

## ANALIZA WARUNKÓW WYMIANY CIEPŁA PODCZAS ZAMRAŻANIA WARZYW METODĄ ODWRÓCONEJ FLUIDYZACJI Z19.K19/1

*Dariusz Góral, Franciszek Kluza, Katarzyna Kozłowicz*

*Katedra Chłodnictwa i Energetyki Przemysłu Spożywczego, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie*

**Streszczenie.** Celem pracy była doświadczalna charakterystyka współczynnika wnikania ciepła od warzyw do powietrza podczas ich zamrażania metodą odwróconej fluidyzacji. Wartości współczynnika wnikania ciepła wyznaczano pośrednio poprzez pomiar gęstości strumienia wnikającego ciepła, mierzonej przy użyciu czujnika Heat Flux Sensor. Złoża poddawane zamrażaniu formowano z prób warzyw w postaci plastrów o wymiarach 3x3x0,5 cm. Wyniki z podstawowej części badań eksperymentalnych wykorzystano do opracowania modelu obliczeń liczby Nusselta, który powstał poprzez adaptację zależności  $Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n$ . Podstawowy wzór modelu o postaci  $Nu_x = 0,353 \cdot Re_x^{0,608}$  charakteryzuje bezwymiarowo zależność współczynnika wnikania ciepła od parametrów procesu i obowiązuje w zakresie wartości liczb Reynoldsa  $8000 \leq Re_x \leq 30000$ . Weryfikację tej zależności przeprowadzono poprzez wszechstronne porównanie wyników uzyskanych na jej podstawie z rezultatami doświadczeń w tych samych warunkach procesu. Analiza weryfikacyjna polegała na statystycznej ocenie względnego błędów obliczeń, charakterystyce regresji wartości liczby Nusselta i ocenie dopasowania rozkładów wyników obliczeń liczby  $Nu$  do rozkładów liczby Nusselta, uzyskanych według danych eksperymentalnych. Stwierdzono istnienie silnego skorelowania wartości współczynnika wnikania ciepła, otrzymywanych wg proponowanego modelu, z wynikami uzyskanymi na drodze eksperymentalnej.

**Słowa kluczowe:** współczynnik wnikania ciepła, fluidyzacja, zamrażanie, warzywa

### Wykaz symboli

- A – powierzchnia ( $m^2$ ),
- c – ciepło właściwe ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),
- D – średnica wewnętrzna dyszy (m),
- h – współczynnik wnikania ciepła ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ),
- k – przewodność cieplna ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ),
- L – długość dyszy (m),
- l – wymiar charakterystyczny (m),

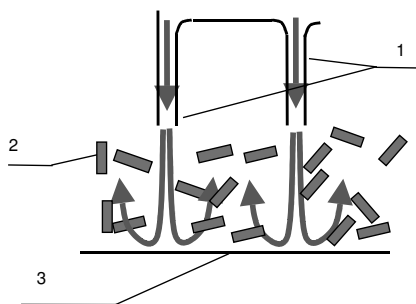
- $\dot{Q}$  – strumień ciepła (W),  
 $\dot{q}$  – gęstość strumienia ciepła ( $W \cdot m^{-2}$ ),  
 $S, S_1, S_2$  – rozstaw dysz (m),  
 $T$  – temperatura ( $^{\circ}C$ ),  
 $w$  – prędkość przepływu ( $m \cdot s^{-1}$ ),  
 $x$  – odległość od krawędzi do końca płyty (m),  
 $\mu$  – lepkość dynamiczna powietrza ( $Pa \cdot s$ ),  
 $\nu$  – lepkość kinematyczna powietrza ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ).

#### Indeksy

- $a$  – środowisko  
 $e$  – eksperymentalny  
 $f$  – powietrze  
 $p$  – obliczony  
 $s$  – powierzchnia

## Wstęp

W ostatnich latach szereg producentów wprowadziło rozwiązania typu impingement w produkcji tuneli zamrażalniczych. Charakterystyczne dla tego procesu uderzenie strumienia powietrza w powierzchnię produktu powoduje zmniejszenie grubości lub eliminację warstwy przyściennej powietrza otaczającej produkt. Prowadzi to do znacznej intensyfikacji wnikania ciepła od zamrażanego produktu do środowiska, co skutkuje gwałtownym wzrostem szybkości zamrażania (Kluza i Spiess, 1995).



Rysunek 1. Schemat procesowy metody odwróconej fluidyzacji: 1 – dysze, 2 – produkt, 3 – dno komory roboczej

Figure 1. Process scheme of impingement fluidization method: 1 – nozzles, 2 – product, 3 – bottom of operating chamber

Podczas gdy systemy impingement zostały wdrożone w produkowanych urządzeniach przemysłowych i są coraz częściej stosowane, to efektywne powiązanie zjawiska impingement z klasyczną fluidyzacją znajduje się wciąż w trakcie badań (Gea, 2012; JBT FoodTech, 2012; Starfrost, 2012). W takim przypadku istnieją dwie możliwości wytworzenia stanu fluidyzacji złoża. Pierwsza metoda polega na skierowaniu strumienia powietrza poprzez dysze od dołu na złożo produktu i w zasadzie nie odbiega ona od klasycznej fluidyzacji (Ovadia, 1998). Drugi sposób to wywołanie fluidyzacji w układzie odwróconym poprzez skierowanie z odpowiednią prędkością strumienia powietrza od góry na złożo (rys. 1).

Ruch elementów złoża w warunkach odwróconej fluidyzacji częściowo przypomina zachowanie się cząstek w procesie fluidyzacji fontannowej. Z chwilą osiągnięcia krytycznej prędkości fluidyzacji siła naporu powietrza przewyższa siłę ciężkości i siły adhezji produktu do dna komory, i pomiędzy elementami złoża, i produkt jest unoszony w kierunku wierzchołka fontanny.

Dodatkowo, w wyniku wzajemnego kontaktu sąsiednich elementów złoża, pojedyncze z nich przemieszczane są na brzeg szczytu fontanny i dostają się do strefy niższego ciśnienia powietrza. Siła ciężkości powoduje ich opadanie i przemieszczanie się w stronę strumienia powietrza wypływającego z dyszy. Zjawiska aeromechaniczne, występujące w tym etapie, są analogiczne z tymi, jakie panują podczas klasycznej fluidyzacji.

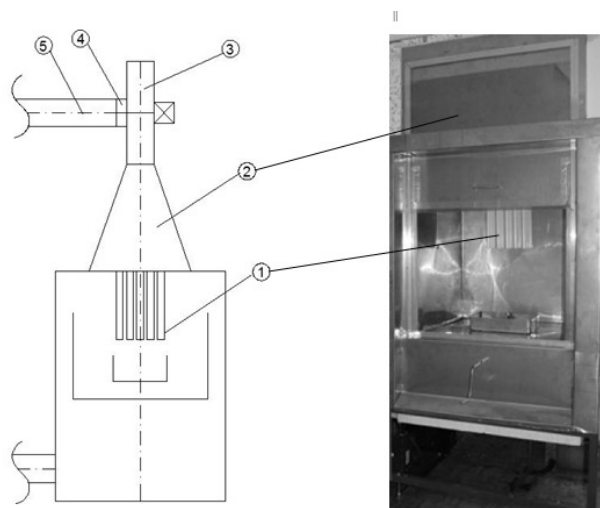
W momencie kiedy element złoża znajdzie się w strefie oddziaływania strumienia powietrza wypływającego z dyszy, gwałtownie opada w dół, przemieszczając się w kierunku podstawy fontanny. Ten etap procesu w przypadku obróbki cieplnej produktu powinien charakteryzować się wysokimi wartościami współczynnika wnikania ciepła. Po osiągnięciu podstawy fontanny przez elementy złoża, rozpoczyna się ponowny cykl procesowy. Przebieg procesu wskazuje w przypadku wymiany ciepła na możliwość osiągnięcia wartości współczynnika wnikania ciepła wyższych niż w klasycznej fluidyzacji. Dostępne źródła nie przytaczają obliczeniowych rozwiązań problemu wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła w procesach obróbki cieplnej metodą odwróconej fluidyzacji. Tymczasem znajomość wartości tego współczynnika jest niezbędna co najmniej do projektowania procesów i urządzeń (Kluza, 1999; Góral i Kluza, 2009).

Celem badań było opracowanie analityczno-empirycznego modelu obliczeniowego wyznaczenia wartości współczynnika wnikania ciepła panującego w czasie zamrażania warzyw metodą odwróconej fluidyzacji.

## **Materiały i metody**

Badania doświadczalne polegające na zamrażaniu próbek produktów metodą odwróconej fluidyzacji wykonano w urządzeniu laboratoryjnym, wyposażonym w instalację chłodniczą z agregatem firmy L'Unite Hermetique (Typ TAG 2522 ZBR) i wentylatorem wysokoprężnym (Nyborg–Mawent WP–20/1,5) o regulowanej bezstopniowo wydajności ( $0,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  przy ciśnieniu 2,6 kPa), poprzez wykorzystanie przemiennika częstotliwości prądu zasilającego jego silnik. Stanowisko wyposażone było w wymienne głowice umieszczone w komorze roboczej urządzenia (rys. 2).

Każda z głowic składała się z dna sitowego o wymiarach  $0,41 \times 0,36 \times 0,018 \text{ m}$  i umieszczonych w nim dysz o podstawowej długości 0,37 m. Głowice różniły się: średnicą dysz  $D$ , ich długością  $L$  i rozstawem  $S_1$ ,  $S_2$  oraz ilością dysz i ich układem (tab. 1). Przykładowo głowica „14” składała się z 30 dysz o długości 0,37 m i średnicy wewnętrznej 0,014 m, rozmieszczonych równolegle w 6 rzędach. Głowicę tę wykonano również w wersjach z dyszami o długościach 0,355 m, 0,295 m oraz 0,195 m (tab. 1).



Rysunek 2. Komora robocza urządzenia laboratoryjnego 1 – głowica robocza z dyszami, 2 – dyfuzor, 3 – wentylator, 4 – konfuzor, 5 – doprowadzenie schłodzonego powietrza  
 Figure 2. Operating chamber of laboratory device 1 – operating head with nozzles, 2 – diffuser, 3 – fan, 4 – confusor, 5 – supply of cooled air.

Tabela 1  
 Charakterystyka wymiarowa głowic roboczych  
 Table 1  
 Dimensional characteristics of working heads

Rodzaj głowicy	D, (mm)	L, (mm)	S <sub>1</sub> , (mm)	S <sub>2</sub> , (mm)	Liczba dysz (szt.)
14	14	370	34	32	30
14 (355)	14	355	34	32	30
14 (295)	14	295	34	32	30
14 (195)	14	195	34	32	30
11 przestawna	11	370	26	27	48
16	16	370	34	34	24
16 przestawna	16	370	68	76	12
20	20	370	50	47	20
23	23	370	42	47	20

Prędkość strumieni powietrza odbitego od dna komory roboczej mierzono przy użyciu rurki Pitota typu L połączonej do miernika (KIMO Anemo – Manometr MP 120), w punktach rozmieszczonych pomiędzy każdą parą dysz w głowicach. Pomiary te wykonano, zachowując stałą odległość 70 mm w pionie pomiędzy końcówką sondy Pitota a powierzchnią dna komory roboczej, uwzględniając także głowice o dyszach skróconych. Uzyskane poprzez pomiar wartości prędkości powietrza uśredniano dla całej głowicy.

Materiałem użytym do eksperymentów były próbki wykonane z marchwi lub z selera korzeniowego, lub z pietruszki, ukształtowane w plastry o wymiarach 3x3x0,5 cm. Za pomocą czujnika Heat Flux Sensor BF02 (Vatell Corporation) mierzono gęstość strumienia ciepła przekazywanego od produktu do powietrza (Amarante i in., 2003; Amarante i Lanoselle; 2005). Czujnik o wymiarach 10x10 mm i grubości 0,25 mm był kalibrowany fabrycznie w standardzie NIST. Niewielki stosunek grubości płytki czujnika do jej powierzchni umożliwił zredukowanie do minimum wpływu czujnika na ciągłość przepływu powietrza w obrębie rozpatrywanej powierzchni prób. Przed zamrażaniem czujnik był przytwierdzany do produktu termoprzewodzącą pastą silikonową (AG Chemia). Do pomiaru temperatury środowiska i temperatury powierzchni próbki użyto termopar typu K.

Element złoża z czujnikiem umieszczano w złożu (0,5 kg) produktu w komorze roboczej urządzenia i poddawano zamrażaniu metodą odwróconej fluidyzacji. Temperatura powietrza wynosiła  $-22^{\circ}\text{C}$ . Wartość współczynnika wnikania ciepła wyznaczano z pomiarów gęstości strumienia ciepła uzyskanych przy zakresie prędkości powietrza odbitego od  $3,2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $10,5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zamrażanie prowadzono do momentu uzyskania temperatury  $-5^{\circ}\text{C}$  przez centrum termiczne próbki. Każdy eksperyment prowadzono w 3 powtórzeniach. Znając temperaturę środowiska, temperaturę powierzchni oraz gęstość strumienia ciepła, wyznaczano lokalną wartość współczynnika wnikania ciepła od powierzchni płyty do powietrza. Eksperymenty wykonano z wykorzystaniem wszystkich głowic roboczych. Odległość wylotu powietrza z dysz od dna komory roboczej była stała i wynosiła 0,12 m.

Błędy możliwe do popełnienia w pomiarach podczas doświadczeń są trudne do jednoznacznego oszacowania. Wynikają one mogą z zaburzenia przepływu powietrza przez czujniki pomiarowe, z niedokładności umieszczenia termopar, z niepewności danych o odpowiednich właściwościach termofizycznych powietrza i produktu, a także z innych przyczyn. Prowadzone przez innych autorów badania nie potwierdzają istotnego wpływu obecności czujnika do pomiaru strumienia ciepła na warunki jego przekazywania w układzie, a w konsekwencji – na wyznaczenie wartości współczynnika wnikania ciepła (Deo i Karwe, 1985; Saidia i Kim, 2004). Wykorzystany w badaniach czujnik umieszczony był centralnie na powierzchni produktu. Ze względu na jego grubość (0,25 mm) i niewielkie pozostałe wymiary tylko w minimalnym stopniu mógł on zakłócać przepływ powietrza. Niedokładność pozycjonowania termopary do pomiaru temperatury powierzchni produktu (umieszczonej na powierzchni próbki obok czujnika przepływu ciepła) była korygowana poprzez równoległy pomiar za pomocą pirometru z celownikiem laserowym. W czasie pomiarów nie stwierdzono oszronienia powierzchni czujnika. Czujnik mocowano do produktu przy użyciu pasty termoprzewodzącej, zapewniając pełny kontakt powierzchni obu obiektów. Ze względu na to, że współczynnik wnikania ciepła wyrażony jest w postaci iloczynu wielkości mierzalnych (1), do analizy maksymalnej wartości względnego błędu pomiaru zastosowano metodę pochodnej logarytmicznej. Uwzględniając w obliczeniach dokładność pomiaru wartości gęstości strumienia ciepła za pomocą czujnika przepływu ciepła oraz dokładność pomiaru temperatury powietrza i powierzchni próbki przy pomocy miernika wyposażonego w termopary, maksymalny błąd pomiaru wyniósł  $\pm 0,61\%$ . Ze względu na dużą czułość przyrządów błędy pomiaru wartości prędkości powietrza, jego wilgotności oraz masy próbek nie miały istotnego wpływu na wartość badanych cech.

## Wyniki badań i ich dyskusja

Przekształcając zgodnie z prawem Newtona wzór na gęstość strumienia ciepła przekazywanego przez wnikanie, otrzymuje się zależność umożliwiającą wyznaczenie wartości współczynnika wnikania ciepła:

$$h = \frac{\dot{q}}{T_s - T_a} \quad (1)$$

Ogólna wartość współczynnika wnikania ciepła zależy od szeregu uwarunkowań, m. in. od prędkości i właściwości termofizycznych płynu, geometrii produktu, jego orientacji, stanu powierzchni obrabianego produktu. W związku z powyższym, współczynnik ten najczęściej wyrażany jest poprzez liczbę Nusselta w postaci jej zależności od innych liczb kryterialnych (np. liczb Prandtla, Reynoldsa), charakteryzujących badane przypadki wymiany ciepła (Dincer, 1997; Fricke i Becker, 2004).

W odniesieniu do analizowanego przypadku fluidyzacji, wartość lokalną współczynnika wnikania ciepła od płaskiej płyty do powietrza można wyznaczyć z liczby Nusselta:

$$Nu_x = \frac{h \cdot x}{k_f} \quad (2)$$

W większości przypadków procesowych różnica wartości temperatury powietrza na wyjściu z dyszy oraz powietrza odbitego jest na tyle mała, że można założyć, iż temperatura strumienia powietrza w obszarze złoża jest stała (San i Lai, 2001). Przystępując do opracowania modelu obliczeń, poczyniono ponadto następujące ogólne założenia podstawowe:

- przepływ powietrza w zakresie prędkości umożliwiającej zachodzenie zjawiska odwróconej fluidyzacji jest turbulentny,
- zakres wartości temperatury powietrza wynosi  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $0^{\circ}\text{C}$ ,
- kształt surowca odpowiada płycie nieskończonej,
- przekazywanie ciepła ma charakter niestacjonarny,
- podstawowy wzór modelu powinien być zależnością liczb kryterialnych.

Przy założeniu turbulentnego opływu przez płyn obiektu w kształcie płyty, do obliczenia lokalnej wartości liczby Nusselta, charakteryzującej wnikanie ciepła, zazwyczaj wykorzystuje się równanie kryterialne o postaci (Becker, 2004):

$$Nu_x = C Re_x^m Pr^n \quad (3)$$

gdzie: stałe C, m i n są wyznaczone eksperymentalnie, a lokalna wartość liczby Reynoldsa jest definiowana jako:

$$Re_x = \frac{w \cdot x}{\nu} \quad (4)$$

W rozpatrywanym przypadku procesu wartości liczby Reynoldsa mieściły się w zakresie od 8000 do 30000, a więc również w obszarze charakteryzowanym jako przepływ przejściowy. Biorąc pod uwagę to, że produkt porusza się w strumieniu powietrza odbite-

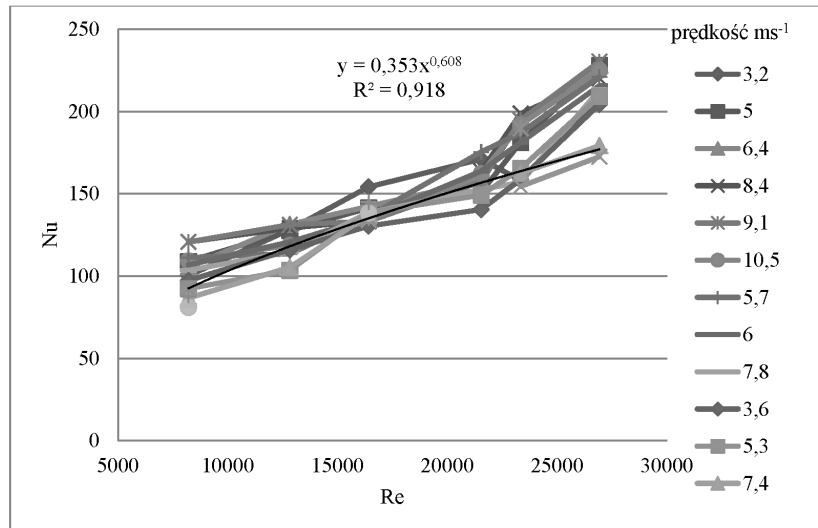
go, czyli o zmienionym kierunku przepływu, z dużym prawdopodobieństwem można założyć, że przepływ powietrza wokół rozpatrywanego obiektu w postaci płyty był burzliwy.

W zakresie wartości temperatury i wilgotności powietrza wymaganych w przemysłowych procesach zamrażania żywności, wartość liczba Prandtla zmienia się w niewielkim zakresie. Dlatego też wartość tej liczby we wzorze (3) można włączyć do stałej  $C$  (Chan i in., 2002). Stąd zależność ta, w przypadku wnikanie ciepła na drodze konwekcji wymuszonej, sprowadza się do postaci:

$$Nu_x = CRe_x^m \quad (5)$$

przy czym, w odniesieniu do wykładnika  $m$ , należy spodziewać się wartości w przedziale  $0,5 < m < 0,8$  (Madejski, 1998).

Na potrzeby modelu współczynniki  $C$  i  $m$  wyznaczono empirycznie, prowadząc procesy zamrażania z wykorzystaniem głowicy roboczej z dyszami o średnicy wewnętrznej 20 mm i zmieniając prędkość powietrza od wyznaczonej wartości minimalnej prędkości fluidyzacji do prędkości powietrza odbitego równej  $10,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , która wynikała z konieczności utrzymania fluidyzacji. Do wyznaczenia wartości liczby Reynoldsa przyjęto parametry powietrza o wilgotności (25% RH) zmierzonej w komorze roboczej urządzenia (Lemmon i in., 2000). Uzyskane wartości liczby Nusselta, przy uwzględnieniu równania 5, poddano analizie regresji względem odpowiadających im wartości liczby Reynoldsa, otrzymując zależność  $Nu_x = 0,353Re_x^{0,608}$  przy współczynniku determinacji równym 0,918 (rys. 3) (Góral i Kluza, 2012).



Rysunek 3. Zależność regresyjna wartości liczby  $Nu$  względem liczby  $Re$  uzyskanych w procesach zamrażania przy wykorzystaniu głowicy z dyszami 20 mm

Figure 3. Regression dependence of  $Nu$  number in relation to  $Re$  number obtained at freezing process with head fitted with 20 mm-nozzles

Z uwagi na brak dostępnych danych doświadczalnych umożliwiających weryfikację uzyskanej zależności, przeprowadzono pomiary w czasie realizacji zamrażania produktu z wykorzystaniem pozostałych głowic roboczych. Wartości współczynnika wnikania ciepła z uwzględnieniem wszystkich tych głowic, odniesione do prędkości powietrza odbitego od dna komory roboczej, zmieniały się od  $62 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$  – uzyskanej przy prędkości powietrza odbitego równej  $3,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  – do  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$  – w czasie zamrażania prób przy prędkości powietrza odbitego wynoszącej  $9,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Zmniejszenie wartości tego współczynnika od wartości  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$  do wartości około  $160 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$  spowodowane jest zmniejszeniem się w czasie różnicy temperatur powietrza i powierzchni produktu. Najwyższe wartości współczynnika odnotowano podczas schładzania elementów złoza do temperatury krioskopowej ( $206\text{-}165 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ), natomiast podczas etapu czystego zamrażania współczynnik wnikania ciepła wykazywał w przybliżeniu stałą wartość, oscylującą wokół  $160 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Związane to było z ustaleniem się czynnej różnicy temperatur na stałym poziomie  $14 \text{ K}$ .

W celu porównania wyznaczonych wartości współczynnika wnikania ciepła z dostępnymi danymi źródłowymi założono, że wyznaczona lokalna wartość jest zbliżona do wartości średniej tego współczynnika (Salvadori i Mascheroni, 2002; Amarante i Lanoisellé, 2005). Wyznaczone średnie wartości współczynnika wnikania ciepła wynosiły od  $62 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$  do  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$  i były niższe aniżeli wartości  $150\text{-}350 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$  (Salvadori i Mascheroni, 2002) uzyskiwane podczas zamrażania żywności metodą impingement. Wartości te były jednak znacząco wyższe, niż średnie wartości współczynnika wnikania ciepła ( $35\text{-}100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) uzyskiwane podczas zamrażania plasterów cukinii w tunelu fluidyzacyjnym przy prędkości powietrza  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  i temperaturze  $-39^\circ$  (Amarante i Lanoisellé, 2005).

Wartości współczynnika wnikania ciepła pochodzące z badań eksperymentalnych i wartości obliczone dla tych samych warunków procesowych według proponowanego modelu poddano analizie porównawczej, stosując odpowiednie metody statystyki matematycznej. Analiza obejmowała ocenę względnego błędu obliczeń, charakterystykę regresji wartości liczby Nusselta, uzyskanych z badań względem wartości obliczonych, i badanie dopasowania rozkładów wartości liczby  $Nu$ , pochodzących z obliczeń i z danych eksperymentalnych. Wyniki oceny błędu traktowanego jako odchylenie wartości  $Nu$  obliczonej od doświadczalnej potwierdzają dobrą jakość proponowanego modelu obliczeń (tab. 2).

Średnie względne odchylenie obliczonych wartości liczby Nusselta od wartości rzeczywistych oznacza, że wartość tej liczby obliczona według nowego modelu może być większa od rzeczywistej o ok. 4%. Niskie wartości skośności i dodatnie kurtozy świadczą o tym, że wartości błędu rozkładają się w przybliżeniu symetrycznie i blisko wokół średniej (tab. 2).



Tabela 2  
*Wyniki statystycznej analizy błędów wyznaczenia liczby Nu*  
 Table 2  
*Results of statistical analysis of errors at Nu number determination*

Zmienna		Wartość
Liczebność		16
Średnia	(%)	4,38
Wariancja	(%)	104,56
Odchylenie stand.	(%)	10,23
Błąd – min.	(%)	-17,14
maks.	(%)	16,42
rozstęp	-	33,57
Skośność stand.	-	-1,98
Kurtoza (standaryzowana)	-	0,58

Analiza regresji wartości  $Nu$  wyników obliczonych względem wartości rzeczywistych daje równanie

$$Nu_p = -22,01 + 1,23 Nu_e \quad (6)$$

Oczywistym jest fakt, iż w przypadku zgodności wyników obliczeń z danymi rzeczywistymi, wyraz wolny w równaniu (6) powinien wynosić 0, a współczynnik kierunkowy mieć wartość 1.

Wobec tego, wyniki obliczeń mogą być odchyłone od wartości rzeczywistych o 23%. Współczynnik korelacji  $r = 0,936$  oznacza na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  silne skorelowanie wyników otrzymywanych według proponowanego modelu z wynikami rzeczywistymi.

Do zbadania zgodności rozkładów wartości  $Nu$  obliczonych z rzeczywistymi użyto nieparametrycznego testu Kołmogorowa–Smirnowa. Porównując największą bezwzględną wartość różnic dystrybuant empirycznych  $D_N$  z krytycznymi wartościami różnic tych dystrybuant  $D_0$ , można stwierdzić, czy dane rozkłady są dopasowane. W analizowanym przypadku wartość różnicy dystrybuant wynosiła  $D_v = 0,25$ , przy wartości krytycznej  $p_{value} = 0,7$  i była wyższa od poziomu istotności 0,05. To oznacza, że statystycznie nie ma istotnych różnic pomiędzy wartościami liczby Nusselta obliczonymi według proponowanego modelu a wartościami tej liczby wyznaczonymi na podstawie danych doświadczalnych, dla tych samych warunków.

Należy zwrócić uwagę, że w analizie zagadnienia nie uwzględniono wpływu i udziału procesów wymiany masy. Sam ubytek masy w przypadku prób marchwi w pełnym procesie zamrażania kształtował się na poziomie do 3%. Pomimo tego, weryfikacja proponowanego modelu potwierdza dobre dopasowanie wyników obliczeń do danych uzyskanych na drodze eksperymentalnej.

## Wnioski

1. Zależność kryterialna, umożliwiająca obliczenie wartości współczynnika wnikania ciepła panującego w procesie zamrażania metodą odwróconej fluidyzacji ma postać  $Nu_x = 0,353 Re_x^{0,608}$ . Model zachowuje swą ważność w zakresie wartości liczby Reynoldsa od 8000 do 30000.
2. Istnieje silne skorelowanie wyników otrzymywanych według modelu z wynikami rzeczywistymi ( $r = 0,936$ ). Jednocześnie stwierdzona w analizie maksymalna wartość błędu wyznaczania współczynnika wnikania ciepła według modelu wyniosła poniżej  $\pm 20\%$ .
3. Porównanie wyników badań z danymi literaturowymi, dotyczącymi podobnych procesów zamrażania, jest na tym etapie trudne ze względu na różne wartości parametrów procesu. Średnie wartości współczynnika wnikania ciepła od plastrów produktu do powietrza w czasie zamrażania wynosiły od 62 do 200  $W \cdot m^{-2} K^{-1}$  i zależały przede wszystkim od prędkości powietrza. Wartości tego współczynnika są niższe niż dostępne w literaturze, odnoszące się do metody impingement, i znacząco wyższe niż uzyskiwane, np. podczas zamrażania plastrów cukinii w tunelu fluidyzacyjnym.

## Literatura

- Amarante, A.; Lanoiselle, J.L. (2005). Heat transfer coefficients measurement in industrial freezing equipment by using heat flux sensors. *Journal of Food Engineering*, 66, 377-386.
- Amarante, A.; Lanoiselle, J.L.; Ramirez, A. (2003). Direct measurement of heat transfer rates and coefficients in freezing processes by the use of heat flux sensors. *Chemical Engineering Research and Design*, 81, 1105-1112.
- Becker, B.R.; Fricke, B.A. (2004). Heat transfer coefficients for forced-air cooling and freezing of selected foods. *International Journal of Refrigeration*, 27, 540-551.
- Chan, T.L.; Leung, C.W.; Jambunathan, K.; Ashforth-Frost, S.; Zhou, Y.; Liu, M.H. (2002). Heat transfer characteristics of a slot jet impinging on a semi-circular convex surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 993-1006.
- Deo, I.S.; Karwe, M.V. (1985). Effect of dimensions and thermal properties of heat flux gage on local heat flux. *Proceedings of the ASME Heat Transfer Division*, 5, 603-609.
- Dincer, I. (1997). New effective Nusselt-Reynolds correlations for food-cooling applications. *Journal of Food Engineering*, 31, 59-67.
- Fricke, B.A.; Becker, B.R. (2004). Calculation of food freezing times and heat transfer coefficients. *ASHRAE Transactions*, 110, 145-157.
- Gea (2012). *GEA HVF-series Impingement Freezers*. Pozyskano z: <http://www.gearefrigeration.com/pl-pl/Components/Freezers/HVF-Freezers/Pages/default.aspx>
- Góral, D.; Kluza, F. (2009). Cutting test application to general assessment of vegetable texture changes caused by freezing. *Journal of Food Engineering*, 95, 346-351.
- Góral, D.; Kluza, F. (2012). Heat transfer coefficient in impingement fluidization freezing of vegetables and its prediction. *International Journal of Refrigeration*, 35, 871-879.
- JBT FoodTech (2012). *Fast, food-focused and cost-effective*. Pozyskano z: <http://www.jbtfoodtech.com/en/Solutions/Equipment/Frigoscandia-ADVANTEC-Impingement-Freezer>
- Kluza, F. (1999). Preliminary evaluation of impingement method utility for food freezing. Proceedings of the International Congress „Improved traditional foods for the next century”, DG XII European Commission and CSIC Valencia, Spain, 28-29 October, 406-408.

- Kluza, F.; Spiess, W.E.L. (1995). *Investigation on heat transfer coefficient during heat processing of food involving impingement method*. 9th World Congress of Food Science and Technology, Symposium subject 35, Reg.451/181, Abstracts of Lectures and Posters, vol. II, 47.
- Lemmon, E.W.; Jacobsen, R.T.; Penoncello, S.G.; Friend, D.G. (2000). Thermodynamic properties of air and mixtures of nitrogen, argon and oxygen from 60 to 2000K at pressures to 2000MPa. *Journal of physical and chemical reference data*, 29, 331-385.
- Madejski, J. (1998). *Teoria wymiany ciepła*. Szczecin, Wyd. Uczelniane Politechniki Szczecińskiej. ISBN 83-87423-47-5.
- Ovadia, D.Z.; Walker C.E. (1998). Impingement in food processing. *Food Technology*, 52, 46-50.
- Saidia, A.; Kim, J. (2004). Heat flux sensor with minimal impact on boundary conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28, 903-908.
- Salvadori, V.O.; Mascheroni, R.H. (2002). Analysis of impingement freezers performance. *Journal of Food Engineering*, 54, 133-140.
- San, J.Y.; Lai, M.D. (2001). Optimum jet-to-jet spacing of heat transfer for staggered arrays of impinging air jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 3997-4007.
- Starfrost (2012). *Tunele Impingement o wysokich prędkościach*. Pozyskano z: <http://www.starfrost.com/pl/tunele-impingement.html>

## ANALYSIS OF HEAT TRANSFER DURING THE FREEZING OF VEGETABLES BY IMPINGEMENT FLUIDIZATION

**Abstract.** The research objective was to carry out experimental characteristics of a heat transfer coefficient during the impingement fluidized freezing of vegetables. Heat transfer coefficient values were determined by the intermediate measuring of heat flux density by Heat Flux Sensor. The beds undergoing the freezing process were formed from the vegetable sample slices of 3x3x0.5 cm dimensions. The basic model formulation  $Nu_x = 0.353 \cdot Re_x^{0.608}$  represents a dimensionless dependence of a heat transfer coefficient on the process parameters and is valid for 8000 <  $Re_x$  < 30000 range. The validation analysis consisted in statistical evaluation of a relative computation error, characteristic of regression for the Nusselt number and estimation of a match between the Nu number computational results distributions and the distributions of the Nusselt number from the experimental data set. A strong correlation between the heat transfer coefficient values obtained from the proposed model and those experimental ones was found.

**Key words:** heat transfer coefficient, fluidization, freezing, vegetable

### Adres do korespondencji:

Dariusz Góral; e-mail: [dariusz.goral@up.lublin.pl](mailto:dariusz.goral@up.lublin.pl)  
Katedra Chłodnictwa i Energetyki Przemysłu Spożywczego  
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie  
ul. Doświadczalna 44  
20-280 Lublin