

BADANIA NAD ZASTOSOWANIEM FILTRÓW SILIKAŻELOWYCH  
W PROCESACH SUSZENIA MATERIAŁÓW CZYNNYCH BIOLOGICZNIE

Michał Kłębukowski, Zenon Katewicz

Instytut Maszyn i Urządzeń Rolniczych ART w Olsztynie

W przemyśle rolno-spożywczym czynnikiem suszącym jest wyłącznie powietrze ze względu na bezpośredni kontakt z surowcem i produktem finalnym.

Tradycyjne metody suszenia produktów spożywczych płynnych metodą rozpyłową zalecają zastosowanie jako czynnika suszącego powietrza ogrzanego do temperatur rzędu 120-180°C. Przez podniesienie temperatury powietrza osiąga się obniżenie wartości wilgotności względnej, a tym samym zwiększa się chłonność powietrza, co daje w efekcie poprawę przebiegu procesu suszenia.

Jednakże prowadzenie procesu suszenia w podwyższonych temperaturach może powodować nieodwracalne zmiany w produkcie poddawanych suszeniu obniżając jego wartość. Dotyczy to szczególnie materiałów wrażliwych na działanie podwyższonych temperatur, jak mleko, preparaty białkowe, preparaty enzymatyczne, odżywki, preparaty witaminowe. Zachodzi więc konieczność obniżenia w możliwie największym stopniu zawartości wilgoci w powietrzu przed wprowadzeniem go do komory suszarniczej, co pozwoli na prowadzenie procesu suszenia w temperaturach niższych od obecnie stosowanych z zachowaniem tej samej wydajności.

Jako najbardziej godną uwagi metodę osuszania powietrza przyjęto adsorpcyjne usuwanie wilgoci stosując jako adsorbent żel krzemionkowy (silikażel). Głównym kryterium tego wyboru były własności adsorbenta (nieagresywny chemicznie, fizjologicznie obojętny, możliwość wielokrotnego użycia po regeneracji).

Cykl badań podzielono na dwie części:

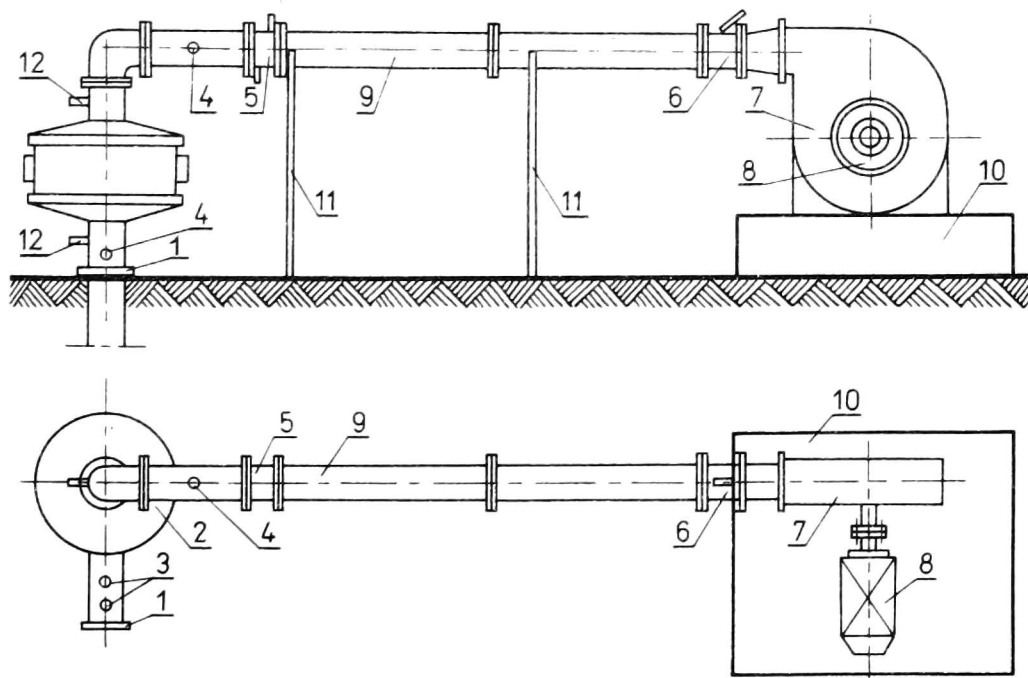
- określenie dynamiki adsorpcji wilgoci na żelu krzemionkowym,
- badania obejmujące próby zastosowania filtrów żelowych do usuwania wilgoci z powietrza w trakcie suszenia materiałów wrażliwych na działanie podwyższonych temperatur.

Próbie określenia dynamiki adsorpcji wilgoci na żelu krzemionkowym podjęto na laboratoryjnym stanowisku badawczym własnej konstrukcji (rys. 1) używając jako wkładu filtru żelu krzemionkowego średnioporowatego produkcji Inowrocławskich Zakładów Sodowych. Pobrane z otoczenia powietrze podawane jest wentylatorem poprzez przewód o średnicy  $10^{-1}$  m na filtr osuszający z wymiennym wkładem. W filtrze zostaje ono osuszone drogą adsorpcji i przewodem zostaje przetłoczone do komory suszarniczej. Pomiarzy prowadzone na stanowisku badawczym dotyczyły następujących parametrów:

- temperatura powietrza  
na wlocie do stanowiska badawczego,  
na wylocie z filtru,
- wilgotność powietrza  
na wlocie do stanowiska badawczego,  
na wylocie z filtru,
- natężenie przepływu powietrza przez filtr,
- opory przepływu stawiane przez warstwę żelu.

Pomiarów temperatury dokonywano za pomocą platynowych oporowych czujników temperatury Top E4 współpracujących z rejestratorem elektrycznym typu NSK.

Wilgotność powietrza określano metodą psychrometryczną.



Rys. 1. Stanowisko badawcze do określania dynamiki adsorpcji wilgoci z powietrza na żelu krzemionkowym: 1 - wylot powietrza, 2 - puszka filtru, 3 - punkty pomiaru wilgotności powietrza, 4 - punkty pomiaru temperatury powietrza, 5 - kryza pomiarowa, 6 - przepustnica, 7 - wentylator, 8 - silnik elektryczny, 9 - przewód powietrzny, 10 - podstawa, 11 - podpora, 12 - króćce pomiarowe

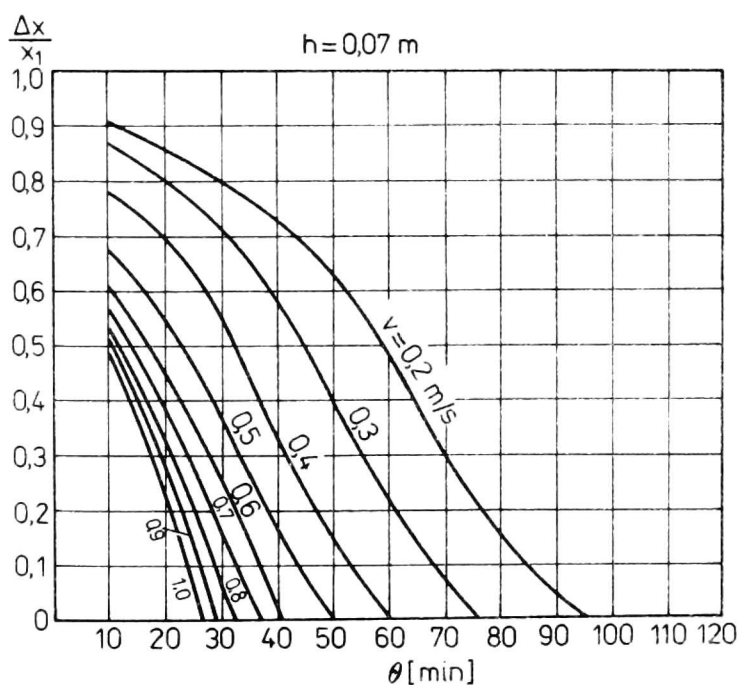
Do pomiaru natężenia przepływu powietrza wykorzystano metodę zwężkową posługując się kryzą ISA ze szczelinowym pomiarem ciśnienia oraz mikromanometrami kompensacyjnymi MK-1. Dynamikę adsorpcji wilgoci z powietrza na żelu krzemionkowym badano dla trzech różnych grubości złoża sorbenta:

$$h_1 = 0,21 \text{ m}; \quad h_2 = 0,14 \text{ m}; \quad h_3 = 0,07 \text{ m}$$

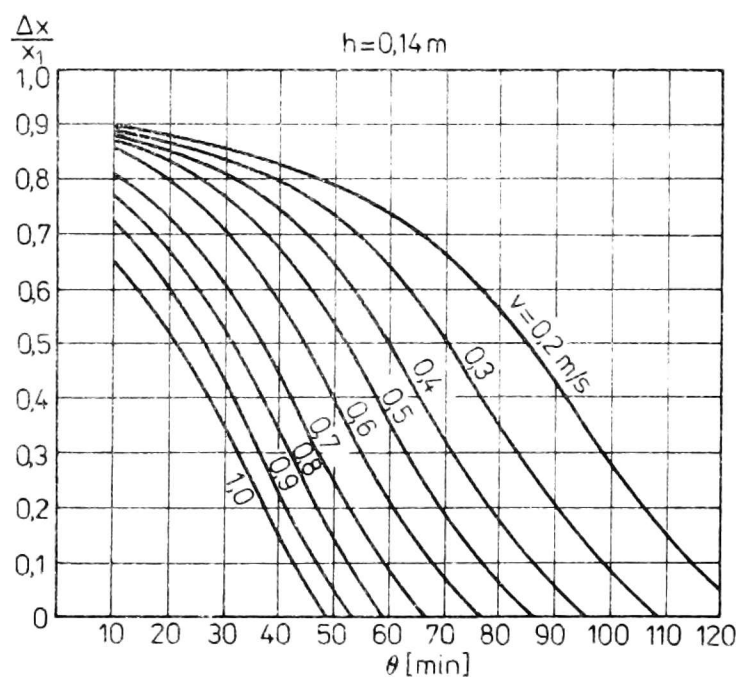
oraz dla różnych pozornych prędkości przepływu powietrza przez złożo:

$$V_1 = 0,2 \text{ m/s}; \quad V_2 = 0,3 \text{ m/s}; \quad \dots \quad V_9 = 1,0 \text{ m/s}.$$

Po określeniu wilgotności bezwzględnej powietrza atmosferycznego ( $x_1$ ) oraz powietrza osuszonego ( $x_2$ ) obliczono względny uby-



Rys. 2. Wykres zależności  $\frac{\Delta x}{x_1} = f(\theta)$



Rys. 3. Wykres zależności  $\frac{\Delta x}{x_1} = f(\theta)$

tek wilgoci z powietrza po jego przejściu przez złożo żelu  $\Delta x/x_1$ , gdzie  $\Delta x = x_1 - x_2$ .

W ten sposób uzyskano obraz zmian ubytku wilgoci z powietrza w czasie jego przepływu przez złożo żelu. Na podstawie uzyskanych danych sporządzono wykresy (rys. 2, 3, 4) zależności względnego ubytku wilgoci z powietrza od czasu trwania procesu osuszania na złożu żelu o różnych wysokościach warstwy. Uzyskano więc graficzny obraz zależności

$$\Delta x/x_1 = f(\theta) \tag{1}$$

gdzie:

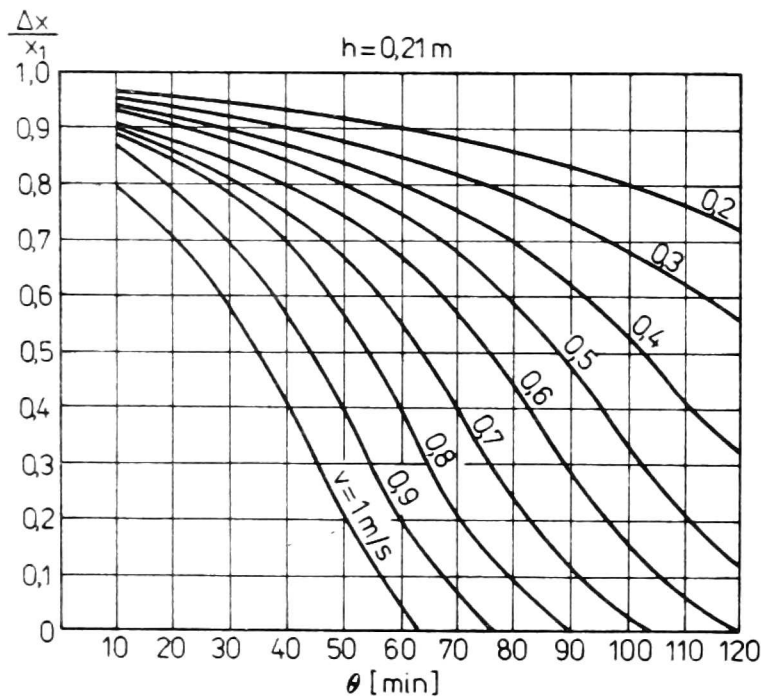
$\Delta x/x_1$  - względny ubytek wilgoci z powietrza

$\theta$  - czas trwania procesu osuszania powietrza.

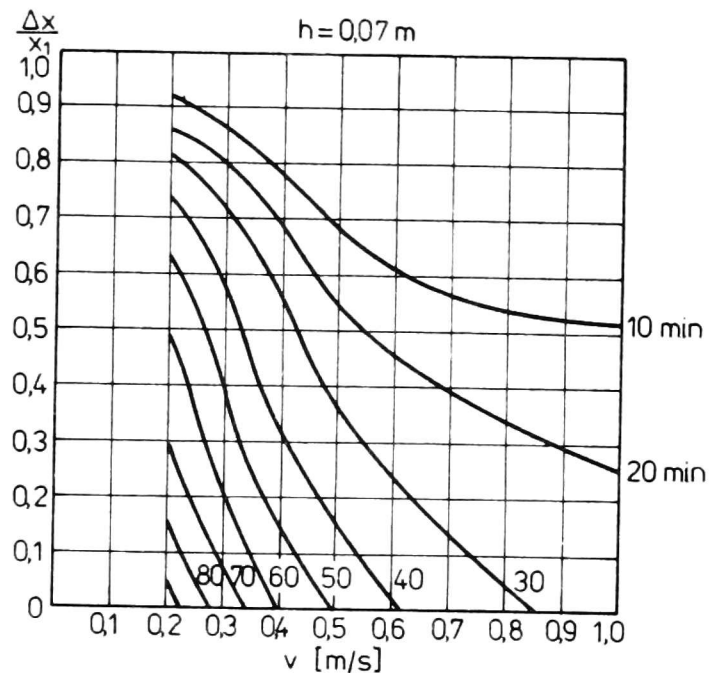
W toku dalszej analizy uzyskanych wyników starano się dokonać wyboru odpowiedniej formuły matematycznej odzwierciedlającej tę zależność. Uzyskane własności funkcji oraz kształt krzywych na wykresach sugerują, iż zależność ta jest funkcją wykładniczą [6]

$$\Delta x/x_1 = a e^{b\theta}. \quad (2)$$

Przeprowadzono ocenę wartości parametrów równania dla różnych wysokości warstwy żelu oraz różnych prędkości przepływu powietrza



Rys. 4. Wykres zależności  $\frac{\Delta x}{x_1} = f(\theta)$



Rys. 5. Wykres zależności  $\frac{\Delta x}{x_1} = \varphi(v)$

przez warstwę. Otrzymano szereg równań wykładniczych odzwierciedlających tę zależność (tab. 1). Wartości obliczonych współczynników determinacji wskazują, że aproksymacja za pomocą funkcji wykładniczej jest właściwa. Po odpowiednim przegrupowaniu wyników pomiarów przystąpiono do określenia charakteru zależności względnego ubytku wilgoci z powietrza od prędkości przepływu przez złożę żelu

$$x/x_1 = \varphi(v). \quad (3)$$

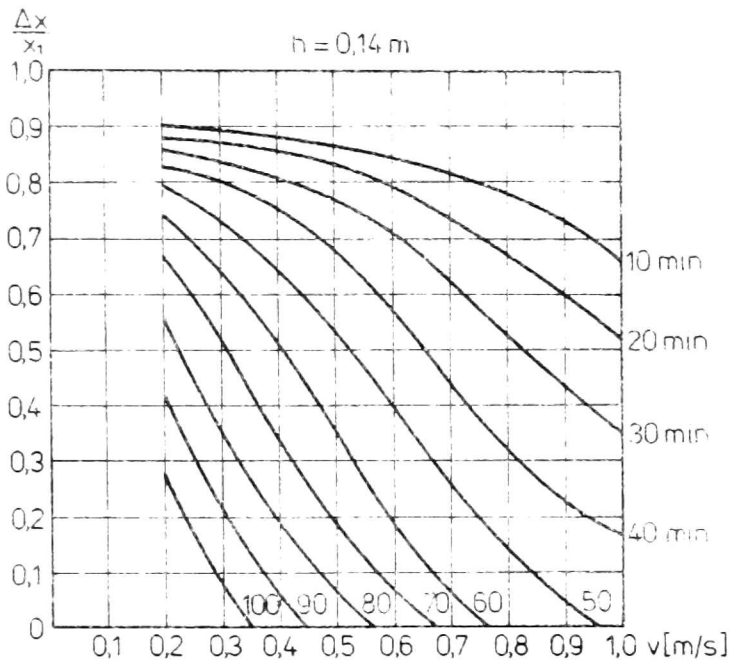
W wyniku tego postępowania uzyskano graficzny obraz zależności (rys. 5, 6, 7). Analogiczne jak poprzednio postępowanie doprowadziło do uzyskania szeregu równań o postaci ogólnej

$$\Delta x/x_1 = a_1 e^{b_1 v}. \quad (4)$$

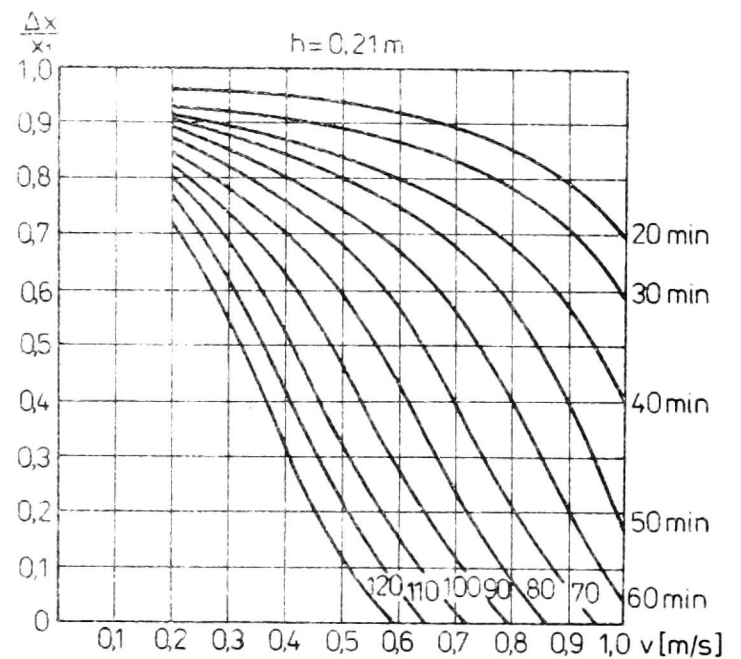
Obliczone parametry równania oraz współczynniki determinacji podano w tabeli 2.

Wartości współczynników równania  $\frac{\Delta x}{x_1} = ae^{b\theta}$  oraz współczynnika determinacji  $R^2$

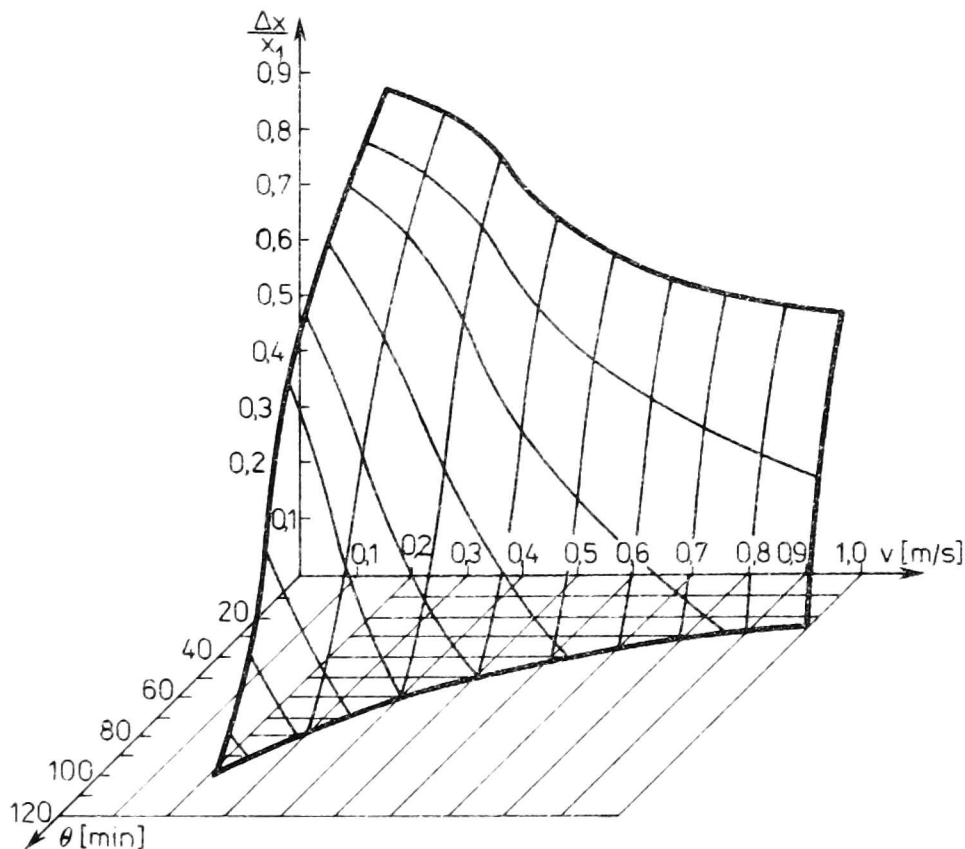
V m/s	h = 0,07 m			h = 0,14 m			h = 0,21		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
0,2	1,005	-0,0082	0,801	1,015	-0,0053	0,792	1,000	-0,002	0,867
0,3	1,005	-0,0125	0,818	1,010	-0,0073	0,810	1,000	-0,004	0,854
0,4	-	-	-	1,023	-0,010	0,837	1,0015	-0,0075	0,820
0,5	-	-	-	1,005	-0,0124	0,802	1,002	-0,008	0,795
0,6	-	-	-	-	-	-	1,009	-0,0085	0,813
0,7	-	-	-	-	-	-	1,005	-0,0105	0,820
0,8	-	-	-	-	-	-	1,010	-0,0125	0,805



Rys. 6. Wykres zależności  $\frac{\Delta x}{x_1} = \varphi(v)$



Rys. 7. Wykres zależności  $\frac{\Delta x}{x_1} = \varphi(v)$



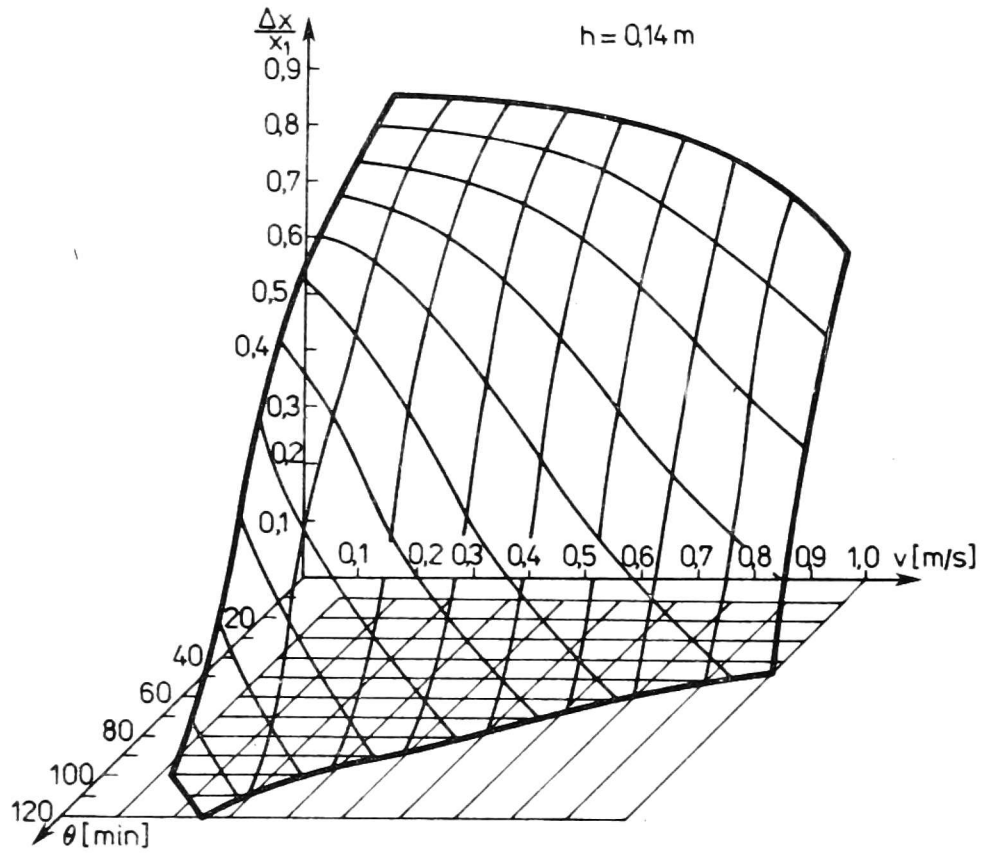
Rys. 8. Wykres zależności  $\frac{\Delta x}{x_1} = f(\theta, v)$

Przeprowadzona analiza pozwoliła na uzyskanie charakteru zależności względnego ubytku wilgoci z powietrza od prędkości przepływu przez złoże oraz od czasu trwania procesu osuszania dla różnych wydajności złoże. Graficzny obraz tej zależności przedstawiono na rys. 8, 9, 10. Chcąc uczynić łatwiejszym korzystanie z uzyskanych zależności poczyniono próbę sporządzenia nomogramu. W tym

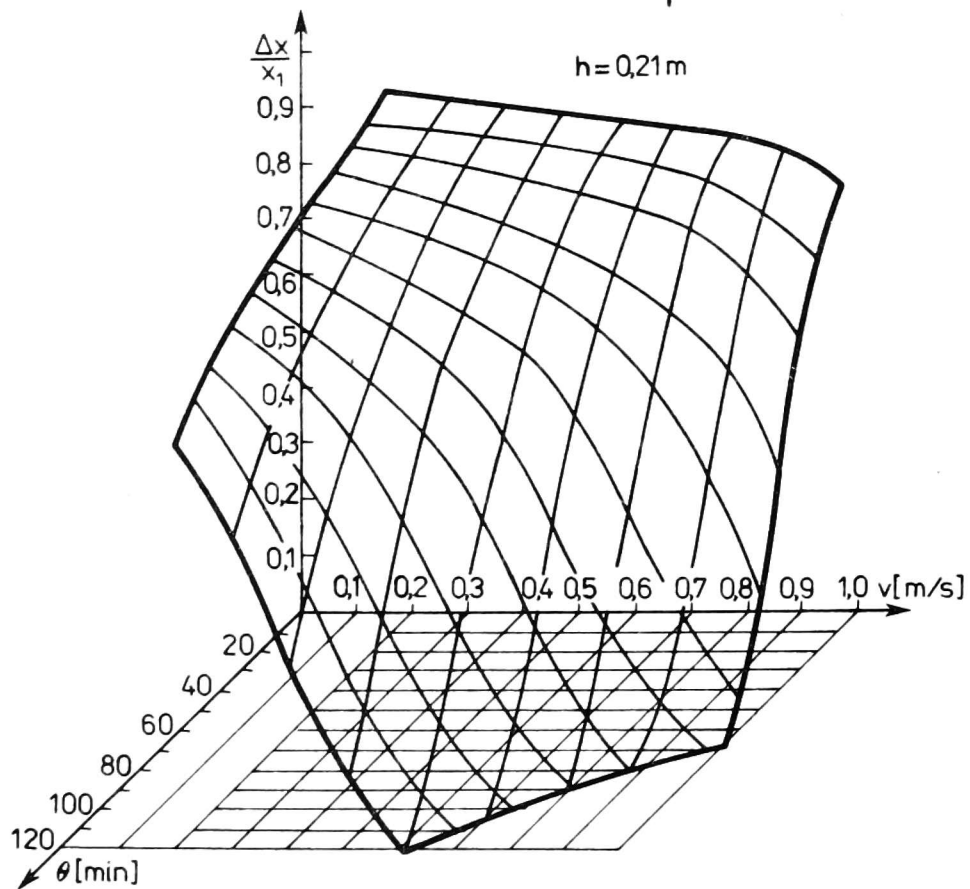
T a b e l a 2

Wartości współczynników  $\frac{\Delta x}{x_1} = a_1 e^{b_1 V}$  oraz współczynników determinacji  $R^2$

min	h = 0,07 m			h = 0,14 m			h = 0,21 m		
	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>
10	1,04	-0,564	0,854	1,01	-0,345	0,795	1,03	-0,125	0,845
20	1,10	-0,892	0,820	1,02	-0,85	0,801	1,012	-0,139	0,821
30	1,077	-1,696	0,833	1,115	-0,904	0,798	0,907	-0,242	0,805
40	-	-	-	1,045	-1,037	0,820	1,025	-0,472	0,798
50	-	-	-	-	-	-	1,08	-0,670	0,789
60	-	-	-	-	-	-	1,015	-0,889	0,804

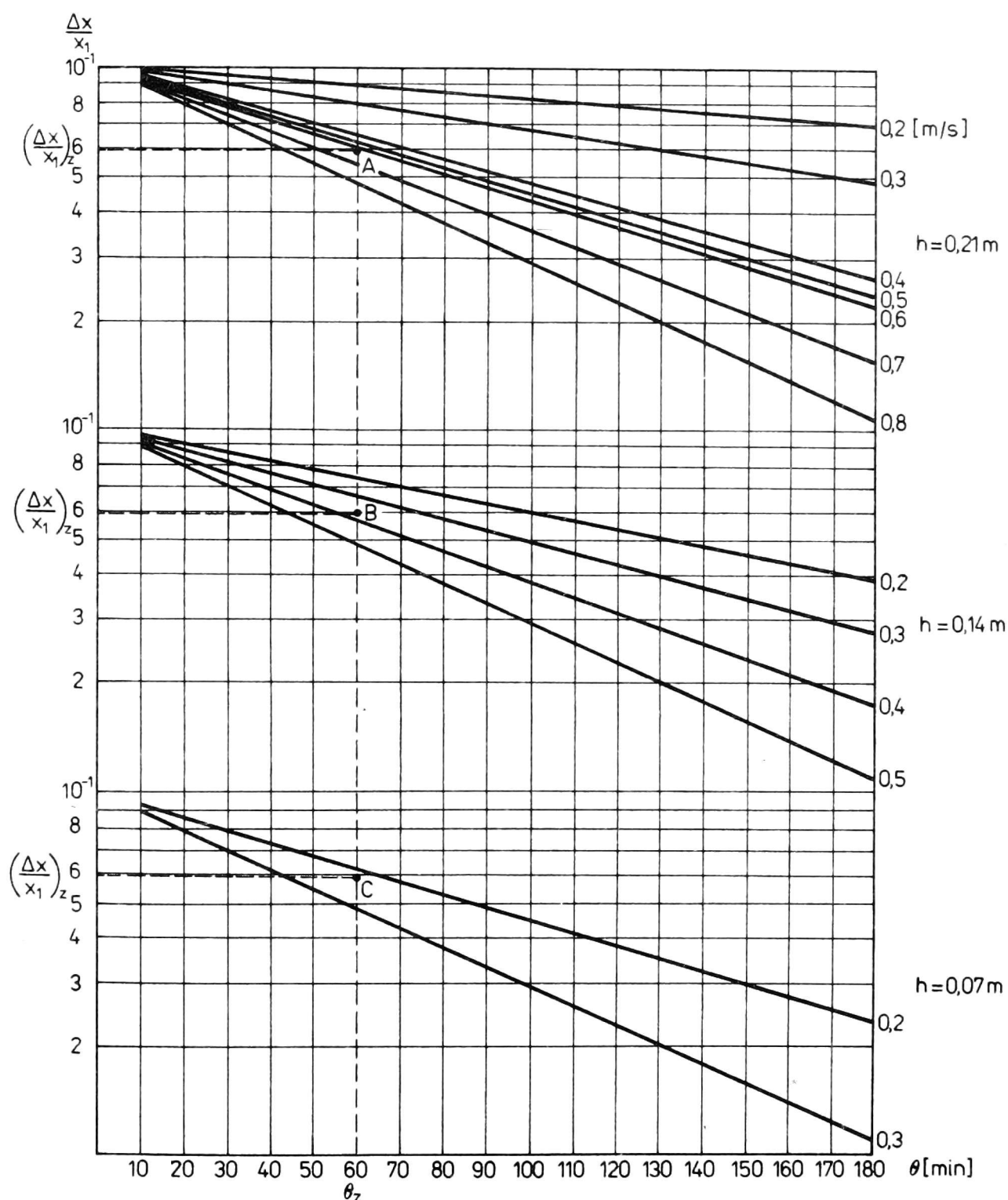


Rys. 9. Wykres zależności  $\frac{\Delta x}{x_1} = f(\theta, v)$



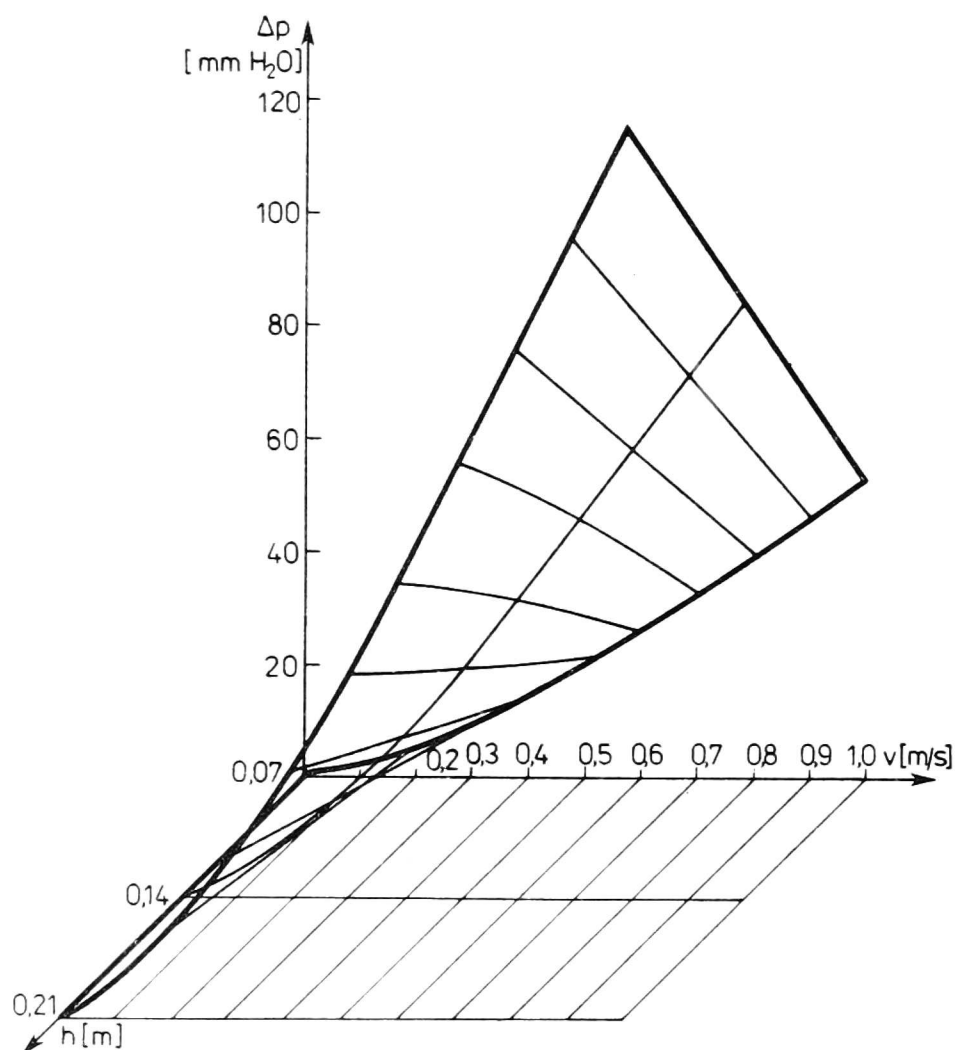
Rys. 10. Wykres zależności  $\frac{\Delta x}{x_1} = f(\theta, v)$





Rys. 11. Nomogram do określania parametrów konstrukcyjnych oraz parametrów pracy filtru żelowego

celu na siatce półlogarytmicznej (rys. 11) w oparciu o uzyskane równania sporządzono wykresy zależności  $\Delta x/x_1 = f(\theta)$  dla poszczególnych wysokości warstwy złoża. Otrzymano szereg linii prostych odpowiadających poszczególnym prędkościom przepływu powietrza przez złożo. Uzyskany w ten sposób nomogram pozwala z łatwością określić stopień osuszenia powietrza na złożu przy określonej grubości warstwy oraz przy zadanej prędkości przepływu po upływie określonego czasu. Nomogram ten pozwala na określenie parametrów konstrukcyjnych oraz parametrów pracy filtru w celu uzyskania żą-



Rys. 12. Wykres zależności  $\Delta p = \delta(v, h)$

danego stopnia osuszenia powietrza. Nomogram pozwala na uzyskanie trzech wariantów filtru pozwalających na przeprowadzenie zadanego procesu. Wybór odpowiedniego wariantu uzależniony jest od względów konstrukcyjnych (wymiary całego urządzenia) oraz przede wszystkim od wartości spadku ciśnienia w strumieniu gazu po przejściu przez warstwę adsorbenta ze względu na dobór wentylatora. Przyjmując powyższe kryterium przeprowadzono analizę oporów przepływu oraz grubości warstwy żelu. Uzyskano zależność, której obrazem graficznym jest wykres przedstawiony na rys. 12.

W toku analizy statystyczno-matematycznej uzyskano ogólną postać zależności

$$\Delta p = 224,54 h(v^2 + 2,657 v - 0,268) \quad (5)$$

gdzie:

$\Delta p$  - spadek ciśnienia na złożu  $\text{kG/m}^2$

$h$  - wysokość złoża  $\text{m}$

$v$  - prędkość przepływu powietrza  $\text{m/s}$

W literaturze przyjęto określać zależność  $p = f(v)$  równaniem

$$p = hkv^2$$

Uzyskane empiryczne równanie w sposób bardziej dokładny opisuje zależność dla warunków przeprowadzonych pomiarów (granulacji żelu i prędkości przepływu powietrza przez warstwę). Uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,825$ . W drugiej części badań przeprowadzono próbę zastosowania filtrów żelowych do osuszania powietrza w trakcie suszenia materiałów wrażliwych termicznie. Badania prowadzone były na laboratoryjnej suszarni rozpyłowej firmy Niro-Atomizer LTO BA 08 o wydajności  $8 \text{ dm}^3/\text{h}$ , przy czym na przewodzie doprowadzającym powietrze do wieży rozpyłowej zainstalowano filtr żelowy. W trakcie suszenia prowadzone były równoległe pomiary temperatury i wilgotności powietrza przed filtrem, po przejściu przez filtr, po przejściu przez nagrzewnicę oraz na wylocie z komory suszarniczej. Pomiarów dokonywano w sposób analogiczny jak w poprzednim etapie pracy. Ponadto przy każdym procesie suszenia dokonywano pomiaru temperatury suchego preparatu.

Jako wzorca do suszenia używano mleka odtłuszczonego pobieranego z Zakładu Mleczarskiego w Olsztynie oraz biomasy szczepu *Streptococcus cremoris* 333 pozyskiwanej w Zakładzie Biopreparatów Mleczarskich w Olsztynie. W trakcie prowadzenia badań dokonywano oznaczeń suchej masy surowca, suchej masy uzyskanego produktu, rozpuszczalności proszku mlecznego, liczby komórek w 1 g suchej biomasy przed suszeniem oraz po suszeniu. W celu uzyskania jak najwyższego stopnia osuszenia powietrza zastosowano grubość warstwy złoża  $0,21 \text{ m}$ . W oparciu o nomogram sporządzony w poprzednim etapie określono czas trwania procesu suszenia w celu osiągnięcia stopnia osuszenia powietrza na poziomie  $0,9-0,8$ . Przed przystąpieniem do pomiarów zasadniczych przeprowadzono teoretyczne obliczenia (wstępną analizę) parametrów pracy wieży rozpyłowej w oparciu o dane surowca i założone parametry produktu. Założono czterokrotne zagęszczenie mleka odtłuszczonego do uzyskania suchej masy rzędu  $36\%$  oraz uzyskanie proszku mlecznego o zawartości suchej masy  $96\%$ . Założono również utrzymanie temperatury powietrza wprowadzanego do wieży rozpyłowej na poziomie  $100^\circ\text{C}$  oraz wilgotności powietrza wylotowego rzędu  $20\%$  przy temperaturze  $55-60^\circ\text{C}$ .

Po przeprowadzonym rzeczywistym procesie suszenia sporządzono bilans masowy, który wskazał, że poczynione założenia były słuszne i osiągnięto w rezultacie obniżenie temperatury powietrza wprowadzonego do wieży do  $100^\circ\text{C}$ , temperatury powietrza wylotowego do  $60^\circ\text{C}$  oraz temperatury osiągniętej przez produkt końcowy do  $50-51^\circ\text{C}$ . Uzyskany produkt (proszek mleczny) ze względu na zawar-

tość wilgoci 3,54-3,94% oraz rozpuszczalność rzędu 95% można w oparciu o obowiązujące normy (8) zaliczyć do klasy I. W procesie suszenia biomasy oparto się na wynikach badań suszenia mleka odtłuszczonego stosując identyczny filtr oraz te same wartości natężenia przepływu i temperatury powietrza suszącego. Przygotowując materiał do suszenia dążono do osiągnięcia w nim zawartości suchej masy na poziomie 36-40%. W procesie suszenia osiągnięto bardzo pozytywne wyniki. Powietrze wylotowe z komory osiągało temperatury 55-63°C przy wilgotności względnej 14-19%. Uzyskano koncentrat o zawartości wody rzędu 2,9-4,1%. Nie stwierdzono ubytku komórek badanego szczepu. Równolegle do procesu suszenia przeprowadzono na tym samym materiale porównawcze utrwalenie biomasy metodą sublimacyjną (liofilizacji). Wykazało ono niższą przeżywalność komórek niż przy stosowaniu metody rozpyłowego suszenia ze wstępnym osuszaniem powietrza. Aktywność biologiczna preparatu, oceniana na podstawie czasu ścinania 100 ml mleka przez 0,1 g proszku utrzymywała się na tym samym poziomie (410-450 min).

Uzyskane w trakcie badań wyniki w pełni pozwalają na dalsze próby zastosowania opisywanej metody do suszenia produktów wrażliwych termicznie, takich jak soki owocowe, koncentraty i odżywki.

#### LITERATURA

1. Ferencowicz J.: Wentylacja i Klimatyzacja. Arkady, Warszawa 1972.
2. Guter R. S., Owczyński B. W.: Matematyczne opracowanie wyników doświadczeń. PWN Warszawa 1967.
3. Haussler W.: Zastosowanie wykresu i-x w inżynierii sanitarnej. Arkady, Warszawa 1970.
4. Kłębukowski M.: Badania nad zastosowaniem filtrów silikażelowych w procesach suszenia produktów spożywczych. Praca dyser-tacyjna. Wydz. Technologii Żywności ART Olsztyn 1977.
5. Kneule F.: Suszenie. Arkady, Warszawa 1970.
6. Rumszyski L. Z.: Matematyczne opracowanie wyników eksperymentu. WNT Warszawa 1973.
7. Zych J.: Badanie przydatności sorbentów do odwilżania czynni-ków chlorowcopochodnych w technice chłodniczej. Chłodnictwo Nr 2, 1975.
8. Polska Norma: PN-64/A-86044.

Михал Клэмбуковски, Зенон Катэвич

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛИКАЖЕЛЕВЫХ ФИЛЬТРОВ  
В ПРОЦЕССАХ СУШКИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р е з ю м е

Исследования касались адсорбционного метода для понижения содержания влажности в воздухе принятом для процессов сушки биологически активных материалов. Адсорбентом был кремнезёмный жель (силикажель). Цикл исследований подразделено на две части:

- определение динамики адсорбции влажности на кремнезёмном желе,
- исследования касающиеся применения желевых фильтров для удаления влажности из воздуха во время сушки.

Исследования произведено для разной толщины слоя желя и для разной быстроты переплыва воздуха сквозь слой. Получено математическую формулу описывающую изменения относительной убыли влажности из воздуха в функции времени длительности процесса и в функции переплыва воздуха сквозь слой.

Эталоном для сушки было обезжиренное молоко и биомасса штамма *Streptococcus cremoris* 333. Понижено температуру фактора сушки с  $160^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$  при температуре устья  $60^{\circ}\text{C}$ .

Полученный продукт соответствовал требованиям норм этого рода препаратов.

Michał Kłębukowski, Zenon Katewicz

STUDIES ON APPLICATION OF SILICA-GEL FILTERS  
IN DRYING PROCESS OF BIOLOGICALLY ACTIVE MATERIALS

S u m m a r y

The studies included application of adsorption method to reduce the relative humidity of the air used for drying of some biologically active materials. Silica-gel was used as an adsorbent.

Studies were carried out in two stages:

- determination of the moisture adsorption by silica-gel,
- studies on the application of silica-gel filters to reduce the humidity of air during drying of biologically active materials.

The experiments have been carried out for various bed depths and various velocities of the air-flow.

The mathematical formula describing changes of the relative humidity of air versus time and air-flow velocity is given.

As the material for drying the skim milk and biomass of *Streptococcus cremoris* 333 bacteria were used. The temperature of drying agent could be decreased from 160 deg C to 100 deg C, at the outlet temperature of 60 deg C. The final product met the requirements of standards.