

## OPTYMALIZACJA PROCESU SUSZENIA TRAW W SUSZARKACH PNEUMATYCZNO-BĘBNOWYCH

L. KAJRIS, W. WALUSZIS — ZSRR

Do suszenia traw używa się najczęściej suszarek pneumatyczno-bębnowych. Podstawową zaletą tego typu suszarek jest zachodzące w czasie suszenia ciągle mieszanie materiału i selektywna zasada suszenia. Umożliwia to zastosowanie czynnika suszącego o wyższych temperaturach początkowych bez obniżenia jakości suszonego materiału. W tego typu suszarkach możliwe jest przeprowadzenie procesu suszenia bardziej intensywnie i znacznie bardziej ekonomicznie, zarówno pod względem zużycia ciepła, jak i energii elektrycznej. Współczynnik sprawności cieplnej dla każdej idealnej suszarki jest wyrażony wzorem

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_0}, \quad (1)$$

gdzie:

$t_1$  — początkowa temperatura gazów, °C,

$t_2$  — temperatura wychodzących gazów, °C,

$t_0$  — temperatura otoczenia, °C.

Ze wzoru można wywnioskować, że im większa jest różnica temperatur między wchodzącymi a wychodzącymi gazami, tym wyższy jest współczynnik sprawności cieplnej suszarki. Przyjmując często stosowaną w praktyce przy suszeniu traw w suszarkach o niskich temperaturach, temperaturę początkową 100°C, a gazów wychodzących 40°C i odpowiednio w suszarkach o wysokich temperaturach  $t_1 = 500^\circ\text{C}$  i  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ , stwierdzamy, że współczynnik sprawności suszarek o wysokich temperaturach jest o 8-9% wyższy od współczynnika sprawności suszarek o niskich temperaturach. Inną ważną zaletą suszarek pneumatyczno-bębnowych jest możliwość całkowitej mechanizacji i automatyzacji wszystkich operacji w procesie suszarniczym.

Jednym z podstawowych wymagań stawianych wysuszonemu produktowi jest określona wartość końcowa. W licznych badaniach zootechnicznych ustalono, że trawa wychodząca z suszarki powinna mieć wilgotność 10-12%. W mączce lub siewce z traw o większej wilgotności, w czasie przechowywania rozwijają się mikroorganizmy, które mogą negatywnie wpływać na wartość odżywczą lub doprowadzić do całkowitego zepsucia produktu. Z drugiej strony, przesuszenie traw do wilgotności 5-7% lub niższej prowadzi do przegrzewania produktu i wynikających z tego

konsekwencji: zmniejszenia przyswajalności substancji białkowych oraz zwiększonych strat karotenu w czasie przechowywania. Oprócz tego, wahania wilgotności ponad 2% komplikują proces granulowania, ponieważ wymagane jest wtedy dodatkowe nawilgocenie produktu.

W badaniach ustalono, że osiągnięcie optymalnej wilgotności przy ręcznej regulacji podstawowych parametrów procesu suszenia jest bardzo trudne. Nie ulega jednak wątpliwości, że problem ten jest możliwy do rozwiązania przez zastosowanie automatycznej regulacji wszystkich podstawowych parametrów procesu.

Większość produkowanych na świecie suszarek pneumatyczno-bębnowych wyposażona jest w urządzenia kontrolne temperatury wylotowej czynnika suszącego, temperatury początkowej czynnika suszącego i ilości podawanego paliwa. Automatykacja ogranicza się tylko do regulacji ilości podawanego paliwa w zależności od temperatury czynnika suszącego na wylocie z suszarki. Prawie we wszystkich suszarkach zainstalowane są tylko regulatory dwupołożeniowe (dwupozycyjne), które w zależności od temperatury czynnika suszącego na wylocie wpływają na ilość podawanego paliwa. Jak wykazują badania, przeprowadzone w Litewskiej Stacji Badania Maszyn, ani jedna suszarka pracująca w warunkach automatycznej regulacji nie jest w stanie utrzymać wymaganych warunków temperatury, w przypadku gwałtownego zwiększenia się wilgotności (deszcz, rosa), względnie ilości (przerzucanie przez odrzutnik wyrównujący) surowca, dostarczanego do suszenia. Można to wyjaśnić tym, że regulatory nastawione są tylko na warunki „maksimum”, co oznacza, że zmniejszają one tylko wymaganą ilość podawanego paliwa przy osiągnięciu wymaganej temperatury i zwiększają ponownie przy obniżeniu się temperatury. Jeżeli wilgotność i ilość podawanego do suszenia surowca zwiększa się i temperatura wylotowa czynnika suszącego spada, regulatory nie działają i niezbędna jest interwencja operatora, który powinien zwiększyć ilość podawanego paliwa względnie zmniejszyć ilość dozowanego surowca.

Czujniki termoregulatora są umieszczone na końcu bębna suszącego i posiadają dużą bezwładność działania. Dlatego też od momentu zmiany wilgotności, względnie ilości napływającego surowca, do momentu zadziałania urządzenia regulacyjnego upływa nieco czasu. Podawany w tym czasie do bębna suszącego surowiec nie dosusza się lub ulega przesuszeniu. Dobrze ilustrują to wykresy przedstawiające wyniki badań, przeprowadzonych w 1970 r. wspólnie z przedstawicielem firmy „Rofama” i Litewskiej Stacji Badań Maszyn, na agregacie M 804/0-1,5, wyposażonym w regulator „Landis Gir”.

Jeżeli w określonym odstępie czasu (36 min) temperatura w miejscu umieszczenia czujnika regulatora wahała się w granicach 119-124°C, to temperatura w punkcie znajdującym się 3,3 m od wlotu do bębna suszącego zmieniała się od 201 do 402°C, a wilgotność wysuszonego produktu 3-21%.

Zapewnienie maksymalnej wydajności, minimalnego zużycia ciepła na jednostkę produkcji i otrzymanie mączki o wymaganej wilgotności możliwe jest tylko przy automatycznym sterowaniu procesem suszenia. Za podstawę automatycznej regulacji należy przyjąć zasadę maksymalnego wykorzystania ciepła. W tym przypadku

regulacja powinna być dokonywana przez zmianę ilości podawanego wilgotnego surowca. Czujnik powinien być umieszczony w ten sposób, ażeby przy maksymalnej czułości i minimalnej bezwładności działania mógł reagować na ilość i wilgotność surowca podawanego do bębna suszącego.

Jak już wspomniano, prawidłowość parametrów pracy suszarki uwarunkowana jest głównie wilgotnością wysuszonego materiału. W tym celu określona została matematyczna zależność wilgotności wysuszonego produktu od podstawowych parametrów określających przebieg procesu. Takimi parametrami w badanej suszarce są: początkowa temperatura czynnika suszącego, początkowa wilgotność suszonego materiału, temperatura czynnika suszącego na wylocie i wydajność suszarki wyrażona w ilości wysuszonego materiału.

Dla otrzymania matematycznej zależności pomiędzy wilgotnością wysuszonego materiału i zaburzeniami (zakłóceniami) zastosowano różne warianty metody aproksymacji funkcji wielu zmiennych za pomocą kolejnego wyłączania funkcji składowych, zaproponowaną przez Brandona.

Aby określić stopień wpływu poszczególnych parametrów na wilgotność wychodzącego produktu, sporządzono wykresy (przy pomocy metody średnich) wybrano najbardziej prawdopodobne linie regresji, rozwiązano systemy normalnych równań, zbudowanych przy pomocy metody najmniejszych kwadratów i określono wartości ich współczynników. Współczynniki korelacji określały stopień wpływu każdego parametru na wilgotność gotowego produktu. W rezultacie uzyskano opis matematyczny procesu wyrażony następującym równaniem

$$W_2 = K \left( \frac{1}{t_2 - a} \right) (b - t_1)(C - W_1)(d - G_2), \quad (2)$$

gdzie:

$W_2$  — względna wilgotność gotowego produktu, %,

$K, a, b, c, d$  — współczynniki stałe,

$t_2$  — temperatura czynnika suszącego na wylocie, °C,

$t_1$  — temperatura początkowa czynnika suszącego, °C,

$W_1$  — względna początkowa wilgotność suszonego surowca, %,

$G_2$  — wydajność suszarki w kg suszonego produktu na godz (kg/godz).

Według metodyki Brandona obliczone zostały wartości stałych współczynników tego równania.

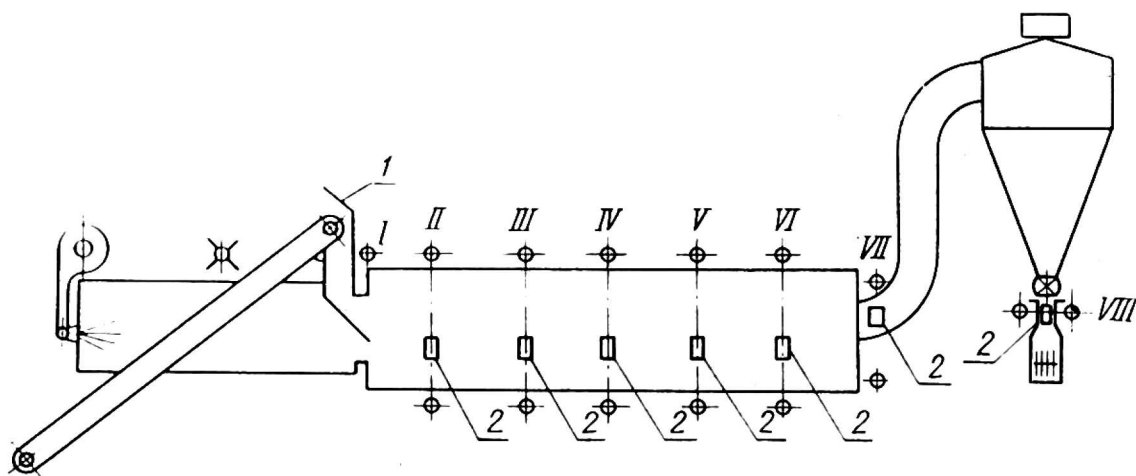
W celu określenia typu czujnika, obliczenia miejsca jego umiejscowienia i opracowania schematu automatycznej regulacji niezbędna jest znajomość krzywych suszenia, krzywych przebiegu i charakterystyka częstotliwości zmiany wilgotności surowca oraz zmian temperatury czynnika suszącego wzdłuż bębna suszarki.

Aby otrzymać krzywe suszenia, należy znać prędkość przechodzenia materiału wzdłuż przewodu suszącego — czas jego ekspozycji. Ta wielkość określana była przez nas dwiema metodami: za pomocą materiału imitującego i indykatorów radioaktywnych. Jako materiał imitujący dobrano materiał taki, który pod względem swoich aerodynamicznych i termofizycznych właściwości odpowiadał materiałowi

podstawowemu. Był on wprowadzony do bębna suszącego, po czym pobierano próbki w określonych przekrojach bębna i określano ilość materiału imitującego w próbkach.

Za materiał imitujący sieczkę z lucerny i koniczyny przyjęto wióry drzewne. Pod względem prędkości unoszenia łądyg (4-6 m/s) najbardziej odpowiednie były osikowe pręciki o wymiarach  $1,7 \times 1,7 \times 42$  mm, liści zaś (1,5-2 m/s) wióry osikowe o grubości 0,1-0,2 mm i powierzchni 0,6-9,5 cm<sup>2</sup>. Materiał imitujący był nawilgany do początkowej wilgotności suszonego materiału właściwego (75-80%). Dla każdego doświadczenia odważano po 20 kg „łodyg” i „liści”, co odpowiadało przeciętnemu stosunkowi pomiędzy łądygami i liśćmi w sieczce z traw.

Przy ustalonych warunkach pracy agregatu materiał imitujący był podawany przez wysyp 1 (rys. 1) do bębna suszącego. Od tego momentu przy każdym obrocie



Rys. 1. Schemat agregatu M 804/0-1,5 z zaznaczonym położeniem okienek służących dla pobierania próbek suszonego materiału

1 — otwór do wprowadzenia materiału zastępczego, 2 — okienka dla pobierania próbek; I-VII położenia kolejnych czujników

bębna suszącego, nie zatrzymując go, z odpowiednich miejsc przez specjalne okienka 2 pobierano jednocześnie próbki. Masa próbki wahała się od 50 do 100 g. Pobieranie próbek przerywano w danym miejscu, jeżeli w kolejnych 2-3 próbkach nie znaleziono materiału imitującego. W ten sposób w 1970 r. były przeprowadzone badania przy prędkościach kątowych 3, 4 i 6 obr./min bębna suszącego.

Z każdej pobranej próbki wydzielano łądygi i liście, i określano ich wagowy udział procentowy w całej próbce oraz czas ich maksymalnej ilości w każdym miejscu pobierania próbki. Za moment przechodzenia materiału przez dany przekrój bębna suszącego został przyjęty moment przechodzenia maksymalnej ilości „liści” i „łodyg” w tym przekroju. Według danych z badań sporządzone zostały wykresy prędkości przechodzenia materiału wzdłuż bębna suszącego (rys. 2). Otrzymanych wartości w przekrojach od VII i VIII nie uwzględniono na wykresie, ponieważ w tych odcinkach bębna suszącego (rurociąg—cyklon) nagle zmieniał się charakter ruchu suszonego materiału.

Analiza korelacyjna danych zależności wykazała, że najbardziej odpowiednią jest forma zależności logarytmicznej

$$T = a + b \ln l, \quad (3)$$

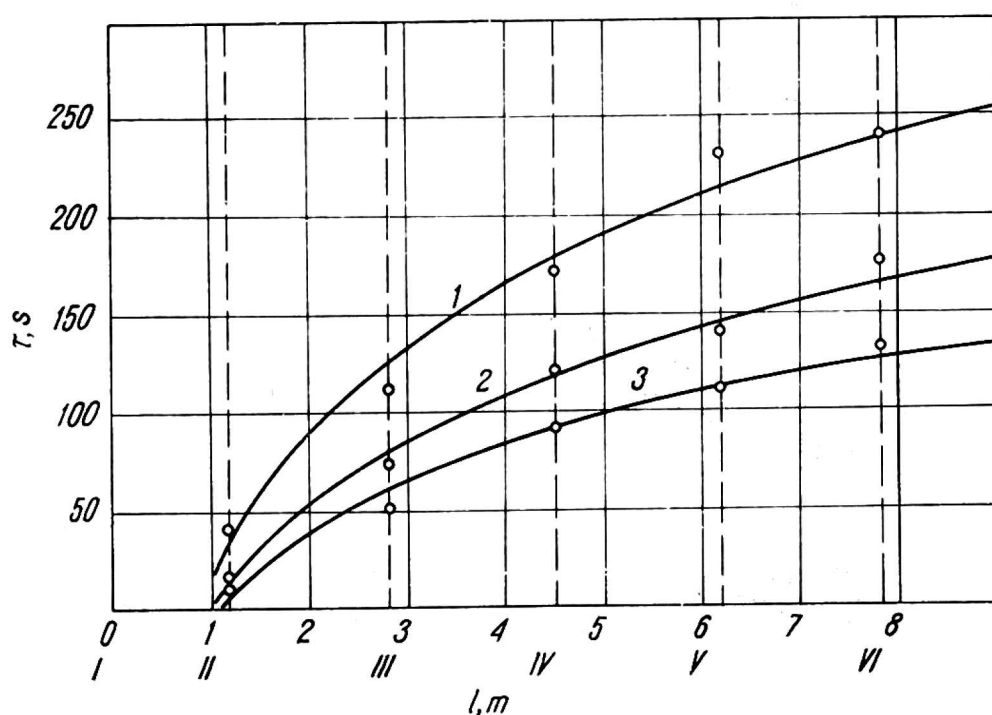
gdzie:

$T$  — czas, s.

$l$  — droga,

$a, b$  — współczynniki stałe.

Dla każdej prędkości kątovej bębna suszącego obliczono wartości liczbowe stałych współczynników  $a$  i  $b$ . Współczynnik korelacji, charakteryzujący ścisłość powiązania danej zależności logarytmicznej, wynosił nie mniej niż 0,985. Krzywe



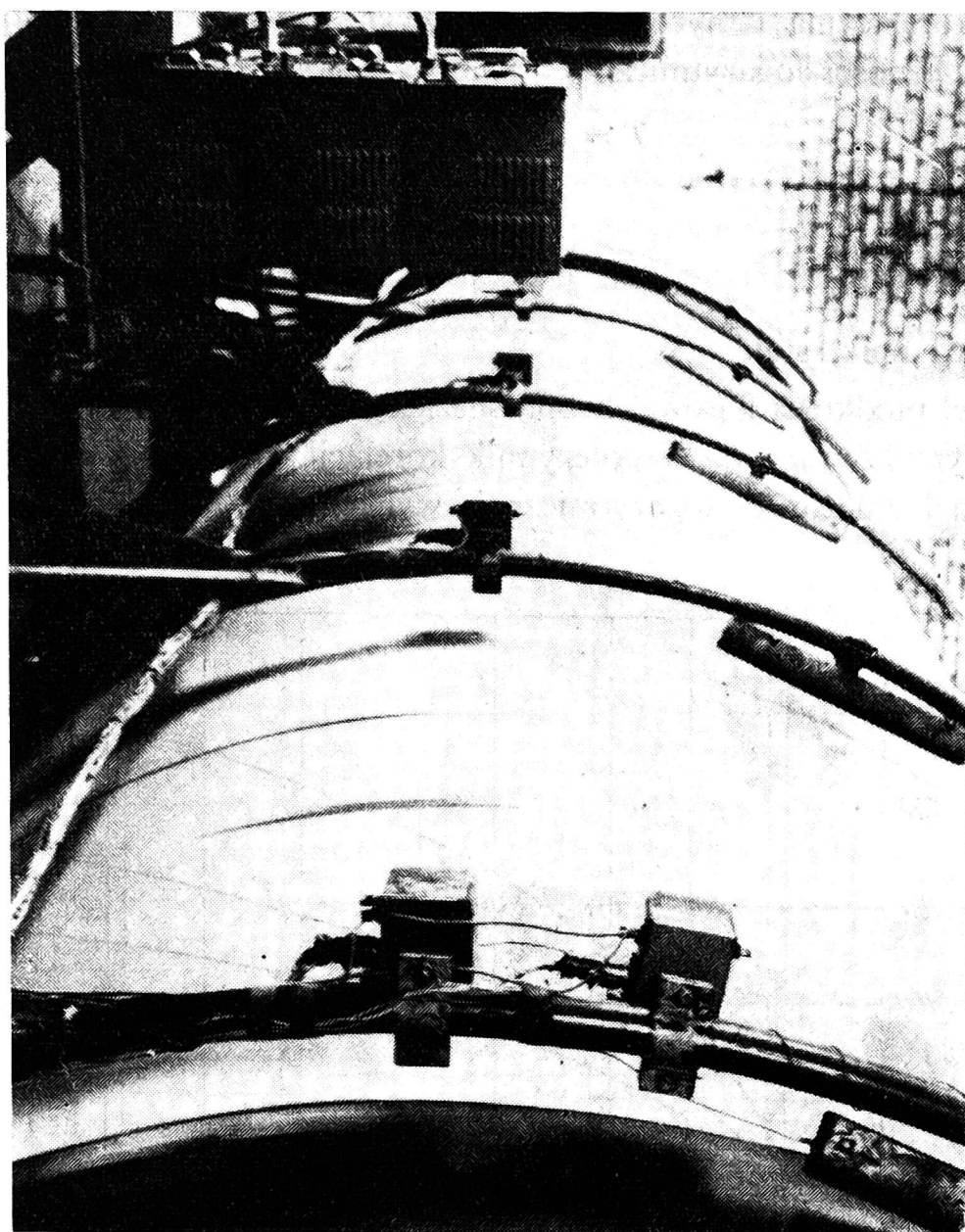
Rys. 2. Wykres prędkości ruchu materiału zastępczego w bębnie agregatu M 804/0-1,5

1 — przy  $\omega = 0,314 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ , 2 — przy  $\omega = 0,419 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ , 3 — przy  $\omega = 0,628 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

zaczynają się w pewnej odległości od początku współrzędnych (bębna suszącego), ponieważ suszony materiał wprowadzany jest nie na początku bębna suszącego, lecz w pewnej odległości.

Znaczony izotopem radioaktywnym surowiec wprowadzany był do przewodu suszącego agregatu. Rejestrowano stopień radioaktywnego promieniowania wewnątrz, w określonych punktach bębna suszącego, i analizowano otrzymane wyniki.

Do rejestracji promieniowania radioaktywnego, w tych samych przekrojach (rys. 1) były umieszczone na wspornikach (rys. 3) detektory promieniowania radioaktywnego — liczniki halogenowe BC-9. Liczniki były ekranowane powłoką ołowianą ze szczeliną wziernikową. Natężenie promieniowania emitowanego przez przechodzący obok licznikówznaczony materiał proporcjonalny do masy przechodzącej w każdym przekroju substancji, przekształcono w sygnał prądu stałego przy



Rys. 3. Rozmieszczenie czujników

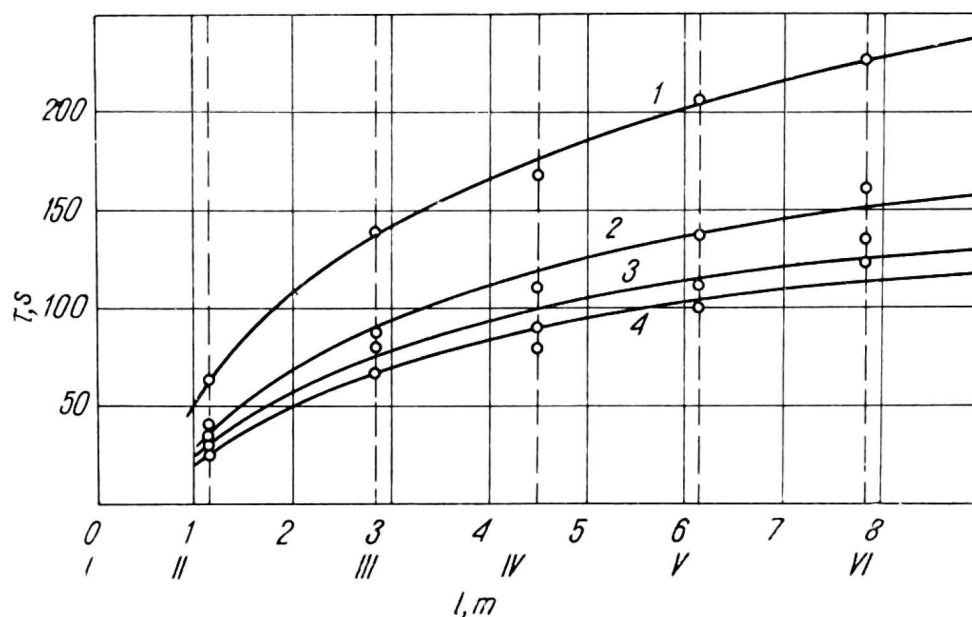
pomocy układu elektronicznego i rejestrowano za pomocą urządzeń samopiszących. Do synchronizacji zapisu wykorzystywany był czasomierz — zegar typu KPCZ.

Porcja podsuszonej siewki z traw (o masie około 10 g) pobierana była z V przekroju przewodu suszącego i nawilżana wodnym roztworem radioaktywnego jodu J-132 do wilgotności suszonego materiału. Optymalna radioaktywność, ustalona eksperymentalnie, wynosiła około 1 milicurie. Przy ustalonych warunkach pracy agregatu porcja materiału znaczonego (rys. 2) zasypywana była przez luk do bębna suszącego. Przepływ surowca znaczonego rejestrowany był na taśmach urządzeń samopiszących H-320-5. W 1971 r. przeprowadzone były podobne doświadczenia przy prędkościach kątowych bębna suszącego 3, 4, 5 i 6 obr./min. Każdą krzywą wyznaczono za pomocą interpolacji czwartego rzędu. W wyniku interpolacji wielomianem Newtona i różniczkowaniu tego wielomianu zostały wyznaczone współrzędne ekstremalnego punktu danej krzywej. Odpowiadało to chwili przechodzenia największej ilości znaczonego surowca w danym przekroju.

Podobnie do wyżej przedstawionej metody sporządzane były wykresy prędkości przechodzenia suszonego surowca wzdłuż bębna suszącego (rys. 4).

Analiza korelacyjna powyższych zależności wykazała, że również najbardziej odpowiednią formą jest zależność logarytmiczna [3]. Obliczone zostały stałe współczynniki tego równania  $a$  i  $b$  oraz współczynnik korelacji dla każdej prędkości kątowej bębna suszącego; wynosił on nie mniej niż 0,981.

Za pośrednictwem obydwu zastosowanych metod otrzymano rezultaty zbliżone do siebie pod względem wartości i opisane równaniami tego samego rodzaju. Ponie-



Rys. 4. Wykres prędkości przechodzenia materiału znaczonego radioaktywnie wzdłuż bębna agregatu M 804/0-1,5

$$1 - \text{przy } \omega = 0,314 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad 2 - \text{przy } \omega = 0,419 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad 3 - \text{przy } \omega = 0,524 \frac{\text{rad}}{\text{s}},$$

$$4 - \text{przy } \omega = 0,628 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

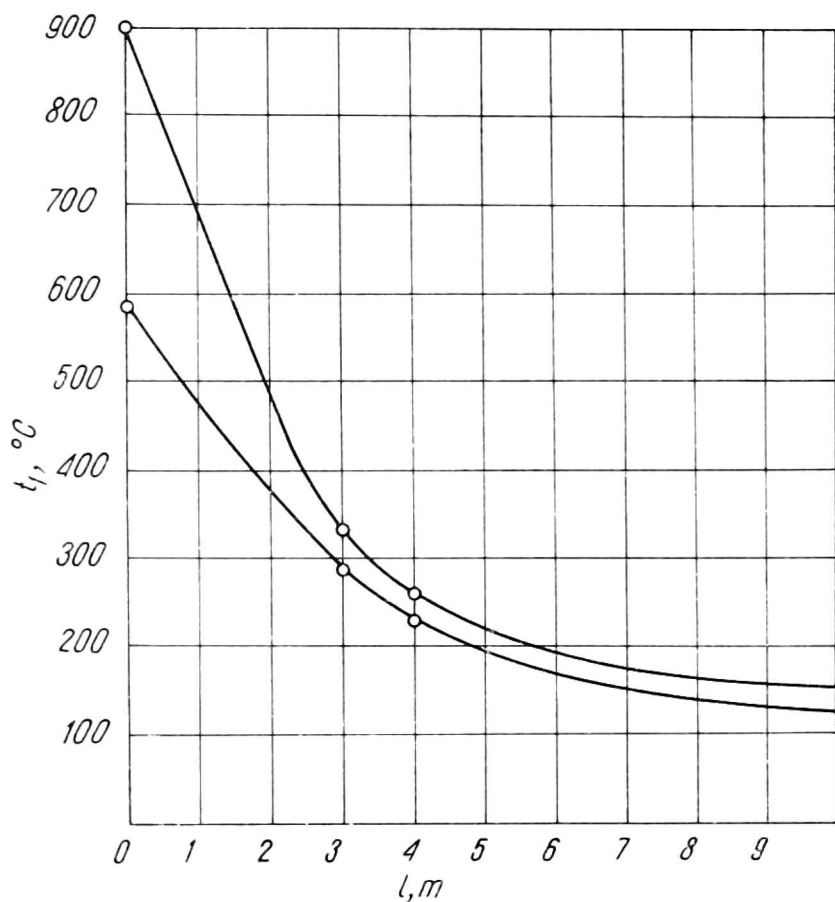
waż metodą indykatorów badania przeprowadzono w 3-5 powtórzeniach, przy sporządzaniu krzywych suszenia  $W = f(t)$  został przyjęty czas ekspozycji, otrzymany tą metodą.

Krzywe suszenia  $W = f(t)$  sporządzone zostały dla 3, 4, 5 i 6 obr./min bębna suszącego i temperatury początkowej czynnika suszącego 600, 700, 800 i 900°C. Stosownie do metody Smirnowa [4], dla wszystkich 16 wariantów obliczona była stała czasowa, współczynnik suszarniczy i miejsce montażu czujników w bębnie suszącym. Miejsce to znajduje się między 3 i 4 metrem od wlotu bębna suszącego.

W celu potwierdzenia otrzymanych obliczeń sporządzono wykresy zakresu zmian temperatury czynnika suszącego wzdłuż bębna suszącego, przy różnych temperaturach początkowych czynnika suszącego (rys. 5). Analiza tego wykresu wykazała, że bez względu na rozpiętość zmian temperatur początkowych, wynoszących 300°C (od 600° do 900°C), już po trzech metrach rozpiętość ta wynosiła około 50°C (290-336°C), w punkcie oddalonym o 4 metry — 30°C (230-260°C), a w końcu bębna suszącego przed głównym wentylatorem — 21°C (104-125°C).

Z krzywych odpowiedzi skokowej i charakterystyk częstotliwości zmian temperatury czynnika suszącego wzdłuż bębna suszącego, obliczone były funkcje transmittancji: temperatura czynnika suszącego — prędkość postępująca przenośnika zasilającego.

W celu optymalizacji procesu suszenia traw w suszarkach pneumatyczno-bębnowych należy wykorzystać wyższe temperatury początkowe czynnika suszącego, i proces suszenia prowadzić przy regulacji automatycznej, która powinna się odbywać za pomocą zmiany napływu surowca. Przeprowadzone badania i obliczenia



Rys. 5. Zakres zmian temperatury czynnika suszącego wzdłuż osi bębna

wskazują, że czujnik regulacji automatycznej powinien być umieszczony na początku przewodu suszącego (3-4 m), a nie na końcu.

Wprowadzenie podobnej regulacji daje możliwość zwiększenia wydajności suszarek do 5%, otrzymania produktu o wymaganej wilgotności (w granicach  $\pm 1\%$ ) i ułatwia pracę obsługi. Przy granulowaniu mączki z traw można wyłączyć system nawilżający, obsługę zaś suszarek i granulatora może stanowić jeden człowiek — maszynista—operator.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ТРАВ В ПНЕВМОБАРАБАННЫХ СУШИЛКАХ

Л. КАЙРИС, В. БАЛУШИС — СССР

### Резюме

На основании результатов проведённых испытаний произведен анализ взаимозависимости таких переменных параметров, как влажность продукта, температура сушильного



агента, а также пропускная способность сушилки, применяя метод исключения составляющих функций. Получено математическое описание процесса. Правильная регулировка параметров работы сушилки обуславливает достижение оптимального качества продукта.

При сушке трав в пневмобарабанных сушилках следует использовать высокие температуры сушильного агента, регулируя автоматически приток влажного сырья. Автоматическая регулировка даёт возможность увеличения производительности сушилки на 5% и облегчает работу персонала.

## OPTIMIZATION OF GRASS DRYING PROCESS IN ROTARY-DRUM DRIERS

L. KAJRIS, V. VALUSHIS — Soviet Union

### Summary

On the basis of results of experiments carried on the correlation was analysed between such variable factors as the moisture content of material, the temperature of drying agent and working capacity of the drier, using the method of elimination component functions. The mathematical formula describing the process was found. The optimal quality of the dried product depends on the proper control of drier working parameters. At the drying of grass in rotary-drum driers the high temperature of drying agent and automatic control of wet material supply should be applied. The automatic control of drying process gives the possibility to increase the drying capacity of driers of about 5 per cent and makes the work of operators much easier.

## OPTIMALISIERUNG DER GRÄSER — TROCKNUNG IN PNEUMATISCHEN TROMMELTROCKNERN

L. KAJRIS, W. WALUSCHIS — UdSSR

### Zusammenfassung

Auf dem Grund der durchgeführten Untersuchungen hatte man eine Analyse solcher Parameter wie: Feuchtigkeit des Produktes, Temperatur der Trocknungsgase, Durchsatz des Trockners gemacht. Dazu hat man die Methode der Ausschaltung der Bildender Funktionen ausgenutzt. Es wurde eine mathematische Beschreibung des Processes dargestellt. Durch geeignete Regelung des Processes ist die Erreichung der optimalen Produktenqualität bedingt.

Bei der Trocknung der Gräser in den pneumatischen Trommeltrocknern sollen, durch die automatisch geregelte Zuleitung des feuchten Rohstoffes, die höheren Temperaturen der Trocknungsgase ausgenutzt werden. Es wird dadurch eine Steigerung der Trocknungsleistung um etwa 5% und die Erleichterung der Bedienung ermöglicht.