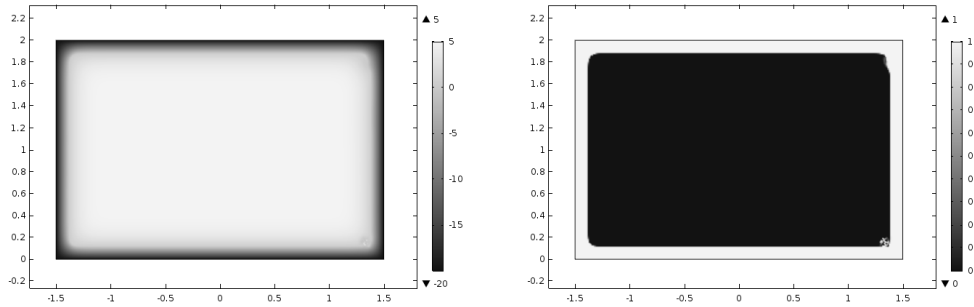
◆ temperatura topnienia lodu	$T_f = 273.15 \text{ [K]}$
◆ ciepło właściwe wody	$C_{p_{\text{wody}}} = 4179 \text{ [J/(kg·K)]}$
◆ ciepło właściwe lodu	$C_{p_{\text{lodu}}} = 2052 \text{ [J/(kg·K)]}$
◆ ciepło właściwe powietrza	$C_{p_{\text{powietrza}}} = 1005 \text{ [J/(kg·K)]}$
◆ ciepło właściwe węgla	$C_{p_{\text{węglu}}} = 1200 \text{ [J/(kg·K)]}$
◆ współczynnik przewodzenia ciepła wody	$k_{\text{wody}} = 0,613 \text{ [W/(m·K)]}$
◆ współczynnik przewodzenia ciepła lodu	$k_{\text{lodu}} = 2,31 \text{ [W/(m·K)]}$
◆ współczynnik przewodzenia ciepła powietrza	$k_{\text{powietrza}} = 0,025 \text{ [W/(m·K)]}$
◆ współczynnik przewodzenia ciepła węgla	$k_{\text{węglu}} = 0,25 \text{ [W/(m·K)]}$
◆ gęstość wody	$\rho_{\text{wody}} = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
◆ gęstość powietrza	$\rho_{\text{powietrza}} = 1,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
◆ gęstość nasypowa węgla	$\rho_{\text{węglu}} = 800 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

- ◆ udział masowy wody (zawartość wilgoci) $x_{\text{wody}} = 0,2$
- ◆ udział masowy lodu $x_{\text{lodu}} = x_{\text{wody}}$
- ◆ udział masowy powietrza $x_{\text{powietrza}} = 0,0005$
- ◆ udział masowy węgla $x_{\text{wegla}} = 1 - (x_{\text{wody}} + x_{\text{powietrza}})$
- ◆ zastępcze ciepło właściwe mieszaniny rozmrożonej
 $C_{p_z \text{ roz}} = C_{p_{\text{wody}}} \cdot x_{\text{wody}} + C_{p_{\text{powietrza}}} \cdot x_{\text{powietrza}} + C_{p_{\text{wegla}}} \cdot x_{\text{wegla}}$
- ◆ zastępcze ciepło właściwe mieszaniny zamrożonej
 $C_{p_z \text{ zam}} = C_{p_{\text{lodu}}} \cdot x_{\text{lodu}} + C_{p_{\text{powietrza}}} \cdot x_{\text{powietrza}} + C_{p_{\text{wegla}}} \cdot x_{\text{wegla}}$
- ◆ zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła mieszaniny rozmrożonej
 $k_{z \text{ roz}} = k_{\text{wody}} \cdot x_{\text{wody}} + k_{\text{powietrza}} \cdot x_{\text{powietrza}} + k_{\text{wegla}} \cdot x_{\text{wegla}}$
- ◆ zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła mieszaniny zamrożonej
 $k_{z \text{ zam}} = k_{\text{lodu}} \cdot x_{\text{lodu}} + k_{\text{powietrza}} \cdot x_{\text{powietrza}} + k_{\text{wegla}} \cdot x_{\text{wegla}}$
- ◆ ciepło utajone topnienia lodu w mieszaninie $dH_{\text{top lodu}} = x_{\text{wody}} \cdot \text{ciep}_{\text{top lodu}}$
- ◆ ciepło utajone topnienia lodu $\text{ciep}_{\text{top lodu}} = 333500 \text{ [J/kg]}$

Dla wilgotności węgla równej 20% zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła mieszaniny rozmrożonej wynosi 0,322 W/(m K); natomiast dla wilgotności 5% wynosi on odpowiednio 0,268 W/(m K), co jest bliskie wartości oszacowanej na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Widoczne jest, że zawartość wilgoci znacząco wpływa na wartość zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła.

Węgiel transportowany jest wagonami o szerokości skrzyni ładunkowej około 3 m, wysokości burty około 2 m i długości skrzyni ładunkowej około 14,5 m. Ze względu na to, że długość wagonu jest znacząco większa od pozostałych wymiarów, przepływ ciepła w wagonie kolejowym można rozpatrywać jako zagadnienie dwuwymiarowego przepływu ciepła.

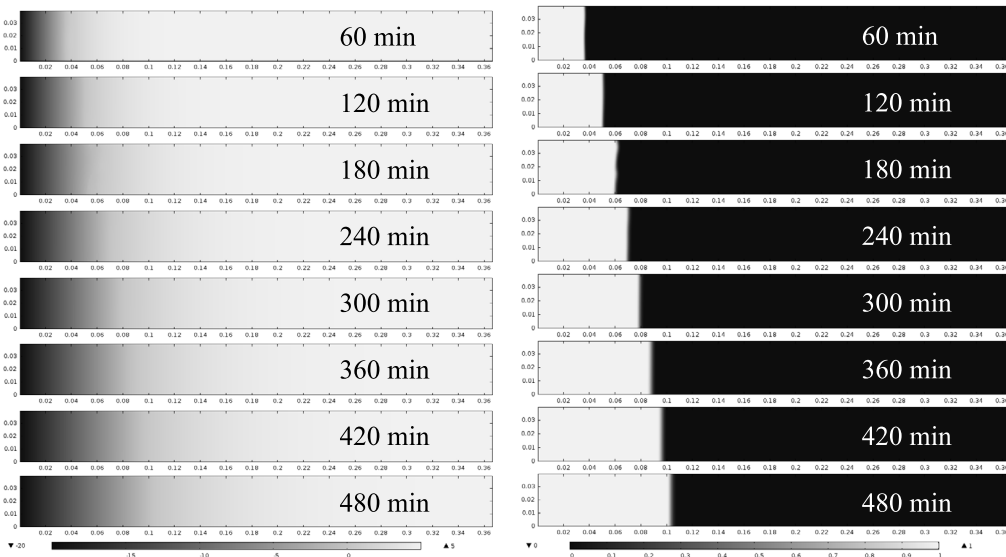
Na rysunku 6 przedstawiono wyniki obliczeń dla procesu zamrażania węgla o wilgotności 20%, dla współczynnika przewodzenia ciepła węgla (skały) o wartości 0,25 W/(m K), zastępczego współczynnika przewodzenia warstwy węgla rozmrożonego równego 0,322 W/(m K) dla przekroju wagonu kolejowego. Przyjęto, że wymiary wagonu wynoszą 3×2 m, temperatura początkowa węgla w wagonie wynosi +5°C, natomiast na zewnątrz wagonu panuje temperatura powietrza -20°C. Zakładając najbardziej niekorzystne warunki, tzn. że wagon porusza się ze znaczną prędkością podczas transportu lub występuje silny wiatr na bocznicę kolejowej podczas postoju wagonu można przyjąć, że temperatura ścian wagonu jest równa temperaturze otaczającego powietrza (w ten sposób można pominąć proces wnikania ciepła od otaczającego powietrza do ścianki wagonu). Takie założenie powoduje, że uzyskany wynik obliczeń zamrażania jest najbardziej niekorzystny ze względu na największą grubość zamrożonej warstwy dla danych warunków temperatury otoczenia. Na rysunku 6a przedstawiono pole temperatury, natomiast na rysunku 6b obraz fazy zamrożonej (1) i fazy niezamrożonej węgla (0). Widoczne jest, że mimo 8 godzin procesu zamrażania warstwy węgla przy temperaturze otoczenia -20°C grubość zamrożonej warstwy sięga kilkudziesięciu milimetrów do wnętrza wagonu. Na tej podstawie można stwierdzić, że rozwiązanie problemu zamrażania oraz rozmrażania węgla w wagonach kolejowych ograniczyć można do jednowymiarowego procesu.



Rys. 6. Pole temperatury (po lewej) oraz pole fazy zamrożonej (po prawej). Wartość 1 – faza zamrożona, wartość 0 – faza niezamrożona, dla czasu 8 godzin od początku procesu zamrażania.

Fig. 6. The temperature field (left) and frozen phase field (right). Value 1 – frozen phase, a value of 0 – phase is not frozen, for the time eight hours from the beginning of the freezing process

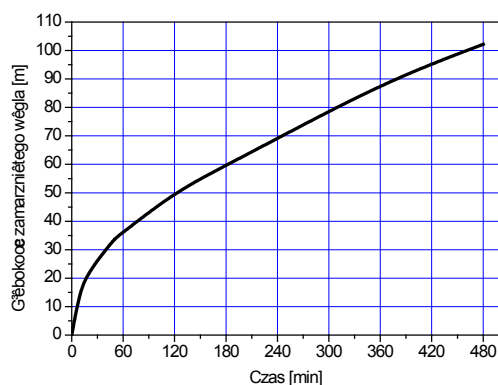
Na rysunku 7 przedstawiono pola temperatury (po lewej) oraz pola fazy zamrożonej (po prawej) w wybranych chwilach czasu dla przypadku jednowymiarowego przepływu ciepła przez warstwę węgla podczas procesu zamrażania. Warunki procesu identyczne jak powyżej: temperatura początkowa węgla $+5^{\circ}\text{C}$, temperatura otoczenia -20°C . Ścianka wagonu zlokalizowana jest po lewej stronie wykresów (wartość współrzędnej $X = 0$).



Rys. 7. Pola temperatury (po lewej) oraz pola fazy zamrożonej (po prawej). Wartość 1 – faza zamrożona, wartość 0 – faza niezamrożona, dla wybranych chwil czasu podczas procesu zamrażania

Fig. 7. The temperature fields (left) and frozen phase fields (right). Value 1 – frozen phase, a value of 0 – phase is not frozen, for some moments of time during the freezing process

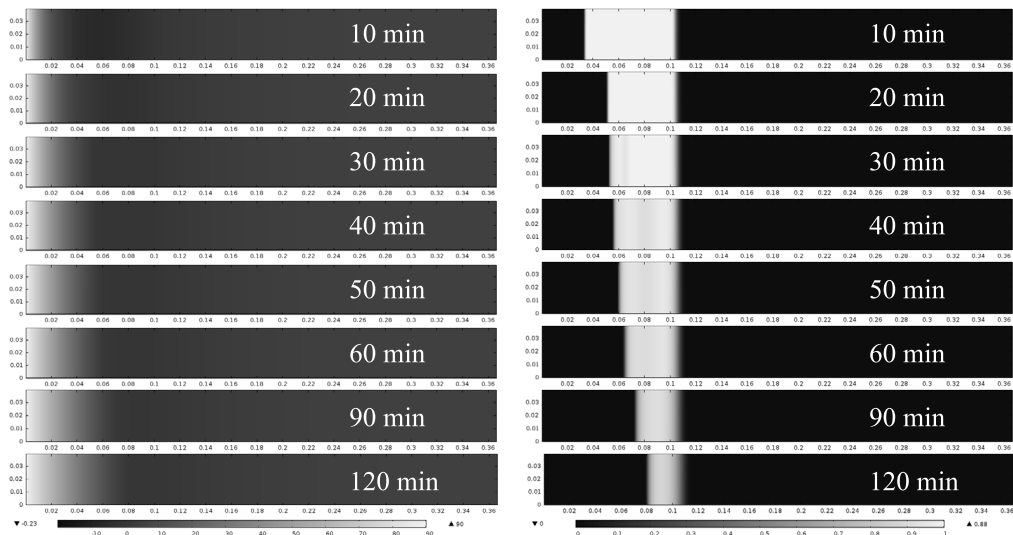
Na podstawie danych z rysunku 7 określono lokalizację frontu zamrożonej warstwy węgla w czasie która przedstawiona została na rysunku 8. Widoczne jest, że w początkowym okresie zamrażania (do około 60 minut) proces ten ma charakter silnie nieliniowy, natomiast powyżej 60 minut zależność głębokości zamrożonej warstwy w czasie można traktować jako liniowy. Po 8 godzinach zamrażania węgla grubość zamrożonej warstwy węgla przekracza 100 mm.



Rys. 8. Głębokość zamrożonej warstwy węgla podczas procesu zamrażania (temperatura otoczenia -20°C)

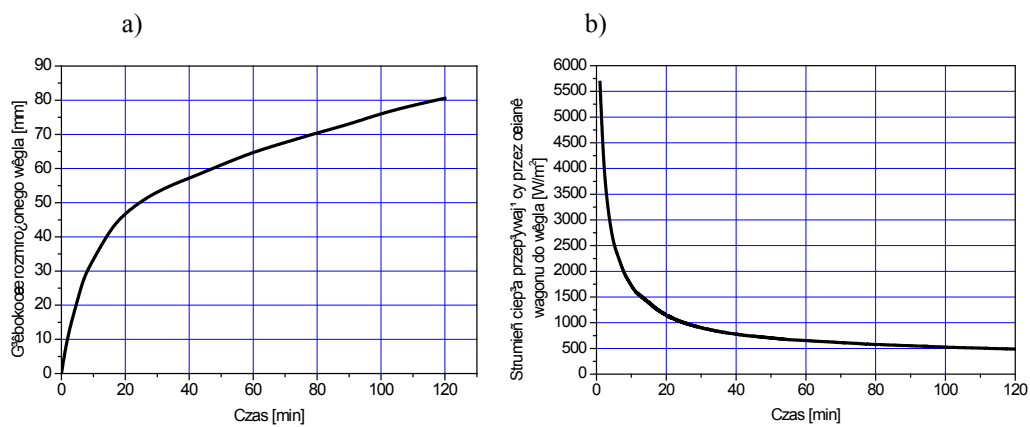
Fig. 8. The depth of the frozen coal layer during the freezing process of (-20°C ambient temperature)

Analogicznie na rysunku 9 przedstawiono proces rozmrażania węgla w wybranych chwilach czasu. Proces rozmrażania rozpoczyna się od stanu, jaki uzyskano po 8 godzinach zamrażania (rys. 7 i 8). Widoczne jest, że podczas rozmrażania największe zmiany występują w początkowej fazie procesu; dotyczy to zarówno wzrostu temperatury przy ścianie jak i przemieszczenia frontu rozmrożonej warstwy węgla. Wyraźnie jest to widoczne na rysunku 10a, obrazującym lokalizację temperatury 0°C w funkcji czasu. Po 20 minutach możliwe jest rozmrożenie warstwy węgla na głębokość około 50 mm, natomiast po godzinie i dwóch godzinach rozmrażania odpowiednio na głębokość około 65 i 80 mm. Zależność ta wynika bezpośrednio z przyjętego założenia stałej maksymalnej temperatury na ścianie wagonu równej 90°C . Na tej podstawie określono wartość strumienia ciepła w funkcji czasu (rys. 10b), jaki możliwy jest do przekazania do warstwy węgla znajdującego się w wagonie. Widoczne jest, że w początkowej fazie rozmrażania wymagany strumień ciepła osiąga wartość bliską 6000 W/m^2 . Jednak już po 10 minutach wartość tego strumienia ciepła spada do około 1500 W/m^2 . W kolejnych chwilach czasu następuje dalszy spadek strumienia ciepła, jaki jest możliwy do przekazania do warstwy węgla. Po godzinie wynosi on około 650 W/m^2 , a po dwóch godzinach jedynie 500 W/m^2 . Rysunek 10b jest kluczowy podczas projektowania rozmrażalni ze względu na dobór mocy maksymalnej promienników, jak i na przebieg ich sterowania podczas procesu nagrzewania, tak aby nie przekroczyć założonej maksymalnej temperatury powierzchni ścianki wagonu.



Rys. 9. Pola temperatury (po lewej) oraz pola fazy zamrożonej (po prawej). Wartość 1 – faza zamrożona, wartość 0 – faza niezamrożona, dla wybranych chwil czasu podczas procesu rozmrażania

Fig. 9. The temperature fields (left) and frozen phase boxes (right). Value 1 – frozen phase, a value of 0 – phase is not frozen, for some moments of time in the defrosting process



Rys. 10. Głębokość zamrożonej warstwy węgla podczas procesu rozmrażania (temperatura ścianki 90°C) a), strumień ciepła przekazywany przez ściankę do warstwy węgla b).

Fig. 10. The depth of the frozen coal layer during the thawing process (wall temperature 90°C) a), the heat flux transmitted through the wall into coal layer b)

Podsumowanie

Zapewnienie ciągłości dostaw paliwa i jego rozładunku jest kluczowe z punktu bezpieczeństwa energetycznego. Aby to zapewnić elektrownie i elektrociepłownie powinny być wyposażone w instalacje, pozwalające na rozmrażanie węgla transportowanego taborem kolejowym. Obecnie budowane rozmrażalnie wyposażone są najczęściej w promienniki podczerwieni jako źródło ciepła.

Z punktu widzenia procesu rozmrażania węgla istotna jest znajomość parametrów procesu przekazywania ciepła do warstwy węgla w wagonie kolejowym, aby skrócić czas procesu rozmrażania przy zachowaniu maksymalnych dopuszczalnych ze względów bezpieczeństwa temperatur. Kluczową w trakcie procesu rozmrażania węgla jest znajomość wartości strumienia ciepła, jaki można przekazać do warstwy węgla. Jest on niezbędny na etapie projektowania rozmrażalni do oszacowania mocy maksymalnej, rozkładu promienników w sąsiedztwie ścian wagonu, jak i procesu sterowania ich mocą w trakcie procesu rozmrażania. Uzyskane wyniki wykazały, że po 1 godzinie rozmrażania możliwe jest rozmrożenie warstwy węgla na głębokość około 65 mm, co powinno zapewnić rozładunek węgla znajdującego się w wagonie kolejowym.

Artykuł powstał w ramach programu badań statutowych Politechniki Częstochowskiej BS/PB-404-301/11.

Literatura

- GAWLIK (red.) i in. 2013. *Węgiel dla polskiej energetyki w perspektywie 2050 roku – analizy scenariuszowe*. Wyd. IGSMiE PAN, Katowice.
- PKP CARGO S.A., 2013 – PKP CARGO S.A., Katalog wagonów, Warszawa 2013, [Online] Dostępne w: https://www.pkpcargo.com/media/244882/cargo-katalog_wagonow2013-23092013-1.pdf [Dostęp: 10.08.2016].
- Dz. U. z 2003 r. Nr 39, poz. 338.
- Dz. U. z 2010 r. Nr 108, poz. 701.
- Dz. U. z 2012 r. poz. 1059.
- CHMURA, K. 1968. Przewodność cieplna skał i węgla górnośląskiego karbonu. *Zeszyt naukowy* nr 190, Politechnika Śląska, Gliwice.

Robert ZARZYCKI, Zbigniew BIS, Krzysztof WALACIK

Research on thawing coal in railway carriages

Abstract

The paper presents the results of experimental and numerical calculations defrosting coal in railway carriages. The transport of coal in winter can cause problems with the unloading, and thus threaten the continuity of fuel supplies to power stations and raise the cost of its delivery. It is necessary to defrost it, which is most often performed using infrared heaters. The thawing of coal in railway carriages requires heating the walls of the wagons to a predetermined safe temperature and maintain it throughout the defrosting process. The paper discusses the methodology for determining and calculating the replacement of thermal conductivity of the carbon layer. The conducted experimental studies and numerical simulations have shown that in the event of adverse weather conditions, carbon layers can freeze within eight hours to a depth of about 100 mm. In this case, the minimum defrosting time is approximately one hour is a thaw carbon layer to a depth of about 65 mm which allow the unloading.

KEYWORDS: coal, rail transport, thawing coal