

**MARTA GORTYCH\*, ARKADIUSZ GORTYCH\*\***

**PROJEKT STANOWISKA EKSPERYMENTALNEGO  
DO BADANIA KRZEPNIĘCIA W PRZESTRZENI WALCOWEJ**

*Streszczenie*

*W pracy przedstawiono projekt stanowiska eksperymentalnego do badania procesu krzepnięcia wokół powierzchni cylindrycznej. Scharakteryzowano proces konwekcji swobodnej i proces krzepnięcia wokół walca poziomego i pochylonego. Przedstawiono rozkład lokalnych wartości współczynnika przejmowania ciepła przy opływie poprzecznym walca poziomego. Przedstawiono połączenie zjawiska krzepnięcia i konwekcji swobodnej cieczy wokół przestrzeni walcowej.*

Słowa kluczowe: proces krzepnięcia, konwekcja swobodna, powierzchni walcowa

**KONWEKCJA SWOBODNA WOKÓŁ WALCA POZIOMEGO**

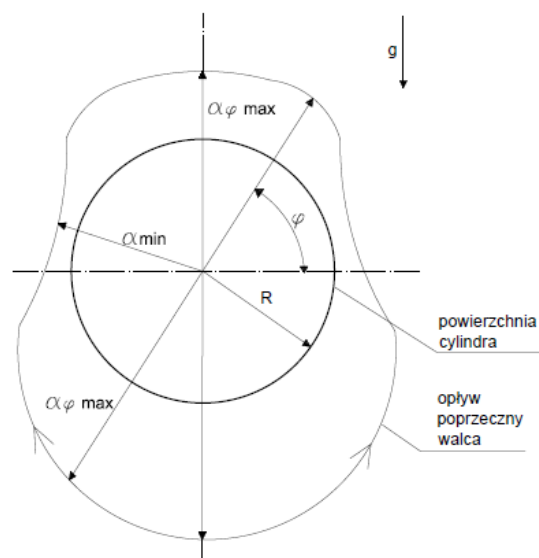
Poziomy walec znajdujący się w polu grawitacyjnym mający temperaturę niższą niż temperatura otaczającego płynu, wywołuje krzepnięcie i przepływ płynu, który nazywany jest konwekcją swobodną. Jeżeli otaczającym płynem jest woda to kierunek przepływu jest inny niż dla płynów standardowych. Spowodowane to jest anomalią wody w pobliżu temperatury krzepnięcia. Konwekcji swobodnej towarzyszy przejmowanie ciepła od płynu do walca. Przejmowanie ciepła jest złożoną formą wymiany ciepła pomiędzy ciałem stałym a omywającym je płynem. Przepływający płyn generuje złożone mechanizmy przewodzenia ciepła. Ruch płynu w pobliżu walca zwiększa ilościowo wymianę ciepła, utrudnia też jej opis [Domański, 1990; Diez, 1989; Wiśniewski, 1994]. Parametrem makroskopowym uogólniającym i opisującym ilościowo wymianę ciepła jest współczynnik przejmowania ciepła.

---

\* Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Łądowej i Środowiska, Zakład Hydrologii i Geologii Stosowanej

\*\* student kierunku Telekomunikacja, Politechnika Poznańska, Wydział Elektroniki i Telekomunikacji

Rozkład lokalnych wartości współczynnika przyjmowania ciepła wokół poziomego walca przedstawiono na rysunku 1. Wartość współczynnika przyjmowania ciepła, przy opływie poprzecznym, zależy od liczby Reynoldsa  $Re$  i kąta  $\varphi$  [Pudlik 2012].



Rys. 1. Rozkład lokalnego współczynnika przyjmowania ciepła przy opływie walca [Pudlik 2012]

Fig. 1. Distribution of the local heat transfer coefficient at round cylinder [Pudlik 2012]

Analiza konwekcji swobodnej opiera się o następujące założenia: badana ciecz jest newtonowska i nieściśliwa a gęstość cieczy zależy tylko od temperatury.

W badaniach teoretycznych wymiany ciepła współczynnik przyjmowania ciepła oblicza się korzystając z teorii podobieństwa przez określenie liczby Nusselta,

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (1)$$

gdzie  $\alpha$  jest współczynnikiem przyjmowania ciepła,  $d$  średnicą walca a  $\lambda$  współczynnikiem przewodzenia ciepła cieczy.

Liczbę Nusselta nazywa się też w literaturze bezwymiarowym współczynnikiem przyjmowania ciepła.

Dla konwekcji swobodnej liczbę Nusselta określa równanie

$$Nu = f(Gr Pr), \quad (2)$$

przedstawiające zależność od liczby Grashofa  $Gr$  i Prandtla  $Pr$ . Liczbę Grashofa istotną w procesie konwekcji swobodnej określa równanie

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot d^3}{\nu^2}, \quad (3)$$

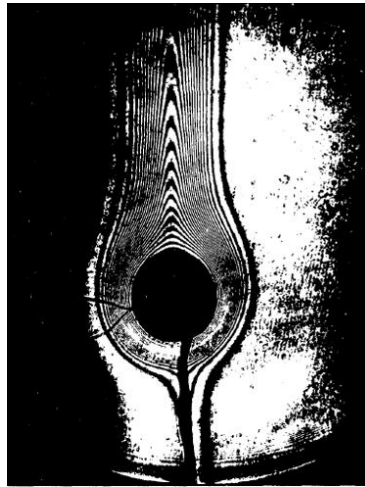
gdzie  $g$  jest przyspieszeniem ziemskim,  $d$  jest średnicą walca,  $\beta$  jest współczynnikiem rozszerzalności objętościowej płynu,  $\Delta T$  jest charakterystyczną różnicą temperatur a  $\nu$  jest lepkością kinematyczną płynu.

Iloczyn liczby Prandtla  $Pr = \nu/a$  i Grashofa nazywany jest liczbą Rayleigha

$$Ra = Pr \cdot Gr \quad (4)$$

gdzie  $a$  jest współczynnikiem dyfuzji ciepła cieczy.

Przykładową konwekcję swobodną dookoła walca poziomego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Konwekcja swobodna płynu wokół poziomego walca [Diez i in. 1989]

Fig. 2. Free convection around the horizontal cylinder [Diez et al 1989]

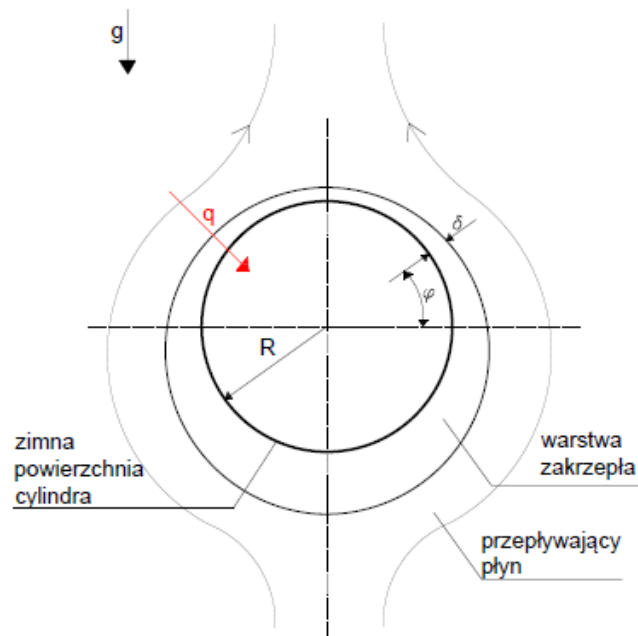
### KRZEPNIĘCIE I KONWEKCJA WOKÓŁ WALCA POZIOMEGO

Planowane badania dotyczą dwóch zjawisk zachodzących równocześnie, konwekcji swobodnej i krzepnięcia cieczy. Proces krzepnięcia określa bezwymiarowa liczba Stefana

$$Ste = \frac{c_p (T_0 - T_F)}{L} \quad (5)$$

gdzie  $c_p$  jest ciepłem właściwym płynu,  $L$  jest ciepłem krzepnięcia płynu,  $T_0$  jest temperaturą płynu daleko od ścianki walca a  $T_F$  jest temperaturą krzepnięcia płynu.

Na rysunku 3 przedstawiono połączenie zjawiska krzepnięcia i konwekcji swobodnej cieczy wokół poziomego walca o promieniu  $R$ .



Rys. 3. Krzepnięcie wokół walca poziomego  
Fig. 3. Solidification around the horizontal cylinder

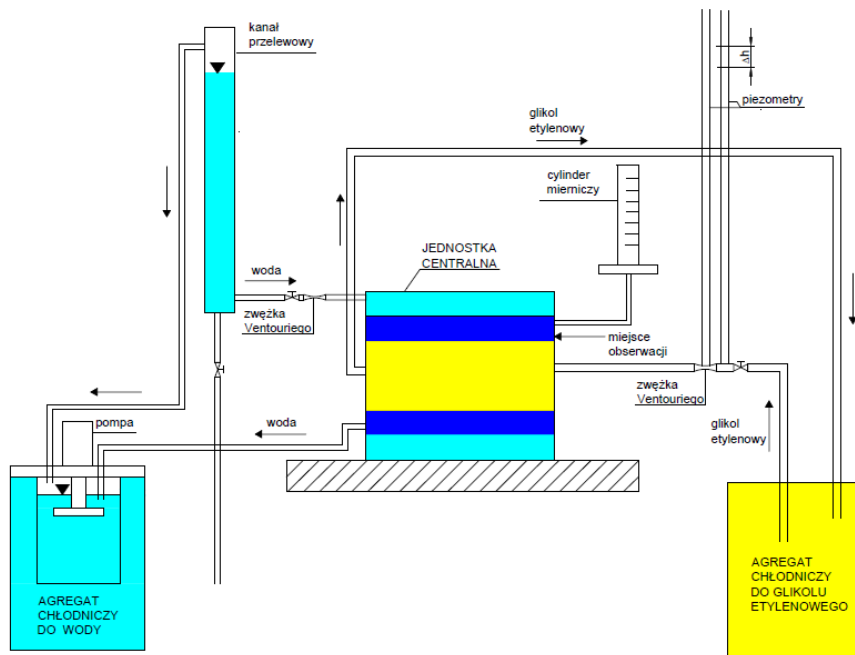
Warstwa zakrzepła o grubości  $\delta$  przemieszcza się od zimnej powierzchni walca w kierunku cieczy powiększając obszar fazy stałej. Na powierzchni war-

stwy zakrzepłej generowane jest ciepło przemiany fazowej  $\dot{q}$ , które przepływa do wnętrza walca. Grubość warstwy zakrzepłej zależy od kąta  $\varphi$ , ponieważ intensywność wymiany ciepła jest funkcją położenia. Z literatury naukowej wiadomo, że opływ walca wynikający z konwekcji swobodnej, charakteryzuje się zależnością współczynnika przyjmowania ciepła od kąta (rys. 2).

Badania krzepnięcia na powierzchni walcowej dla walców ułożonych w pozycji pionowej przeprowadzane były analitycznie i eksperymentalnie przez Lipnickiego i Weiganda [Lipnicki i Weigand, 2012]. Proponowane w pracy badania eksperymentalne będą dotyczyły krzepnięcia na zimnej powierzchni poziomych i pochylonych do poziomu walców.

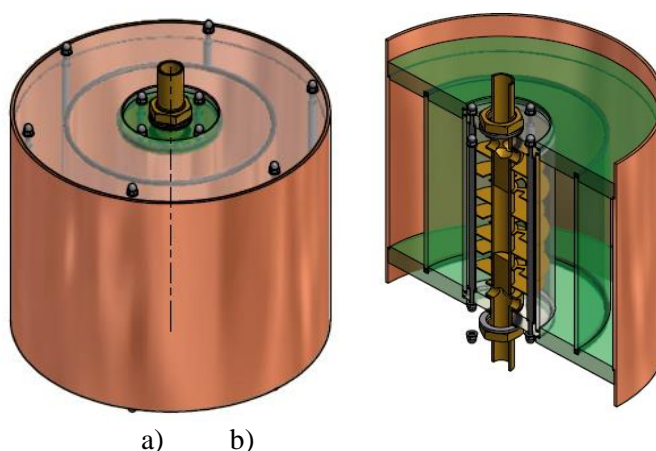
### STANOWISKO BADAWCZE DO BADANIA KRZEPNIĘCIA NA POWIERZCHNI WALCOWEJ

Schemat aparatury badawczej do wywołania i obserwacji procesu krzepnięcia badanej cieczy w przestrzeni walcowej przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego  
Fig. 4. Scheme of the test apparatus

Stanowisko doświadczalne składa się z części testowej (jednostka centralna, w której zachodzi proces krzepnięcia), dwóch jednostek chłodniczych (agregat wody, agregat płynu chłodzącego) i dwóch obiegów wody i płynu chłodzącego, którym jest wodny roztwór glikolu etylenowego. Jeśli temperatura tego roztworu spadnie poniżej  $-75^{\circ}\text{C}$ , krystalizują wtedy oba składniki substancji. Do doświadczenia zostanie wykorzystany 50% roztwór glikolu etylenowego i wody, dla którego temperatura krzepnięcia wynosi  $-35^{\circ}\text{C}$ . Jednostka centralna zbudowana jest z trzech koncentrycznych cylindrów o średnicy odpowiednio 300, 200 i 100 mm zamocowanych współosiowo względem siebie, co przedstawia rysunek 5. Pierścienie te wykonane będą z rur miedzianych o grubości ścianki 5 mm.



Rys. 5. Jednostka centralna, a) widok ogólny, b) przekrój przez jednostkę centralną  
Fig. 5. The Central Unit, a) general view, b) section by the Central Unit

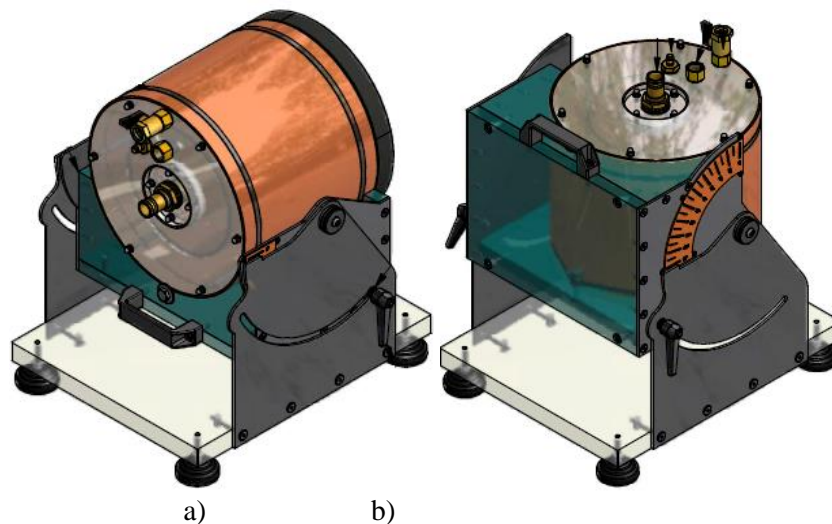
W celu zbadania wpływu położenia jednostki centralnej na zmianę parametrów krzepnięcia, jednostka centralna zamocowana jest na mechanizmie przegubowym. Zmiana kąta nachylenia badanego materiału zmienno-fazowego odbywać się będzie w zakresie od  $0-90^{\circ}$  (od położenia poziomego do pionowego), jak przedstawiono na rysunku 6.

Cylinder wewnętrzny – centralny (służy do schłodzenia badanego materiału PCM), w cylindrze tym umieszczone są pierścienie powodujące burzliwy charakter przepływającego glikolu etylenowego (rys. 5b).

Przez wewnętrzny cylinder przepływa glikol etylenowy o temperaturze nieprzekraczającej  $-35^{\circ}\text{C}$ , w kolejnym cylindrze (środkowym) znajduje się badany materiał PCM, który otoczony jest płaszczem wody chłodzącej.

Cylindry miedziane w jednostce centralnej zamocowane są pomiędzy dwiema tarczami wykonanymi z przezroczystej płyty plexi. Tarcza plexi zamonto-

wana na spodzie jednostki centralnej jest podświetlana, w celu dokładnej wizualizacji zachodzącego procesu krzepnięcia. Określanie grubości warstwy zakrzepłej będzie wykonywane dwiema metodami. Pierwsza metoda będzie polegać na wizualizacji procesu krzepnięcia – będą wykonywane zdjęcia przyrastającej grubości warstwy zakrzepłej. Druga metoda polegać będzie na wykorzystaniu różnicy gęstości pomiędzy wodą a przyrastającą warstwą lodu. Powstająca w czasie doświadczenia warstwa zakrzepła wyprze wodę, której objętość będzie można odczytać w cylindrze mierniczym podłączonym i zamontowanym nad jednostką centralną. Zmiana objętości w cylindrze mierniczym będzie wykorzystana do przeliczania warstwy grubości lodu oraz pomiaru przyrastającej warstwy lodu. Pomiar przyrastającej warstwy zakrzepłej za pomocą cylindra mierniczego został zaproponowany po raz pierwszy przez Lipnickiego i Weiganda [Lipnicki i Weigand, 2012].



Rys. 6. Jednostka centralna z możliwością zmiany położenia,  
a) położenie poziome i b) położenie pionowe  
Fig. 6. The Central Unit with the ability to change the position,  
a) horizontal position and b) vertical position

Ze względu na konieczność badania wpływu temperatury przepływających cieczy na proces konwekcji stanowisko zostało opomiarowane odpowiednimi czujnikami temperatury. Monitoringowi będzie podlegać temperatura glikolu etylenowego i wody chłodzącej na wejściu i wyjściu z jednostki centralnej oraz temperatura materiału PCM (woda badana). W jednostce centralnej zostaną zamocowane symetrycznie 24 czujniki pomiaru temperatury (PT 1000) w taki sposób, aby monitorowana była temperatura czynnika badanego od strony płaszcza chłodniczego i cylindra z glikolem etylenowym. Wszystkie czujniki do

rejestracji temperatury podłączono do dedykowanego rejestratora temperatury. Rejestrator został zaprojektowany do obsługi stanowiska w taki sposób, aby automatycznie zapisywał dane z czujników na komputerze w celu ich dokładnej analizy.

Oprócz pomiaru temperatury mierzony będzie również przepływ cieczy w dwóch obiegach – wodnym (płaszcz chłodzącego) i glikolu etylenowego, pomiar wykonywany będzie za pomocą zainstalowanych zwężek Venturiego.

W badaniach stosowana będzie woda destylowana jako materiał PCM, której właściwości będą wykorzystywane do opisanie teoretycznego zjawiska krzepnięcia.

### LITERATURA

1. DIEZ, R., DIEZ, M., BELDA, R., HERRAEZ, J.V., BUENDIA, M.; 1989. Free convection around a horizontal circular cylinder. A dimensional empirical equations. *Scientific Research* 46, 365-378.
2. DOMAŃSKI, R.; 1990. *Magazynowanie energii cieplnej*. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa, ss. 212.
3. HOBLER, T.; 1986. *Ruch ciepła i wymienniki*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, ss. 810.
4. LIPNICKI, Z.; WEIGAND, B.; 2012. An experimental and theoretical study of solidification in a free convection flow inside a vertical annular enclosure. *International Journal Heat Mass Transfer*, nr 55/2012, 655-664.
5. PUDLIK, W.; 2012. *Wymiana i wymienniki ciepła*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 336.
6. WIŚNIEWSKI, S.; WIŚNIEWSKI, T.; 1994. *Wymiana ciepła*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, ss. 544.

### THE TEST STAND PROJECT TO ANALYSIS SOLIDIFICATION IN CYLINDER SPACE

#### *S u m m a r y*

*The paper presents an experimental design to test the position of the solidification process around the cylindrical surface. Characterized the convection and solidification process around the horizontal cylinder and inclined. The distribution of the local heat transfer coefficient of the flow around a transverse horizontal cylinder. A combination solidification phenomena and convection of the liquid around the cylindrical surface.*

Key words: solidification process, free convection, cylindrical space