

Mgr inż. Krzysztof MIASTKOWSKI
Dr hab. inż. Sławomir BAKIER prof. nadzw. PB
Zamiejscowy Wydział Leśny Politechniki Białostockiej w Hajnówce

BADANIA PROTOTYPOWEGO URZĄDZENIA DO ODWADNIANIA MIODU®

Research on a prototype honey dehydration device®

*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/ZWL/1/2014 i sfinansowane
ze środków na naukę MNiSW*

Słowa kluczowe: odwadnianie miodu, przepływy powietrza, CFD, analizy numeryczne.

W pracy zaprezentowanej w artykule przedstawiono oryginalną konstrukcję urządzenia do niskotemperaturowego odwadniania (zagęszczania) miodu opartą o patent nr PL218759B1 wraz ze szczegółową analizą wpływu rozwiązania konstrukcyjnego i parametrów pracy komory osuszania miodu na wydajność odwadniania. Zaprezentowano wyniki badań wpływu parametrów konstrukcyjnych oraz procesowych na charakterystykę przepływu powietrza przez komorę roboczą w oparciu o jej modele CAD (Computer Aided Design) przy wykorzystaniu metod symulacyjnych CFD (Computational Fluid Dynamics) przy różnych warunkach początkowych. Uzyskane z symulacji wyniki porównano z pomiarami empirycznymi przepływu powietrza wykonanymi w warunkach rzeczywistych w powstałej konstrukcji wraz z wyznaczeniem uzyskanego błędu między dwoma metodami. Wyznaczono również masową wydajność odwadniania miodu płynnego w prototypie urządzenia z dwoma wariantami rozwiązania komory osuszającej. Średni błąd numerycznego modelowania w analizowanych przypadkach wynosił od 12,88% do 27,09%. Przeprowadzone symulacje numeryczne zweryfikowane empirycznie pozwoliły wypracować rozwiązanie konstrukcyjne komory osuszania w urządzeniu prototypowym do odwadniania miodu o znacznie większej efektywności od pierwotnie przyjętej konstrukcji. Wariant 2 komory osuszającej okazał się o ponad 60% efektywniejszy do Wariantu 1.

Key words: honey dehydration, air flows, CFD, numerical analyzes.

The paper presented in the article presents the original design of a device for low-temperature honey dehydration based on patent no. PL218759B1 and a detailed analysis of the impact of the construction solution and the dehydration chamber's operating parameters on the dehydration capacity. The paper also presents the results of investigations on the impact of construction and process parameters on the air flow characteristics through the working chamber based on CAD (Computer Aided Design) models using CFD simulation methods (Computational Fluid Dynamics) under different initial conditions. The results obtained from the simulation were compared with the empirical measurements of air flow performed in real conditions in the construction prototype. Also a numerical modeling error was determined between the two measurement methods used. Also determined was the mass dehydration efficiency of liquid honey in the prototype of the device with two variants of the dehydration chamber solution. The average numerical modeling error in the analyzed cases ranged from 12.88% to 27.09%. The numerical simulations and empirical studies allowed to work out a constructional solution of the dehydration chamber in a prototype dehydration device with much higher efficiency than the originally adopted structure – Variant 2 dehydration chamber turned out to be over 60% more effective to Variant 1.

WSTĘP

W przemyśle spożywczym do zagęszczania produktów w postaci ciekłej wykorzystuje się głównie wyparki, w których proces realizowany jest w podwyższonej temperaturze i przy podciśnieniu. Nie wszystkie jednak produkty można zagęszczać przy wykorzystaniu tych urządzeń ze względu na ich termolabilność i utratę składników aromatycznych. Do takich produktów należy m.in. miód pozyskiwany przez pszczelarzy, który nierzadko nie spełnia wymogów PN i dyrektyw UE w zakresie zawartości wody [9]. Pozyskiwanie

miodu o zwiększonej zawartości wody wynika ze specyficznych warunków pogodowych i przebiegu pożytków, które często „zachodzą na siebie”. Problem ten szczególnie uwydatnia się przy pozyskiwaniu poszukiwanych, późnych miodów odmianowych, takich jak miód wrzosowy i nawłociowy. Z tego też powodu pszczelarze i firmy konfekcjonujące stosują różne metody zagęszczania miodu [11, 20, 21, 23]. Większość z nich opiera się na odparowaniu nadmiaru wody z miodu w kontrolowanych warunkach w specjalnych urządzeniach przy temperaturze poniżej 45°C bezpośrednio z plastrów lub z patoki po odwirowaniu [9, 15]. Jako

czynnik odbierający parującą wodę z miodu wykorzystuje się powietrze o obniżonej wilgotności [10, 11, 14]. Efektywność takiego procesu jest zwykle niewielka ze względu na niską temperaturę, do której można podgrzewać miód podczas zagęszczania.

Dotychczasowe rozwiązania konstrukcyjne służące do odwadniania miodu po odwirowaniu z plastrów są urządzeniami stacjonarnymi wyposażonymi w komory o specjalnej budowie, do których płynny miód należy przetłoczyć [7, 12, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. Po zakończeniu procesu zagęszczania obrabiany surowiec powinien być dokładnie spuszczone a urządzenie skrupulatnie wymyte. Często komory te mają znaczne objętości sięgające wielu tysięcy litrów, co generuje wysokie nakłady energetyczne procesu a ich efektywność zależy od stopnia wypełnienia. Z tego też względu konstrukcje te są głównie wykorzystywane przez duże podmioty zajmujące się konfekcjonowaniem miodu [13, 21, 22].

Żadna z dostępnych dzisiaj konstrukcji nie uwzględnia możliwości odwadniania miodu w stanie półpłynnym (częściowo skryształizowanym). Tymczasem w wyniku krystalizacji następuje wzrost aktywności wody w miodzie i tym samym wodę można łatwiej z niego usunąć [1]. Wynika to głównie z problemów związanych z transportem (pompowaniem) zawiesiny krystalicznej z opakowania magazynowego do urządzenia odwadniającego. Miód należy do płynów o złożonych właściwościach reologicznych [2]. W stanie płynnym jest zaliczany do płynów newtonowskich a jego lepkość zależy głównie od temperatury i zawartości wody, zaś w postaci zawiesiny krystalicznej należy do płynów nie-newtonowskich, pseudoplastycznych rozrzedzanych ścinaniem [2, 4]. Obecne w miodzie kryształy podczas przetłaczania powodują blokowanie większości konstrukcji pomp wyporowych. Jest to wynik gromadzenia się fazy stałej w szczelinach pomiędzy elementami roboczymi a obudową, a także między wirującymi rotorami. Wzrost lepkości przetłaczanego medium wpływa na zmniejszenie sprawności, wysokości podnoszenia i wydajności pompy a w efekcie na znaczący wzrost poboru mocy.

Stwierdzone słabości istniejących na rynku urządzeń do odwadniania miodu stały się przyczynkiem do opracowania własnej oryginalnej konstrukcji, która ma charakter mobilny, nie wymaga dodatkowych zbiorników – montowana jest na opakowanie magazynowe (beczkę) oraz umożliwia zagęszczanie miodu półpłynnego. Uzyskała ona patent nr PL218759B1 pod nazwą „urządzenie do zagęszczania miodu w stanie płynnym lub półpłynnym” [3]. Głównym zespołem tego urządzenia zapewniającym wysoką efektywność pracy jest komora, w której dochodzi do kontaktu spływającego miodu z wirującym powietrzem. Z konieczności miniaturyzacji konstrukcji i maksymalizacji procesu wymiany masy zastosowano analogicznie, jak w cyklonach, wirową komorę odwadniającą, w której powietrze przepływa w warunkach turbulentnych a struga powietrza jest dodatkowo zawirowana.

Celem artykułu jest przedstawienie oryginalnej budowy urządzenia do niskotemperaturowego odwadniania (zagęszczania) miodu opartej na patencie nr PL218759B1 oraz szczegółowej analizy wpływu rozwiązania konstrukcyjnego i parametrów pracy komory osuszania miodu

(będącej głównym zespołem konstrukcji) na wydajność odwadniania. Zaprezentowano wyniki badań wpływu parametrów konstrukcyjnych oraz procesowych na charakterystykę przepływu powietrza przez komorę roboczą wraz z modelem CAD komory roboczej i przeprowadzonymi symulacjami CFD przepływu przy różnych warunkach początkowych. Uzyskane z symulacji wyniki porównano z pomiarami empirycznymi przepływu powietrza wykonanymi w warunkach rzeczywistych w powstałej konstrukcji wraz z wyznaczeniem uzyskanego błędu między dwoma metodami. Wyznaczono również masową wydajność odwadniania miodu płynnego w prototypie urządzenia z dwoma wariantami rozwiązania komory osuszającej.

METODYKA BADAWCZA

Opis urządzenia do odwadniania miodu przeprowadzono w oparciu o schemat konstrukcyjny uwzględniający wszystkie zespoły robocze i stanowiący odwzorowanie rzeczywistej konstrukcji. Dodatkowo zamieszczono rzeczywisty wygląd powstałej konstrukcji, która ma charakter prototypowy. Na fotografii zaznaczono poszczególne zespoły urządzenia oraz uwidoczniono aparaturę pomiarową zastosowaną w trakcie wykonywania doświadczeń.

Badania procesów przepływowych w komorze osuszającej składały się z trzech etapów. W pierwszym dokonano symulacji przepływu powietrza przez komorę osuszania urządzenia. Analizy symulacyjne przeprowadzono przy wykorzystaniu narzędzi numerycznej mechaniki płynów CFD zaimplementowanych z pakietu SolidWorks. Wyznaczono trajektorie ruchu cząsteczek powietrza i rozkłady prędkości w komorze. Niemniej pierwszym krokiem analizy numerycznej przepływu było stworzenie modelu geometrycznego (CAD) komory. Model ten został zaprojektowany w pakiecie SolidWorks 2013. Analizę wykonano zgodnie z poniższą procedurą:

1. Wygenerowano siatkę obliczeniową składającą się z 21680 elementów.
2. Określono wejścia i wyjścia do modelu – króciec dolny stanowił wejście strugi powietrza do modelu zaś króciec górny wyjście.
3. Przyjęto wartości prędkości przepływu powietrza ($5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) oraz jego parametry fizyczne (temperatury 25°C i gęstości $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, wilgotność względna 30%) na wejściu do modelu – w przekroju poprzecznym króćca dolnego.
4. Ustalono na podstawie badań empirycznych wartość ciśnienia na wyjściu z modelu wynoszącą 950-980 hPa.
5. Przeprowadzono symulację przepływu strugi powietrza przez komorę osuszania w oparciu o zaimplementowany w środowisku FlowWorks model k-ε:
 - ▶ intensywność turbulencji wyznaczono ze wzoru 3:

$$I_t = \frac{1}{U_{ir}} \sqrt{\frac{2}{3} k_\epsilon} \quad (1)$$

- ▶ Kinematyczną energię turbulencji k_ϵ wyznaczono na podstawie pomiarów eksperymentalnych rozkładu prędkości powietrza przy wykorzystaniu przenośnego termo-anemo-manometru MP200 wyposażonego

w rurkę Pitota w przekroju króćca wlotowego z zależności [8]:

$$k_\varepsilon = \frac{1}{2} (U_x^2 + U_y^2 + U_z^2), \quad (2)$$

gdzie: U_{sr} – średnia prędkość liniowa przepływu powietrza [$m \cdot s^{-1}$];

U_x, U_y, U_z – prędkość przepływu powietrza w przekroju króćca wlotowego wyznaczona eksperymentalnie dla kierunków x, y, z w prototypie komory osuszania [$m \cdot s^{-1}$];

► skala długości wyznaczona została z równania [5, 6]:

$$L = 0,07D_h, \quad (3)$$

gdzie: $D_h = 4 \frac{F}{B}$ [m] – średnica zastępcza dla przepływu strugi przez przekrój inny niż kołowy: B – obwód zwilżany strugi [m], F – pole przekroju strugi [m^2]. Warunki brzegowe w otworze wlotowym przyjęto w postaci w pełni rozwiniętego przepływu w przewodzie.

6. Wyznaczono rozkład prędkości przepływu w przekroju poprzecznym króćca wlotowego, w płaszczyźnie przekroju wzdłużnego (symetralnej) komory oraz w płaszczyźnie przekroju poprzecznego komory na wysokości symetralnej płaszczyzny króćca wlotowego i wylotowego.

7. Wyznaczono trajektorię strugi w komorze.

W drugim etapie skonstruowano komorę roboczą w oparciu o wcześniej stworzony model CAD i przeprowadzono badania empiryczne charakterystyk przepływu powietrza przez tą konstrukcję. Przy badaniach empirycznych zastosowano analogiczne parametry wejściowe jak w badaniach numerycznych: temperatura przepływającego powietrza $T=25^\circ C$, prędkość przepływu $5 m s^{-1}$ i $10 m s^{-1}$. Pomiar prędkości przepływu powietrza realizowano za pomocą przenośnego termo-anemo-manometru MP200 wyposażonego w rurkę Pitota. Pomiary wyznaczono w przekroju króćca wlotowego i wylotowego komory osuszania w punktach równomiernie rozłożonych na przekroju oraz w płaszczyźnie symetralnej komory w punktach rozłożonych równomiernie na przekroju (rys. 4). Wyznaczenie liczby Reynoldsa dla przepływu powietrza przez komorę osuszania przeprowadzono w oparciu o uzyskane wyniki pomiarów rozkładu prędkości w przekroju króćca wylotowego z równania:

$$Re = \frac{U_{EXPsr} D_h}{\nu}, \quad (4)$$

gdzie: ν – lepkość kinematyczna powietrza dla temperatury analiz [$m^2 \cdot s^{-1}$];

U_{EXPsr} – średnia prędkość przepływu powietrza w danym przekroju określona eksperymentalnie [$m \cdot s^{-1}$].

W trzecim etapie przeprowadzono badania wpływu usytuowania powierzchni splywu miodu na wydajność odwadniania miodu w postaci płynnej. Badania konstrukcji prototypowej realizowano w dwóch różnych wariantach konstrukcji komory osuszania:

- Wariant 1 – komora prosta ze splywem miodu po powierzchni zewnętrznej rury transportera ślimakowego (rys. 5a);
- Wariant 2 – komora ze splywem miodu po gładkiej powierzchni wewnętrznej komory osuszania (rys. 5b).

Materiał badawczy stanowił miód płynny wielokwiatowy o początkowej zawartości wody 24%. Pozostałe parametry procesu odwadniania przyjmowały następujące wartości:

- prędkość przepływu powietrza w króćcu wlotowym komory osuszania $v_{pl} = 2 m \cdot s^{-1}$ i $v_{pl} = 5 m \cdot s^{-1}$;
- początkowa masowa wydajność przetłaczania miodu $\dot{m} = 180 kg h^{-1}$;
- temperatura miodu $T_{m1} = 25^\circ C$ i $T_{m2} = 30^\circ C$;
- temperatura powietrza $T_{p1} = 30^\circ C$ i $T_{p1} = 35^\circ C$.

Badania empiryczne prowadzono w przedziale czasu wynoszącym 8h dla każdej z konstrukcji komory osuszania. Średnią wydajność masową odwadniania miodu określono dzieląc masę skroplin m_{skr} uzyskanych w trakcie procesu odwadniania przez czas prowadzenia tego procesu t_n :

$$\dot{m}_w = \frac{m_{skr}}{t_n}. \quad (5)$$

Uzyskane wyniki pomiarów empirycznych porównano z wynikami uzyskanymi w symulacji numerycznej. Ocenę stopnia dopasowania uzyskanych danych numerycznych do danych eksperymentalnych przeprowadzono na podstawie zależności (15):

$$E_{CFD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{||u_{CFD}^i| - |u_{EXP}^i||}{|u_{EXP}^i|} 100\%, \quad (6)$$

gdzie: E_{CFD} – błąd numerycznego modelowania [%];

u_{EXP}^i – wyniki pomiarów parametrów przepływu w i -tym punkcie modelu;

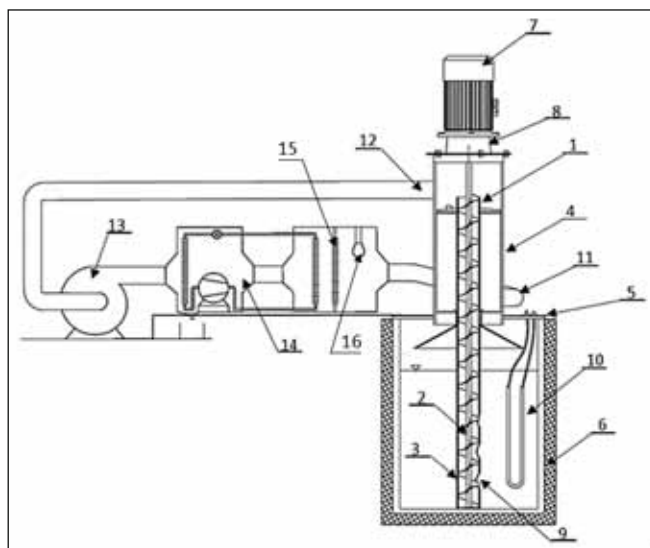
u_{CFD}^i – wyniki symulacji parametrów przepływu w i -tym punkcie modelu.

Błędy pomiarów bezpośrednich MPE obliczono metodą różniczki zupełnej.

KONSTRUKCJA URZĄDZENIA

Na rys. 1 przedstawiono schemat konstrukcji urządzenia do zagęszczania miodu opartego na patencie nr PL218759B1, które było przedmiotem badań w poniższej pracy a na rys. 2 fotografię prototypu tego urządzenia. Jest ono montowane na standardowym opakowaniu magazynowym – beczce z miodem (o objętości 200 litrów) i umożliwia prowadzenie procesu odwadniania w obiegu zamkniętym powietrza. Urządzenie składa się ze ślimakowego układu transportowego 1 składającego się z rury transportowej 3 i ślimaka 2. Ślimak transportuje miód z beczki do komory osuszania 4 (najważniejszego zespołu konstrukcyjnego urządzenia), w której dochodzi do kontaktu splywającego po ścianie miodu z wirującym powietrzem osuszającym. Komora osuszania 4 przytwierdzona jest na trwale do pokrywy 5 standardowej beczki 6 do przechowywania miodu. Napęd ślimaka realizowany

jest za pomocą silnika 7 zamocowanego na komorze osuszającej na kołnierzu 8. Prędkość kątowna ślimaka regulowana jest falownikiem. Miód do transportera zasysany jest poprzez okrągłe otwory 9 znajdujące się w dolnej części rury transportowej 3, a wypływa górną krawędzią rury w komorze osuszania i splywa grawitacyjnie w dół komory do beczki. Dla potrzeb prowadzonych badań zastosowano elektryczny układ podgrzewający miód 10 a beczkę izolowano termicznie. Komora osuszania stanowi układ współosiowych cylindrów, do którego powietrze „suche” jest doprowadzane stycznie w dolnej części króćcem wlotowym 11 a wilgotne odpływa króćcem 12 poprzez zassanie wentylatorem 13. Następnie kierowane jest do układu osuszającego 14 będącego sprężarkowym agregatem chłodniczym. Najpierw następuje wykroplenie się pary wodnej z powietrza na parowniku a następnie jego podgrzanie w skraplaczu tego samego układu sprężarkowego. Do podgrzania powietrza do wymaganej temperatury procesu zastosowano dodatkową grzałkę 15. Powietrze jest sterylizowane za pomocą lampy UV 16. Na fotografii zamieszczonej na rys. 2 przedstawiono rzeczywisty wygląd prototypu urządzenia wraz z przyrządami pomiarowymi do pomiaru mocy i rejestracji wyników.



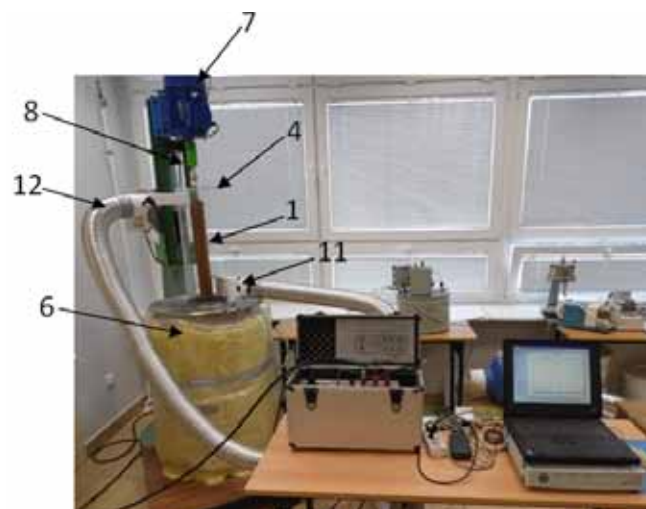
Rys. 1. Schemat konstrukcji oryginalnego urządzenia do zagęszczania miodu opartego na patencie nr PL218759B1.

Fig. 1. Diagram of the structure of the original honey dehydration device based on the patent No. PL218759B1.

Źródło: Opracowanie własne
Source: Own study

Konstrukcja komory osuszania została przedstawiona na rys. 3. Wykonana jest w postaci rury o średnicy zewnętrznej 0,2 m zamkniętej z jednej strony pokrywą z otworem na wał ślimaka, zaś z drugiej strony standardową pokrywą z beczki do przechowywania miodu. Na rys. 3a przedstawiony jest przekrój przez komorę, a na rys. 3b model CAD komory osuszania. Wysokość komory wynosi 0,5 m a w jej bocznej powierzchni znajdują się króćce wlotowy (stycznie) i wylotowy powietrza (środkowo). Króciec wlotowy ma kształt prostokątnego profilu zamkniętego o wymiarach $55 \times 110 \cdot 10^{-3}$ m i jest umiejscowiony w dolnej części komory. Przesunięcie króćca wlotowego względem płaszczyzny symetrycznej

komory zapewnia styczne ukierunkowanie strugi względem powierzchni komory oraz zawirowanie przepływu. Króciec wylotowy o wymiarach $55 \times 110 \cdot 10^{-3}$ m jest umiejscowiony u góry komory w płaszczyźnie symetrycznej. Do tego króćca podłączony jest przewód ssawny z wentylatora.

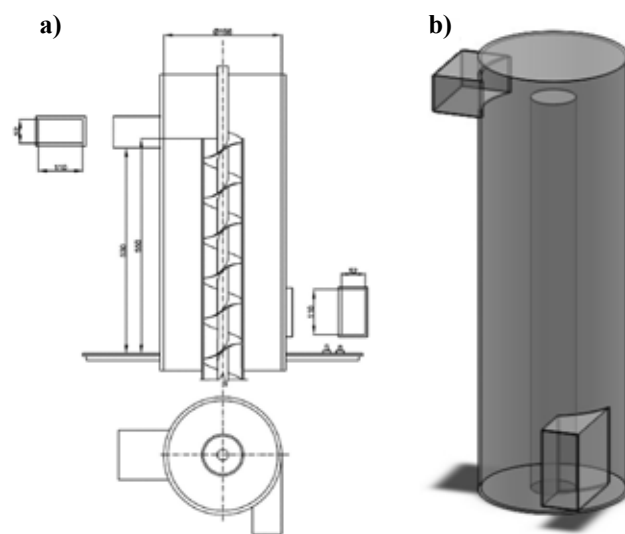


Rys. 2. Konstrukcja prototypu urządzenia do zagęszczania miodu w trakcie pracy.

Fig. 2. Construction of the prototype of the honey dehydration device during operation.

Źródło: Fot. K. Miastkowski

Source: Photo K. Miastkowski



Rys. 3. Schemat konstrukcji komory osuszania a) przekrój, b) model CAD.

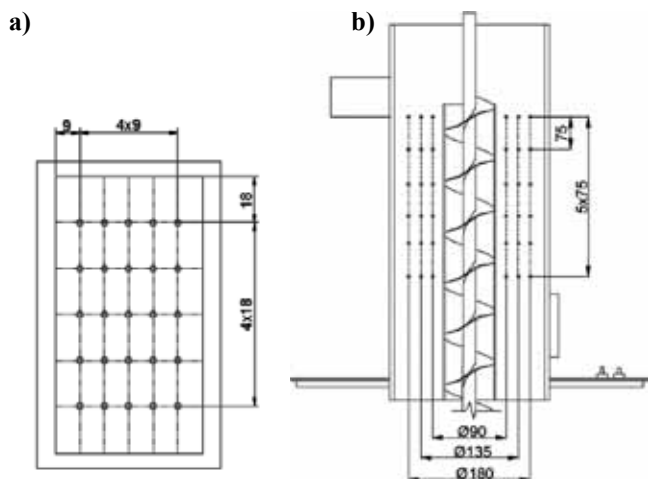
Fig. 3. Diagram of the dehydration chamber structure a) cross section, b) CAD model.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Rozmieszczenia punktów pomiaru prędkości przepływu powietrza w przekroju króćca wlotowego i w przekroju komory osuszającej przedstawiono na rys. 4.

Na rys. 5 przedstawiono dwa warianty rozwiązania konstrukcyjnego komory osuszającej. Pierwszy uzyskano poprzez spływ miodu po zewnętrznej powierzchni rury transportowej ślimaka. Drugi powstał w wyniku spływ miodu po powierzchni wewnętrznej rury zewnętrznej komory osuszającej.

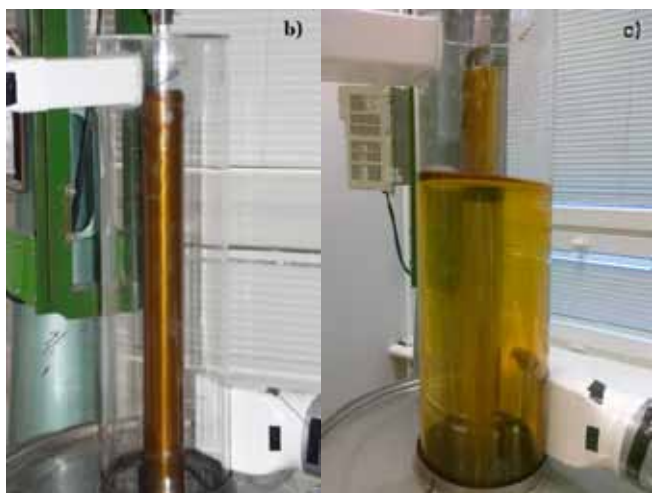


Rys. 4. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych: a) w przekroju króćca wlotowego, b) w przekroju komory.

Fig. 4. Diagram of distribution of measuring points: a) in the cross-section of the inlet connector, b) in the cross-section of the chamber.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study



Rys. 5. Warianty pracy komory osuszającej: a) sływ po róże wewnętrznej, b) sływ po róże zewnętrznej.

Fig. 5. Works of the dehydration chamber: a) flow down to internal roses, b) runoff for external roses.

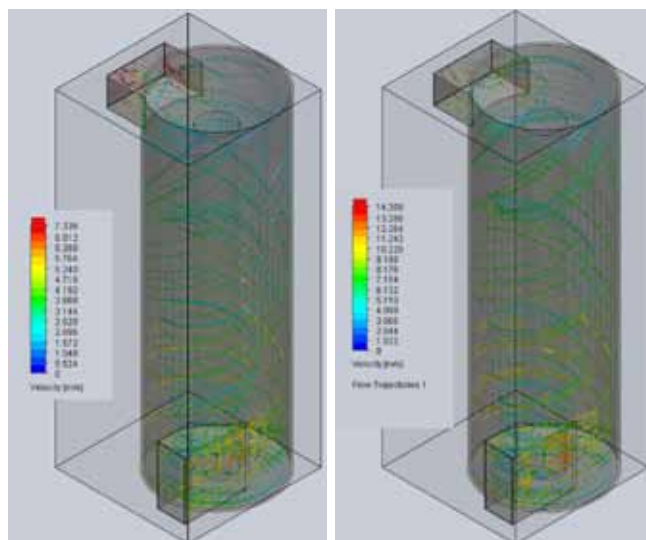
Źródło: Fot. K. Miastkowski

Source: Photo K. Miastkowski

WYNIKI BADAŃ

Na rys. 6 przedstawiono wyniki symulacji numerycznej trajektorii przepływu strugi powietrza przez komorę osuszania przy prędkości na wlocie do komory wynoszącej $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Uzyskane rezultaty pokazują wyraźny charakter wirowy przepływu powietrza z wyższymi prędkościami na wlocie do komory osuszania i na wylocie, gdzie uzyskano silny efekt zmieszania powietrza w strudze.

Analiza rozkładu prędkości przepływu powietrza w przekroju poprzecznym komory roboczej na wysokości króćca wlotowego została przedstawiona na rys. 7. Zgodnie z oczekiwaniami w osi komory prędkość przepływu powietrza jest znacząco niższa niż na obrzeżach komory. Występują przy



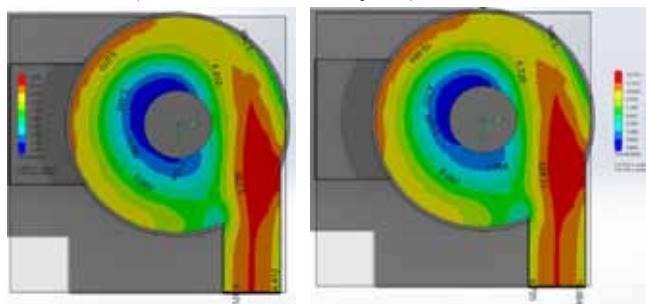
Rys. 6. Symulacja CFD trajektorii przepływu powietrza przez komorę roboczą dla prędkości na wlocie do komory a) $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i b) $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Fig. 6. CFD simulation of the air flow trajectory through the working chamber for velocity at the inlet to the chamber a) $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i b) $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

tym przestrzenie, w których wartość prędkości powietrza jest bliska zeru (niebieski obszar na rys. 7).



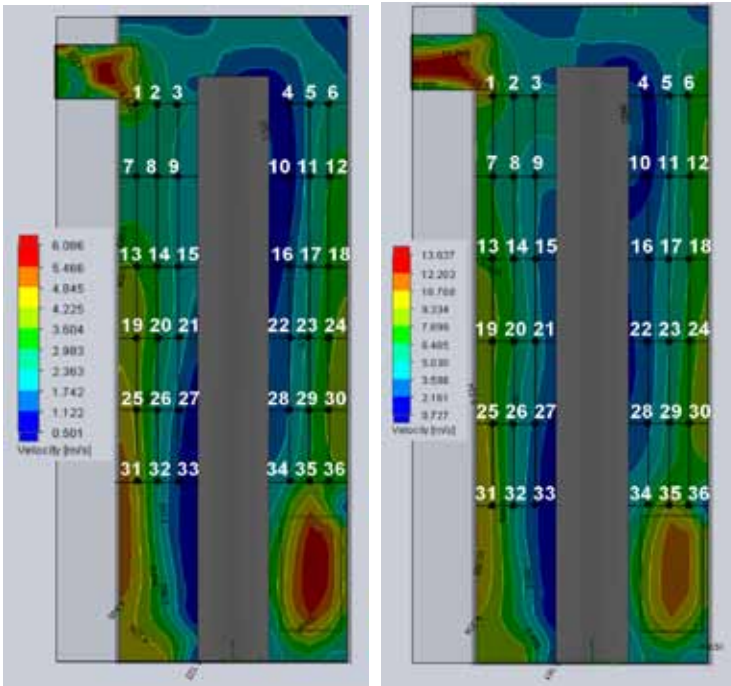
Rys. 7. Symulacja CFD rozkładu prędkości strugi powietrza w przekroju poprzecznym komory roboczej na wysokości króćca wlotowego dla prędkości powietrza na wlocie do komory a) $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i b) $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Fig. 7. CFD simulation of the velocity distribution of the air stream in the cross-section of the working chamber at the height of the inlet connection for the air velocity at the inlet to the chamber a) $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i b) $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Weryfikację uzyskanych wyników symulacji numerycznych prędkości przepływu powietrza przez komorę osuszania przeprowadzono poprzez porównanie ich wartości z wartościami zmierzonymi eksperymentalnie. Na rys. 8 i rys. 9 przedstawiono wyniki symulacji numerycznych z naniesionymi punktami pomiarowymi badań empirycznych. Wyniki porównania danych numerycznych i eksperymentalnych przedstawiono w tabeli 1 i tabeli 2. Porównanie to umożliwiło oszacowanie dokładności odwzorowania wyników symulacji przepływu strugi powietrza przez komorę osuszania.

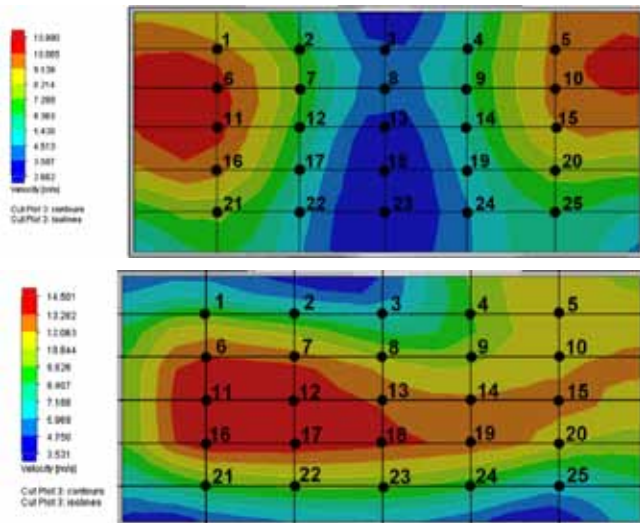


Rys. 8. Symulacja CFD rozkładu prędkości strugi powietrza w przekroju wzdłużnym komory roboczej dla prędkości powietrza na wlocie do komory a) $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i b) $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ z naniesionymi punktami pomiarów empirycznych.

Fig. 8. CFD simulation of the air stream velocity distribution in the longitudinal section of the working chamber for air velocity at the inlet to the chamber a) $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i b) $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ with empirical measurements points.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study



Rys. 9. Symulacja CFD rozkładu prędkości strugi powietrza w przekroju poprzecznym króćca wylotowego z komory roboczej dla prędkości powietrza na wlocie do komory a) $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i b) $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Fig. 9. CFD simulation of the air stream velocity distribution in the cross-section of the outlet nozzle from the working chamber for the air velocity at the inlet to the chamber a) $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i b) $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Pomiary empiryczne prędkości przepływu powietrza w płaszczyźnie symetrycznej komory osuszania pokazują, iż rozkład prędkości jest analogiczny, jak ten zaobserwowany przy symulacjach numerycznych (rys. 8). Wraz ze zwiększaniem się promienia komory rośnie prędkość przepływu powietrza przez komorę osuszania (rys. 8, tab. 1). Wyniki symulacji są wyższe od wyników pomiarów empirycznych, zaś średni błąd względny symulacji wynosi 27,09% przy analizach przepływu przez komorę z prędkością wlotową $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i 18,48% przy prędkości wlotowej powietrza do komory osuszania $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Pomiary empiryczne prędkości przepływu powietrza w przekroju króćca wylotowego (przy ustalonej prędkości przepływu powietrza na wlocie do komory osuszania) wykazały niższą wartość prędkości przepływu niż w przypadku symulacji numerycznej (tabela 2). Średnia prędkość przepływu powietrza w przekroju króćca wylotowego komory przy prędkości wlotowej $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wynosiła $5,83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ zaś prędkość uzyskana przy analizie numerycznej $6,66 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (rys. 9). Średni błąd pomiędzy wynikami pomiarów empirycznych i numerycznych wyniósł 12,88%. Podobnie w przypadku analizy przepływu powietrza przez komorę roboczą z prędkością wlotową $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ uzyskane wyniki empiryczne były niższe od wartości symulacji numerycznej, zaś błąd dopasowania wyniósł 15,45%.

Wartość liczby Reynoldsa przy przepływie powietrza przez przekrój króćca wylotowego z komory osuszania obliczona ze wzoru (4) dla prędkości przepływu powietrza $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na wlocie do komory wyniosła $Re_1=26437$. Po zwiększeniu prędkości przepływu powietrza na wlocie do komory do $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wartość liczby Reynoldsa wyniosła $Re_2=45120$. Uzyskane wartości liczb Reynoldsa wskazują, iż przepływ powietrza na wlocie z komory osuszania ma charakter turbulentny i umożliwia dobre wymieszanie strugi powietrza co jest bardzo istotne ze względu na realizację wykraplania wody. Wysoka wartość liczby Reynoldsa poprawia również warunki wymiany masy w komorze osuszania i intensyfikuje proces odwadniania miodu.

Powyższe wyniki miały charakter analiz wstępnych, które wizualizowały procesy przepływowe zachodzące w komorze osuszającej. Pozwoliły one na dokładną analizę zachodzących procesów, optymalizowanie rozwiązania konstrukcyjnego komory oraz dobór parametrów pracy urządzenia. W efekcie wypracowano dwa warianty konstrukcyjne rozwiązania przepływu w komorze osuszającej zaprezentowane wcześniej na fotografiach zamieszczonych na rys. 5. W tabeli 3 przedstawiono natomiast wyniki końcowe średniej wydajności odwadniania miodu w obu wariantach konstrukcyjnych komory osuszania prototypowego urządzenia do odwadniania miodu uzyskane przy różnych kombinacjach wartości głównych parametrów procesowych.

Najwyższą wydajność odwadniania uzyskano przy wariantcie 2 rozwiązania konstrukcyjnego komory osuszającej z przepływem powietrza z prędkością $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, temperaturze miodu 30°C i temperaturze powietrza osuszającego 35°C . Wartość ta była o ponad 34% wyższa od najniższej wartości wydajności odwadniania zarejestrowanej przy badaniu komory według wariantu nr 1. Wzrost temperatury miodu, prędkości przepływu powietrza i jego temperatury powodo-

Tabela 1. Wyniki symulacji numerycznych i pomiarów empirycznych prędkości przepływu powietrza przez komorę osuszania w płaszczyźnie symetrycznej

Table 1. Results of numerical simulations and empirical measurements of air flow velocity through the drying chamber in the symmetrical pl

Punkt pomiarowy	Prędkość powietrza na wlocie 5 m s ⁻¹				Prędkość powietrza na wlocie 10 m s ⁻¹			
	Symulacja	Pomiar		Błąd względny symulacji E _{CFD} [%]	Symulacja	Pomiar		Błąd względny symulacji E _{CFD} [%]
		U _{CFDsr} [m·s ⁻¹]	U _{EXPSr} [m·s ⁻¹]			MPE [%]	U _{CFDsr} [m·s ⁻¹]	
1	3,90	2,11	11,70	39,48	8,60	6,64	18,17	22,79
2	2,70	1,89	13,30	28,20	5,75	4,92	13,85	14,43
3	2,70	2,01	14,43	25,56	5,75	5,06	13,36	12,00
4	0,80	0,67	11,75	16,25	1,40	1,01	12,36	27,86
5	2,05	1,52	17,70	22,56	4,30	3,74	9,46	13,02
6	2,70	2,01	14,77	28,20	5,75	4,48	13,85	22,09
7	2,70	2,46	9,94	18,52	5,75	4,58	12,20	20,35
8	2,70	1,80	8,03	33,33	5,75	4,63	14,91	19,48
9	2,05	1,35	14,61	22,56	4,30	3,77	9,46	12,25
10	0,80	0,49	11,30	38,75	1,40	1,22	14,20	12,86
11	2,70	2,10	13,09	28,20	4,30	3,66	7,74	14,88
12	3,30	2,50	6,08	33,84	7,20	5,81	19,28	19,36
13	3,30	1,98	14,58	40,00	7,20	5,98	13,50	16,94
14	2,70	1,86	12,07	28,20	5,75	4,90	13,85	14,78
15	2,05	1,45	7,97	22,56	4,30	3,45	9,46	19,77
16	1,40	0,90	7,86	35,71	2,85	2,12	9,58	25,61
17	2,70	1,78	9,86	28,20	4,30	3,89	7,74	9,53
18	3,30	2,05	12,56	33,84	5,70	4,60	12,08	19,36
19	3,90	2,36	14,65	39,48	8,60	6,58	11,50	23,49
20	3,30	2,68	17,85	18,79	7,20	5,41	15,71	24,86
21	2,05	1,56	11,55	22,56	4,30	3,47	9,46	19,30
22	1,40	1,18	14,05	15,98	3,55	3,12	8,70	12,25
23	2,70	1,96	12,64	28,20	3,60	2,98	14,60	17,22
24	3,30	2,41	16,54	26,97	7,20	5,81	17,47	19,36
25	3,90	2,31	14,34	39,48	7,90	6,10	17,50	22,79
26	2,70	2,04	16,24	28,20	7,15	6,01	17,30	15,93
27	1,40	1,21	11,84	15,98	4,30	3,48	12,76	19,07
28	2,05	1,59	15,74	22,56	2,85	2,50	12,50	12,28
29	2,70	2,20	13,93	28,20	4,30	3,62	12,80	15,93
30	3,60	2,13	13,53	39,48	6,50	5,24	15,75	19,36
31	3,90	2,20	11,43	39,48	7,90	6,40	21,47	18,99
32	2,70	2,14	15,93	28,20	7,15	6,12	14,50	14,41
33	0,80	0,72	12,33	10,34	4,30	3,78	18,70	12,09
34	2,70	2,09	9,43	28,20	5,05	4,07	10,68	19,36
35	3,30	2,16	12,53	33,84	8,60	6,35	21,30	26,22
36	3,30	2,45	9,33	25,76	8,60	6,94	24,51	19,36
Średnia	2,66	1,90	13,21	27,09	5,74	4,64	14,37	18,48

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Tabela 2. Wyniki symulacji numerycznych i pomiarów empirycznych prędkości przepływu powietrza w przekroju poprzecznym króćca wylotowego z komory osuszania

Table 2. Results of numerical simulations and empirical measurements of air flow velocity in the cross-section of the outlet nozzle from the drying chamber

Punkt pomiarowy	Prędkość powietrza na wlocie 5 m s ⁻¹				Prędkość powietrza na wlocie 10 m s ⁻¹			
	Symulacja	Pomiar		Błąd względny symulacji E _{CFD} [%]	Symulacja	Pomiar		Błąd względny symulacji E _{CFD} [%]
	U _{CFDsr} [m·s ⁻¹]	U _{EXPsr} [m·s ⁻¹]	MPE [%]		U _{CFDsr} [m·s ⁻¹]	U _{EXPsr} [m·s ⁻¹]	MPE [%]	
1	9,60	8,45	12,04	11,98	9,00	7,89	13,42	12,33
2	6,85	5,89	13,01	14,01	7,80	6,98	10,37	10,50
3	4,05	3,25	8,02	19,75	6,55	5,96	9,75	9,00
4	5,90	5,12	15,60	13,22	9,00	7,92	8,67	12,00
5	9,60	8,59	14,56	10,52	11,45	9,87	9,79	13,80
6	10,55	9,10	19,61	13,75	12,70	10,59	9,75	16,63
7	6,85	5,78	13,01	15,62	12,70	11,01	7,97	13,31
8	4,15	3,47	8,38	16,39	10,20	8,82	10,89	13,50
9	5,90	5,25	15,26	11,02	10,20	8,96	11,02	12,16
10	9,60	8,39	14,50	12,63	11,45	9,68	11,85	15,46
11	10,55	9,23	16,56	12,51	13,90	11,38	9,33	18,13
12	6,85	6,02	10,39	12,12	13,90	12,30	9,58	11,51
13	3,15	2,48	5,13	21,27	12,85	11,23	12,10	12,61
14	5,90	5,33	11,41	9,66	12,85	10,25	10,54	20,23
15	8,65	7,67	21,69	11,38	12,85	10,39	10,26	19,14
16	9,85	8,54	12,50	13,25	13,90	12,70	11,29	8,63
17	5,90	5,43	15,26	8,00	13,90	10,25	11,01	26,26
18	3,15	2,89	6,47	8,25	13,90	11,56	11,69	16,83
19	4,95	4,56	6,44	7,88	12,85	10,87	12,00	15,41
20	7,75	6,96	11,67	10,25	11,45	9,49	8,94	17,12
21	7,75	7,02	19,55	9,42	9,00	7,78	9,54	13,56
22	4,95	3,98	15,59	19,60	10,20	8,48	8,64	16,86
23	3,15	2,78	10,25	11,75	10,20	8,79	10,00	13,82
24	4,05	3,36	6,41	17,04	9,00	7,85	9,94	12,78
25	6,85	6,12	9,47	10,66	6,50	5,92	12,26	8,88
Średnia	6,66	5,83	12,51	12,88	11,82	9,95	10,48	15,45

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

Tabela 3. Wyniki pomiarów średniej wydajności odwadniania miodu w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego komory osuszającej i wartości parametrów procesowych

Table 3. Results of measurements of the average honey dehydration capacity depending on the construction solution of the drying chamber and the values of the process parameters

Masowy przepływ miodu [kg h ⁻¹]	180							
	Prędkość przepływu powietrza [m s ⁻¹]				10			
	5		30		25		30	
	Temperatura miodu [°C]							
Temperatura powietrza [°C]								
30		35		30		35		
Wydajność odwadniania m _w [kg h ⁻¹] Wariant 1 komory osuszającej	0,087	0,105	0,119	0,141	0,169	0,195	0,179	0,193
Wydajność odwadniania m _w [kg h ⁻¹] Wariant 2 komory osuszającej	0,195	0,215	0,228	0,237	0,276	0,293	0,285	0,298

Źródło: Opracowanie własne

Source: Own study

wał wzrost wydajności odwadniania miodu w każdym z badanych przypadków realizacji procesu.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone symulacje numeryczne zweryfikowane empirycznie pozwoliły wypracować rozwiązanie konstrukcyjne komory osuszania w urządzeniu prototypowym do odwadniania miodu o znacznie większej efektywności od pierwotnie przyjętej konstrukcji. Wariant 2 komory osuszającej okazał się o ponad 60% efektywniejszy do Wariantu 1.

Analizy CFD stanowią skuteczne narzędzie inżynierskie przy projektowaniu konstrukcji urządzeń przepływowych. Średni błąd numerycznego modelowania w analizowanych przypadkach wynosił od 12,88% do 27,09%. Analizy CFD pozwalają na optymalizację konstrukcji z jednoczesną wizualizacją zachodzących procesów. Umożliwia to skrócenie czasu uzyskania wyników oraz obniża znacznie koszty opracowania nowych konstrukcji.

Efektem końcowym pracy jest korekta pierwotnego pomysłu konstrukcyjnego i wypracowanie oryginalnego rozwiązania urządzenia do osuszania miodu, które ma szereg zalet w stosunku do urządzeń obecnie wykorzystywanych. Autorzy mają nadzieję, że będzie ono efektywnie wykorzystywane w gospodarstwach pszczelarskich umożliwiając uzyskanie miodów odmianowych o wyższej jakości.

LITERATURA

- [1] **BAKIER S. 2007a.** „Influence of glucose changes on water activity in selected honeys”. *Acta Agrophysica* 9(1): 7-19.
- [2] **BAKIER S. 2007b.** „Influence of temperature and water content on the rheological properties of polish honeys”. *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, Vol57, No2(A): 17-23.
- [3] **BAKIER S., K. MIASTKOWSKI. 2015.** Urządzenie do zagęszczania miodu w stanie płynnym lub półpłynnym. Patent PL 218759B1.
- [4] **BAKIER S., K. MIASTKOWSKI, J. R. BAKONIUK. 2016.** „Rheological properties of some honeys in liquefied and crystallised state”. *J. Apic. Sci.* vol 61 no 2:127-140.
- [5] **BRANNY M., J. SZMYD, M. JASZCZUR, R. NOWAK, W. FILIPEK, W. WODZIAK. 2013.** „Badania modelowe przepływu w strefie przodkowej wyrobiska z wentylacją lutniową”. *Górnictwo i Geologia* T8, z3.
- [6] **ELSNER J. 1987.** Turbulencja przepływów. Warszawa: PWN.
- [7] **GILL R. S., V. S. HANS, S. SINGH, P. P.SINGH, S. S. DHALIWAL. 2015.** “A small scale honey dehydrator”. *J Food Sci Technol* 52(10): 6695-6702.
- [8] **JĘDRAL W. 2007.** Efektywność energetyczna pomp i instalacji pompowych, Warszawa: Krajowa Agencja Poszanowania Energii SA.
- [9] **KĘDZIA B., E. HOŁDERNA-KĘDZIA 2008.** Miód. Skład i właściwości biologiczne. Warszawa: Przedsiębiorstwo Wydawnicze Rzeczpospolite SA.
- [10] **LIPSKA B. 2006.** Kontrola jakości numerycznego modelowania przepływu powietrza w pomieszczeniach wentylowanych. Gliwice: Politechnika Śląska, Zeszyty naukowe nr 1718,
- [11] **MALCOLM T. SANFORD. 2003.** Moisture in Honey. Entomology and Nematology Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. ENY130.
- [12] **PATENT FR2645042, 1989.** Concentrateur en couches minces dans gaz neutre ur air deshydratate pour produits visqueux et sensible.
- [13] **PATENT PCT/FR2010/051499. 2010.** Device for dehumidifying food products such as honey.
- [14] **SEMKIW P., W. SKOWRONEK, P. SKUBIDA. 2008.** „Changes in water content of honey during ripening under controlled condition”. *Journal of Apicultural Science* Vol. 52 No. 1: 57-63.
- [15] **TOSI E., M. CIAPPINI, E. RÉ, H. LUCERO. 2002.** „Honey thermal treatment effects on hydroxymethylfurfural content”. *Food Chemistry* 77: 71-74.
- [16] **UNITED STATES PATENT 2693420. 1953.** Solidified honey product and process for making the same.
- [17] **UNITED STATES PATENT 3483032. 1969.** Method of drying sugar-containing materials.
- [18] **UNITED STATES PATENT 3718484. 1970.** Solidified product from high fructose corn syrup and process for the preparation thereof.
- [19] **UNITED STATES PATENT 3879567. 1975.** Method of preparing a dried honey tablet.
- [20] **UNITED STATES PATENT 4472450. 1984.** Removing water from honey at ambient pressure.
- [21] **UNITED STATES PATENT 4763572. 1988.** Apparatus for removing moisture from honey.
- [22] **UNITED STATES PATENT 5356650. 1994.** Process for producing solid honey.
- [23] [Http://www.frenchbeefarm.com/drying_down_honey.html](http://www.frenchbeefarm.com/drying_down_honey.html) (data odwiedzin 22,01,2018)