

## UPROSZCZONA METODA WYZNACZANIA ZUŻYCIA CIEPŁA PRZY SUSZENIU

A. STRAWIŃSKI — Polska

Personel techniczny przystępujący do badań suszarek rozpoczyna je najczęściej pomiarami niezbędnymi do zestawienia bilansu cieplnego. Uzyskane wyniki, w taki czy inny sposób uszeregowane, pozwalają na ocenę pracy suszarki z punktu widzenia energetycznego. Na jej podstawie można uzyskać tylko bardzo ogólne wnioski, jeżeli uzyskane wielkości zostały odpowiednio obliczone i uporządkowane. W celu dokonania prawidłowej oceny użytkowania ciepła w suszarce trzeba zdawać sobie sprawę ze zmienności poszczególnych pozycji bilansu oraz ich wpływu na całkowite zużycie ciepła. Jeżeli w bilansie cieplnym, przedstawionym w formie podstawowej, zgrupowane zostaną z jednej strony pozycje ciepła dopływającego, a z drugiej strony ciepła odpływającego z suszarki, otrzymamy równanie:

$$Q_D + Q_E + Q'_M + Q'_L = Q_K + Q''_M + Q''_L + Q_{str}, \quad (1)$$

gdzie:

$Q_D$  — ciepło wprowadzone z czynnikiem grzejnym,

$Q_E$  — ciepło wprowadzone z energią elektryczną do napędu wentylatorów i urządzeń napędzanych wewnątrz suszarki,

$Q'_M$  — ciepło wprowadzone z produktem suszonym oraz wodą w nim zawartą,

$Q'_L$  — ciepło wprowadzone z czynnikiem (powietrzem) suszącym oraz wodą w nim zawartą,

$Q_K$  — ciepło odprowadzone z wykorzystanym czynnikiem grzejnym,

$Q''_M$  — ciepło odprowadzone z produktem suszonym i wodą w nim zawartą po wysuszeniu,

$Q''_L$  — ciepło odprowadzone z powietrzem nawilżonym,

$Q_{str}$  — ciepło odprowadzone do otoczenia poprzez osłony zewnętrzne suszarki.

Tak zestawiony bilans można po odpowiednim przekształceniu przedstawić w formie wskaźnika całkowitego zużycia ciepła odniesionego do 1 kg wody odparowanej. Wskaźnik ten, nazywany  $q_{brutto}$ , w postaci uproszczonej można przedstawić jako zależność:

$$q_{brutto} = \frac{Q_D - Q_K + Q_E}{W} = q_{netto} + q_{str} \quad (\text{kcal/kg lub kJ/kg}), \quad (2)$$

gdzie:

$q_{netto}$  — wielkość charakteryzująca bezpośrednie zużycie ciepła w procesie suszenia,

$q_{str}$  — straty ciepła do otoczenia,

$W$  — ilość wody odparowana w suszarce (odparowanie), wyznaczona w takim samym czasie jak  $Q_D$ ,  $Q_K$  i  $Q_E$ .

Zanim zajmiemy się najważniejszą pozycją jaką stanowi  $q_{netto}$  należy pokrótce wyjaśnić znaczenie wielkości  $q_{str}$ . Ma ona tylko pośredni wpływ na proces suszenia i na kształtowanie się wielkości  $q_{netto}$ . Jest w zasadzie niezależna od sposobu prowadzenia procesu suszenia, zależy natomiast głównie od konstrukcji osłon suszarki oraz od warunków panujących na zewnątrz. Zależy więc od ogrzewania i wentylacji w otoczeniu suszarki, stanu przegród budowlanych budynku, w którym ustawiona jest suszarka, i pośrednio od warunków panujących na zewnątrz budynku (wypromieniowanie ciepła przez ścianki suszarki do powierzchni przegród budowlanych o zmiennej temperaturze). Jest ona więc zmienna i ogólnie rzecz biorąc zależna od warunków atmosferycznych panujących na zewnątrz budynku. Natomiast wielkość  $q_{netto}$  — jak wykazała analiza pracy suszarek — dla określonej suszarki, pracującej w warunkach ustalonych można uznać za prawie niezmienną.

Zmienność  $q_{str}$  jest główną przyczyną zmienności całkowitego zużycia ciepła  $q_{brutto}$ .

Wielkość wskaźnika  $q_{netto}$ , jako charakteryzującego sposób prowadzenia procesu suszenia jest wielkością interesującą zarówno energetyków jak i technologów. Wskaźnik  $q_{netto}$  przedstawiono w tabeli 1 w formie szczegółowej.

W dalszym ciągu wprowadzono do tej zależności szereg założeń i uproszczeń, mających na celu ułatwienie wyznaczania jej dla potrzeb technicznej oceny pracy dowolnej suszarki.

Po przekształceniu dwu ostatnich składników określonych w tabeli 1 jako  $q_w$  i odpowiednim przegrupowaniu poszczególnych składników, uzyskujemy trzy zasadnicze człony składające się na  $q_{netto}$  ( $A$ ,  $B$  i  $C$ ).

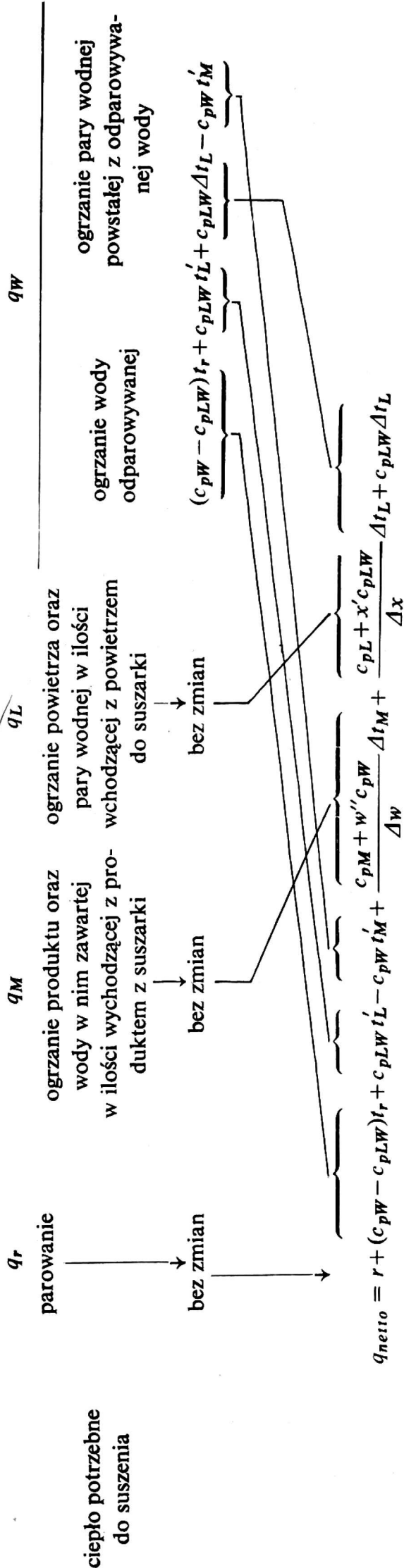
Pierwszy człon można uznać w przybliżeniu za niezmienny, drugi — zmienny, zależny od przyrostu temperatury i spadku zawartości wilgoci w powietrzu przepływającym przez suszarkę.

Pierwszym z dokonanych uproszczeń jest zastąpienie wielkości  $r + (c_{pw} - c_{pWL}) \cdot t_r$  wielkością stałą  $r_0 = 597$  kcal/kg, tzn. wartością ciepła parowania w temperaturze bliskiej  $0^\circ\text{C}$ . Uproszczenie to jest o tyle korzystne, że eliminuje trudną do określenia wielkość jaką stanowi temperatura parowania  $t_r$ . Ulega ona zmianie w każdej suszarce w dosyć szerokich granicach, począwszy od temperatury produktu na wejściu do suszarki, aż (w przybliżeniu) do temperatury termometru mokrego powietrza wydalanego na zewnątrz. Jak wynika z załączonej tabeli 2, uproszczenie takie jest dopuszczalne, a popełniony błąd waha się około 0,1 do 0,5%. Uproszczenie powyższe wprowadził Molier przy budowie wykresu  $i-x$ .

W rozważaniach pominięto ciepło sorpcji, które może mieć wpływ na zużycie ciepła tylko w specjalnych przypadkach, jak suszenie silikażelu lub produktów o małej początkowej zawartości wilgoci i wymaganej bardzo niskiej, bliskiej zeru, końcowej zawartości wilgoci.

Tabela I

$$q_{\text{netto}} = r + \frac{c_{pM} + w''c_{pW}}{\Delta w} (t_M'' - t_M') + \frac{c_{pL} + x'c_{pLW}}{\Delta x} (t_L'' + t_L') + c_{pW}(t_r - t_M') + c_{pLW}(t_L'' - t_r)$$



	A	B	C
$q_{\text{netto}}$	$591,5$	$+$	$+$
		$\frac{0,4}{\Delta w} \Delta t_M$	$\left( \frac{0,2446}{\Delta x} + 0,46 \right) \Delta t_L$
dla $\Delta w > 1,0 \text{ kg/kg}$			
$q_{\text{netto}}$	$\sim 605$	$+$	$+$
			$\left( \frac{0,2446}{\Delta x} + 0,46 \right) \Delta t_L$

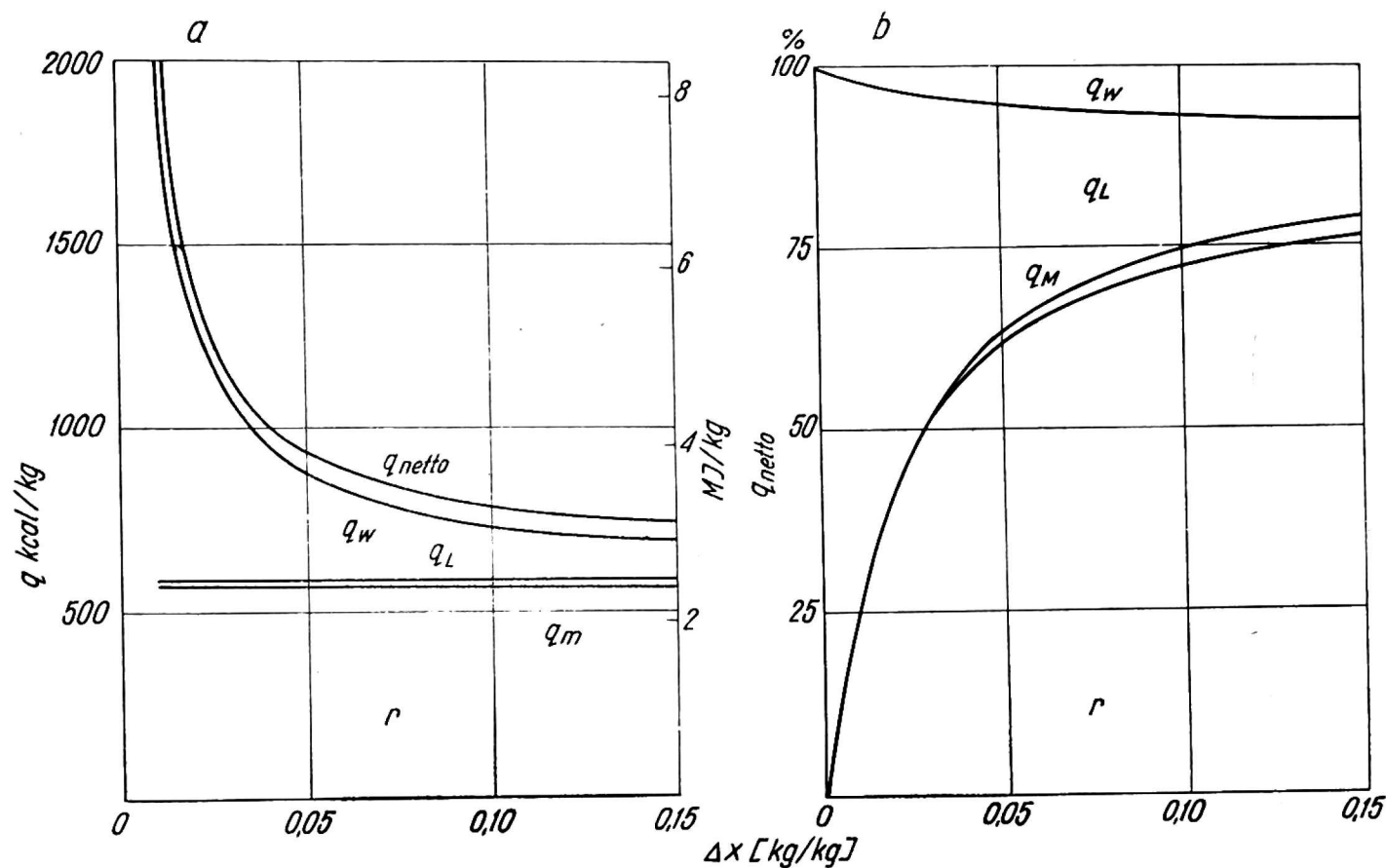
Tabela 2

Temperatura parowania $t_r$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	°C
Ciepło parowania $r$	597,3	591,7	586	580,4	574,7	569	563,2	557,3	551,3	kcal/kg
$(c_{pW} - c_{pLW}) \cdot t_r = 0,54 t_r$	0	5,4	10,8	16,2	21,6	27,0	32,4	37,8	43,2	—
$r + 0,54 t_r$	597,3	597,1	596,8	596,6	596,3	596,0	595,6	595,1	594,5	—
Odchyłka przy przyjęciu stałej wartości $r_0 = 597$										
w miejsce $r + 0,54 t_r$	-0,05	-0,017	+0,034	+0,067	+0,12	+0,17	+0,23	+0,319	+0,42	%

Przyjęcie stałej temperatury powietrza zasysanego do suszarki oraz stałej temperatury produktu suszonego na wejściu do suszarki jest jak najbardziej umowne i można je w łatwy sposób skorygować dla warunków szczególnych, odmiennych od przyjętych.

Następny człon, zależny od przyrostu temperatury i ubytku zawartości wilgoci w produkcie, zmienia się w szerokich granicach przy suszeniu różnych produktów oraz w różnych typach suszarek. Ma on jednak stosunkowo niewielki wpływ na kształtowanie się całego wskaźnika, co zostanie dalej wykazane. Największy wpływ na kształtowanie się wskaźnika  $q_{netto}$  ma trzeci człon.

Na wykresie (rys. 1a i b) przedstawiono w liczbach bezwzględnych oraz procentowo zmienność poszczególnych pozycji zużycia w funkcji przyrostu zawartości wil-



Rys. 1. Zmiany poszczególnych składników wskaźnika  $q_{netto}$  w funkcji przyrostu zawartości wilgoci w powietrzu  $\Delta x$  przy założeniu:  $x' = 0,01$  kg/kg;  $r_0 = 597$  kcal/kg;  $t'_M = 16^\circ\text{C}$ ;  $t''_M = 1,2 \cdot t'_{Lm}$ ;  $t''_L = 80^\circ\text{C}$ ;  $w'' = 0,08$  kg/kg;  $\Delta w = 1,5$  kg/kg;  $c_{pL} = 0,24$  kcal/kg K;  $c_{pLW} = 0,46$  kcal/kg K;  $c_{pM} = 0,32$  kcal/kg K

goci w powietrzu przepływającym przez suszarkę, przy dodatkowych założeniach podanych na rysunku 1.

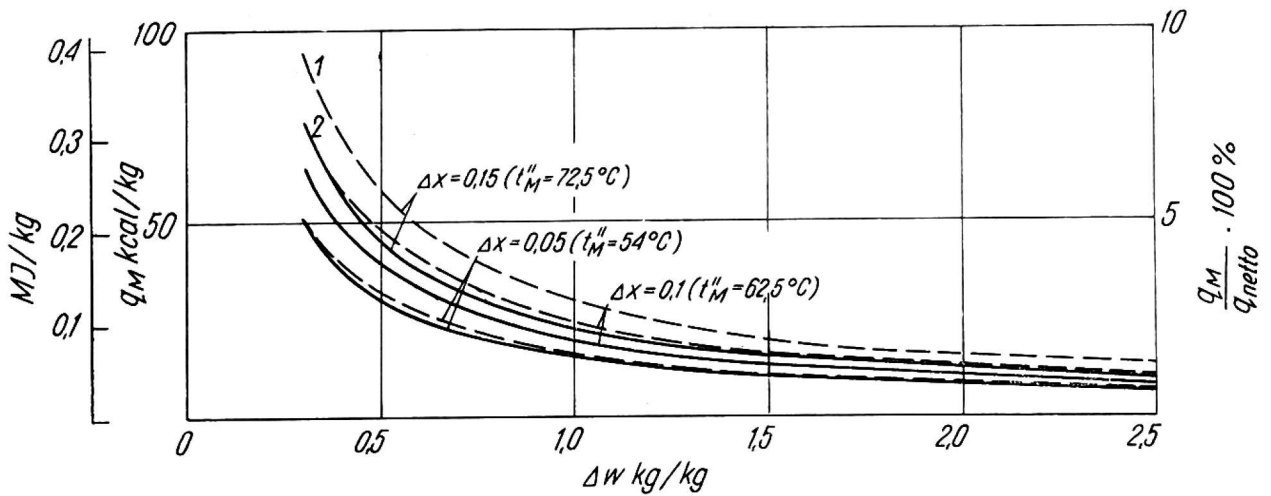
Z wykresu (rys. 1) widać, że na kształtowanie się wskaźnika największy wpływ ma, oprócz ciepła potrzebnego do odparowania wody, zużycie ciepła na ogrzanie powietrza.

W miarę zmniejszania się przyrostu zawartości wilgoci w powietrzu, czyli w miarę pogorszenia się stopnia wykorzystania powietrza w suszarce, wpływ tej pozycji wyraźnie rośnie.

Zmienność zapotrzebowania ciepła do ogrzania produktu suszonego przedstawiono na rysunku 2.

Zarówno z rysunku 1 jak i 2 widoczny jest minimalny wpływ tej pozycji zużycia ciepła na cały wskaźnik  $q_{netto}$ .

Dla szerokiego zakresu spadków zawartości wilgoci w produkcie  $\Delta w =$  od 1,0 do 2,0 kg/kg można przyjąć średnio  $A+B = 605$  kcal/kg wody odparowanej. Dla



Rys. 2. Zmiany członu  $q_M$  w funkcji spadku zawartości wilgoci w produkcie suszonym dla  $\Delta x = 0,05, 0,1$  oraz  $0,15$  kg/kg, przy pozostałych założeniach jak dla wykresu na rys. 1  
1 — w kcal/kg lub kJ/kg, 2 — w %

wartości niższych od  $\Delta w = 1,0$  kg/kg należy każdorazowo korygować sumę członów  $A$  i  $B$ . Po przyjęciu przedstawionego uproszczenia można wnioskować, że:

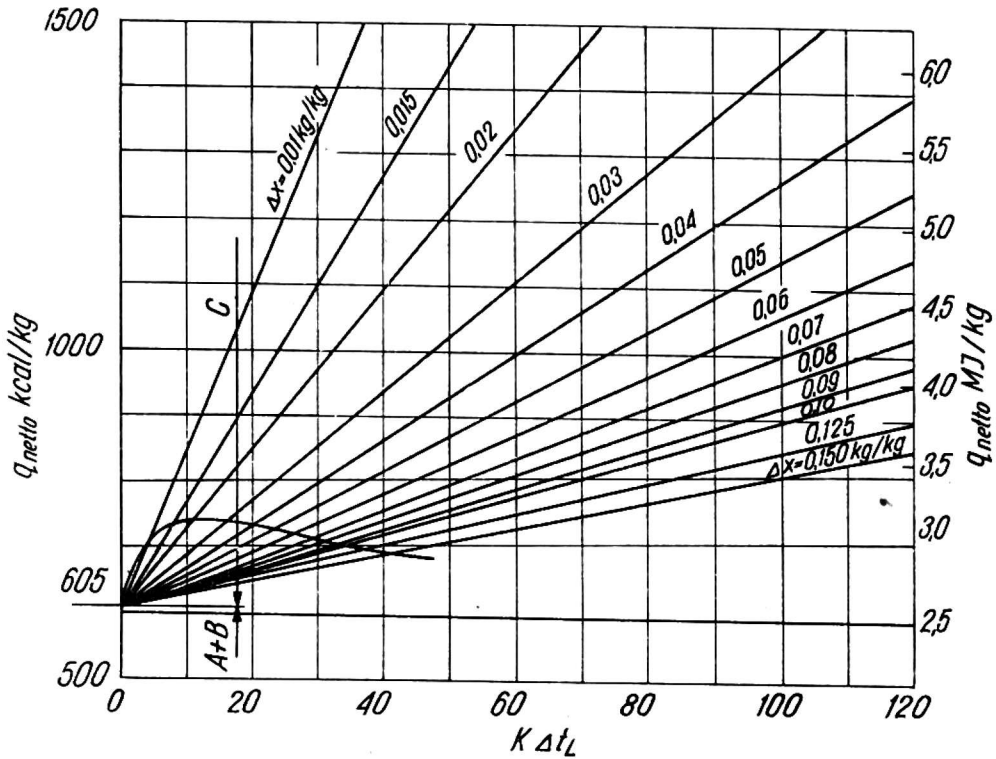
$$q_{netto} = 605 + \left( \frac{0,2446}{\Delta x} + 0,46 \right) \cdot \Delta t_L \text{ (kcal/kg)}$$

lub (3)

$$q_{netto} = 2530 + \left( \frac{1,025}{\Delta x} + 1,925 \right) \cdot \Delta t_L \text{ (kJ/kg)}$$

Zależność ta przedstawia sobą pęk prostych wychodzących z jednego punktu na osi rzędnych (rys. 3). Na rysunku tym naniesiono dodatkowo krzywą przedstawiającą najniższy możliwy teoretycznie do osiągnięcia wskaźnik  $q_{netto}$  dla określonego stanu powietrza zasysanego do suszarki. Dla przykładu podanego na rysunku 3 stan powietrza określony jest temperaturą  $t'_L = 20^\circ\text{C}$  oraz  $x' = 0,01$  kg/kg.

Krzywe te można wyznaczyć również dla innych stanów powietrza zasysanego do suszarki. Wyznacza się je przy założeniu poszczególnych przyrostów temperatur oraz odpowiadających im maksymalnych przyrostów zawartości wilgoci w powietrzu, tzn. przy końcowej zawartości wilgoci w powietrzu na linii nasycenia. W miarę



Rys. 3. Zmiany członów  $(A+B)$  w uproszczonym wskaźniku  $q_{netto}$  w zależności od spadku zawartości wilgoci w produkcie suszonym  $\Delta w$  dla  $\Delta t_M = 25, 50$  K

przyjmowania wyższych temperatur i zawartości wilgoci powietrza wprowadzanego do suszarki, minimalny wskaźnik  $q_{netto}$  może być niższy. Jest to jednak tylko pozorny zysk, gdyż wzrost temperatury powietrza wprowadzanego do suszarki odbywa się kosztem dodatkowego ciepła. Ciepło to może być doprowadzane za pośrednictwem dodatkowych grzejników. Można np. czerpać również powietrze z odpowiedniego miejsca w otoczeniu suszarki, gdzie panuje wyższa temperatura i tym samym odzyskiwać część strat  $q_{str}$ .

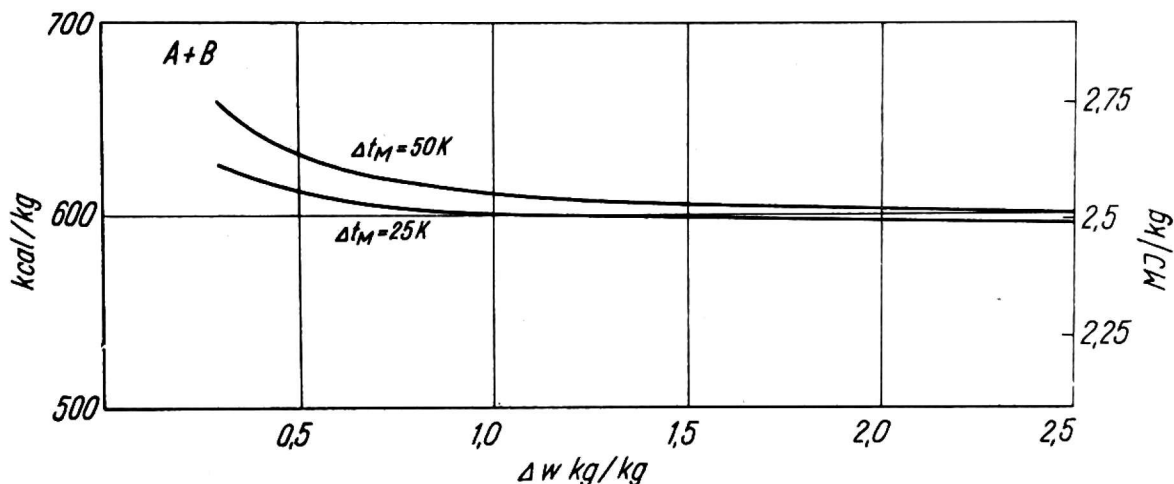
Uzyskana zależność i podany wykres (rys. 3) pozwala na określenie z dokładnością, wystarczającą do technicznej oceny suszarki, wielkości wskaźnika  $q_{netto}$ , przedstawiającego sobą zużycie ciepła potrzebnego do procesu suszenia. W tym celu należy dokonać jedynie pomiarów psychometrycznych w strumieniu powietrza doprowadzanego do suszarki oraz odprowadzanego z suszarki i określić odpowiednio wielkości  $\Delta t_L$  i  $\Delta x$ .

Gdyby suszarka posiadała kilka wlotów i kilka wylotów, określenie stanu powietrza na wlocie i wylocie powinno być dokonane w oparciu o dodatkowe pomiary natężeń przepływów w każdym otworze i wyznaczenie  $t'_L$  i  $t''_L$ ,  $x'$  oraz  $x''$  jako średnich ważonych.

Wykres (rys. 3) można zastąpić dla całego zakresu ubytków wilgotności w produkcji  $\Delta w$  dwoma wykresami, z których jeden przedstawiony jest na rysunku 4

(człony  $A+B$ ), a drugi przedstawiałby tylko funkcję  $C = f(\Delta x, \Delta t)$  — górna część wykresu na rysunku 3.

Wyznaczenie wskaźnika rozchodu ciepła na suszenie w dowolnej suszarce wymagałoby wówczas, na podstawie stanu powietrza wlotowego, stanu oparów wylotowych oraz sprawdzonych średnich wartości ubytku zawartości wilgoci w produkcie, korzystanie z dwu wykresów i sumowanie wyznaczonych członów wskaźnika ( $A+B$ ) oraz  $C$ .



Rys. 4. Wykres zależności  $q_{netto} = f(\Delta x, \Delta t_L)$

#### WYKAZ OZNACZEŃ

- $Q$  — ciepło wyrażone w kcal/h lub kJ/h,
- $q$  — ciepło wyrażone w kcal/kg lub kJ/kg,
- $c_p$  — ciepło właściwe w kcal/kg K lub kJ/kg K,
- $r$  — ciepło parowania w kcal/kg lub kJ/kg,
- $t$  — temperatura w  $^{\circ}C$ ,
- $x$  — zawartość wilgoci w powietrzu, kg/kg,
- $w$  — zawartość wilgoci w produkcie, kg/kg, (w odniesieniu do suchej masy),
- $\Delta x$  — przyrost zawartości wilgoci w powietrzu, kg/kg,
- $\Delta w$  — spadek zawartości wilgoci w produkcie suszonym kg/kg,
- $\Delta t$  — przyrost temperatury, K.

#### INDEKSY GÓRNE

- ' — na wejściu do suszarki,
- '' — na wyjściu z suszarki,

#### INDEKSY DOLNE

- $M$  — dotyczy produktu suszonego,
- $L$  — dotyczy powietrza suszącego,
- $w$  — dotyczy wody odparowanej,
- $LW$  — dotyczy pary wodnej,
- $r$  — dotyczy temperatury parowania lub w określonej temperaturze parowania,
- $o$  — dotyczy temperatury parowania równej  $0^{\circ}C$ ,
- $m$  — dotyczy temperatury termometru mokrego.

## УПРОЩЁННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛА ВО ВРЕМЯ СУШКИ

А. СТРАВИНЬСКИ — Польша

### Р е з ю м е

Тепловой баланс сушилки можно представить в виде уравнения, с одной стороны которого находятся позиции тепла, вводимого с нагревательным агентом и в виде электроэнергии в приводы вентилятора, либо устройств, переносящих продукт, а также тепла, вводимого с высушиваемым продуктом и осушивающим воздухом, а с другой — позиции тепла, отводимого с используемым нагревательным, высушенным продуктом, увлажнённым воздухом испарениями, а также тепло, которое отдаёт кожух среде. Тот же баланс после соответствующего преобразования можно представить в виде показателя расхода тепла к 1 кг испаренной воды, который состоит из тепла, необходимого для испарения воды, обогрева воздуха, а также водяного пара в количестве тепла, отведённого из сушилки без изменения состояния, необходимого для нагрева испаряемой воды до температуры испарения, а также водяного пара, возникшего из неё от температуры испарения до температуры выходного воздуха. Заключаящей величиной являются потери в среду сушилки через её кожух.

Так представленный показатель, обозначенный автором как  $q_{\text{брутто}}$ , можно разделить на две составные части:

$$q_{\text{брутто}} = q_{\text{нетто}} + q_{\text{пот}}$$

Величина  $q_{\text{пот}}$ , на которую влияют внешние факторы, изменяется в зависимости от температуры среды сушилки, а также температуры и атмосферных условий снаружи здания.

Величина  $q_{\text{нетто}}$  характеризует распределение тепла в процессе сушки; она является переменной величиной в небольших границах для определённой сушилки, работающей определенным образом. Анализ отдельных составных частей этой части показателя показывает, что тепло, необходимое для подогрева высушиваемого продукта является переменной величиной, но очень небольшой по отношению к целости  $q_{\text{нетто}}$ . Установление этого факта позволяет упростить зависимость для  $q_{\text{нетто}}$  и представить ее на диаграмме.

## SIMPLIFIED METHOD OF DETERMINATION OF HEAT CONSUMPTION IN DRYING PROCESS

A. STRAWIŃSKI — Poland

### S u m m a r y

Heat balance of the drier can be presented in form of an equation. On one side of equation there are set the amounts of inlet heat, supplied with heating factor, in form of electric energy for the drive of fan or material conveyors, and the heat inserted with the material and drying air. On the other side — the amounts of outlet heat abstracted with utilized heating factor, dried product and damped air, as well as the heat returned to surrounding through the casing of equipment.

After transformation, the heat balance can be presented in form of a coefficient of heat consumption with reference to 1 kg of water evaporated. The value of such a coefficient consists of the heat needed: for water evaporation for heating of the air and its content of vapour supplied to



the drier, for heating of material and its water content received from the drier (without change of the state), for heating of water being evaporated up to steam point and the vapour formed up to the temperature of the outlet air. Final value represents the losses of heat to surrounding through the casing of drier.

Presented that way coefficient  $q_{gros}$  can be divided into two components:

$$q_{gros} = q_{net} + q_{losses}$$

The value of  $q_{losses}$  depends on external factors and varies according to the environmental temperature of drier as well as to temperature and weather conditions outside of the building.

The value of  $q_{net}$  characterizes distribution of heat in the drying process and varies within the slight range for particular drier working at steady conditions. Analysis of particular elements of the component shows that the value of heat needed for heating of the product being dried is variable however, such a value is negligible comparing with  $q_{net}$  as a whole. This fact enables the simplification of  $q_{net}$  relationship and its plotting.

## DIE VEREINFACHTE METHODE DER BESTIMMUNG DER WARMEVERBRAUCHES BEI DER TROCKNUNG

A. STRAWIŃSKI — Polen

### Z u s a m m e n f a s s u n g

Die Wärmebilanz der Trocknungsanlage kann man in der Form der Gleichung vorstellen. Auf einer Seite dieser Gleichung befinden sich folgende Positionen der Wärme: die mit dem Heizelement eingetragene Wärme, die Wärme in der Gestalt der elektrischen Energie zum Antrieb des Ventilators bzw. der Einrichtungen zur Übertragung des Materials und die Wärme die mit dem getrockneten Material und trockender Luft eingeführt ist. Auf die zweite Seite der Gleichung kommen: die Wärme, welche mit dem Heizelement, dem getrockneten Material und der (mit Dunst) angefeuchteten Luft abgeführt ist und die Wärme die durch Umbau zur Umgebung abgegeben wird. Dieselbe Bilanz nach der entsprechenden Umgestaltung kann man in der Form des Koeffizienten des Wärmeverbrauches auf 1 kg des abgedampften Wassers vorstellen, auf welchen sich zusammensetzen: die benötigte Wärme zum Abdampfen des Wassers zur Erwärmung der Luft und des mit ihr zur Trocknungsanlage eingeführten Dampfes, für Erwärmung des Materials und des sich in ihm befindenden Wassers in der Menge, die von der Trocknungsanlage ohne Veränderung des Zustandes abgeführt ist, der benötigten Wärme zur Erwärmung des abgedampften Wassers bis Dampftemperatur und des davon entstehenden Dampfes von der Dampftemperatur bis Abfluglufttemperatur. Die schliessende Grösse bilden die Verluste zur Umgebung über den Umbau der Trocknungsanlage.

In dieser Weise vorgestellter Koeffizient, als  $q_{Brutto}$  bezeichnet, darf man in zwei Teilen einteilen:

$$q_{Brutto} = q_{Netto} + q_{Verl}$$

Die Grösse  $q_{Verl}$ , auf welche die Aussenelemente Einfluss ausüben, ist in Zusammenhang mit Temperatur in der Umgebung der Trocknungsanlage und auch mit Temperatur und atmosphärischen Bedingungen ausser dem Gebäude veränderlich.

Die Grösse  $q_{Netto}$  schildert die Einteilung der Wärme in dem Trocknungsverfahren und ist in kleinem Abstand veränderlich für die bestimmte Trocknungsanlage, die mit dem bestimmten Regim arbeitet. Die Analyse der einzelnen Teile dieses Koeffizienten zeigt, dass die benötigte Wärme zur Erwärmung des trockneten Materials eine veränderliche Grösse, doch kleine im Verhältnis zu dem  $q_{Netto}$  ist. Diese Feststellung ermöglicht die Vereinfachung des Zusammenhanges für  $q_{Netto}$  und seine graphische Darstellung.