

Prof. STANISŁAW NIEWIADOMSKI

MASZYNOZNAWSTWO CHEMICZNE

Rozdział XIII

SUSZARNIE



WARSZAWA

1 9 4 9

NAKŁADEM AKADEMICKIEJ SPÓŁDZIELNI WYDAWNICZEJ

Prof. STANIŚŁAW NIEWIADOMSKI

MASZYNOZNAWSTWO CHEMICZNE

Rozdział XIII

SUSZARNIE



66.02

WARSZAWA

1 9 4 9

NAKŁADEM AKADEMICKIEJ SPÓŁDZIELNI WYDAWNICZEJ

WOL STAFFS AND THE WINDMILL

MASSZYNOZNAWSTWO



Wydawnictwo

ZUSKAZANIE



965



WARSZAWA

AKADEMIA WYDZIAŁU CHEMII I WYDZIAŁU FIZYKI

1950K14/16.

SPIS RZECZY

Suszarnie	strona
§ 1. Wiadomości wstępne.....	1
§ 2. Czas i szybkość suszenia.....	5
§ 3. Klasyfikacja suszarni.....	10
§ 4. Wilgotność, ciężar właściwy i entalpia powietrza	17
§ 5. Kierunek naturalny prądu powietrza i gazów w su- szarni.....	21
§ 6. Suszarnie komorowe i szafkowe.....	26
§ 7. Suszarnie tunelowe.....	33
§ 8. Suszarnie taśmowe i grabkowe.....	37
§ 9. Suszarnie bębnowe.....	40
§ 10. Suszarnie walcowe.....	46
§ 11. Suszarnie rozpryskowe.....	51
§ 12. Suszarnie próżniowe.....	58
§ 13. Analityczna metoda obliczania suszarni.....	62
§ 14. Graficzna metoda obliczania suszarni.....	75

§ 1. Wiadomości wstępne.

W wielu gałęziach przemysłu zachodzi potrzeba usuwania cieczy, głównie wody, z ciał wilgotnych lub z roztworów. Do tego celu są stosowane metody mechaniczne jak wirowanie, filtrowanie, wyżymanie i prasowanie, chemiczne i fizyko-chemiczne jak adsorbcja, pochłanianie przy pomocy chlorku wapnia, kwasu siarkowego i innych związków chemicznych oraz metody cieplne jak wyparka i suszenie.

Wyparkę, z którą zapoznaliśmy się w rozdziale X "Aparaty wyparne" stosujemy gdy chodzi o zagęszczanie roztworów ciał stałych przez usunięcie dużej ilości cieczy, suszenie zaś -gdy należy usunąć wilgoć znajdującą się w stosunkowo małej ilości w ciałach stałych, ciekłych lub gazowych. I w jednym i w drugim przypadku usuwanie wilgoci zachodzi przez jej odparowanie kosztem energii cieplnej dostarczonej z zewnątrz. Ogólny rozchód ciepła na usunięcie 1 kg cieczy jest jednak w aparatach wyparnych, a szczególnie w wyparce wielodziałowej, znacznie mniejszy niż w urządzeniach suszarnianych.

Suszenie jest operacją technologiczną bardzo drogą. Koszt usunięcia 1 kg wody przy pomocy suszenia jest znacznie większy niż przy pomocy innych sposobów cieplnych jak wyparka lub destylacja, nie mówiąc już o sposobach mechanicznych. Z tego powodu, dla obniżenia kosztów oddzielenia cieczy od ciała stałego, bardzo wilgotne substancje poddawane bywają przed suszeniem różnym wstępnym operacjom jak cedzenie, odwirowywanie, wyżymanie i t p., przy pomocy których ilość cieczy, przeznaczona do usunięcia podczas suszenia, doprowadzona jest do minimum. Jak wielkie znaczenie ma wstępne usuwanie wilgoci tanimi mechanicznymi sposobami widać z następującego przykładu.

Przykład. Obliczyć ile kg. wody należy odparować z $G_1 = 100\text{kg}$ cia-

Ia stałego, aby obniżyć jego wilgotność z $b_1=80\%$ do $b_2=5\%$.
Jak wielką oszczędność otrzymamy na suszeniu, jeżeli obniżymy przy pomocy wirowania pierwotną wilgotność ciała 1) o 10% i 2) do 25%.

Rozwiązanie, Ilość kg substancji suchej wynosi

$$G_s = G_1 \left(1 - \frac{b_1}{100}\right) = 100 \left(1 - \frac{80}{100}\right) = 20 \text{ kg}$$

Po obniżeniu wilgotności ciała do $b_2 = 5\%$ jego ciężar wynosi

$$G_2 = \frac{G_s}{1 - \frac{b_2}{100}} = G_1 \cdot \frac{100 - b_1}{100 - b_2} = 100 \cdot \frac{100 - 80}{100 - 5} = 21,05$$

Wobec tego należy odparować

$$W = G_1 - G_2 = 100 - 21,05 = 78,95 \text{ kg wody}$$

Jeżeli obniżymy przez odwirowanie wilgotność ciała o 10% t.j.z

$b_1 = 80\%$ do $b_3 = 70\%$, to ciężar ciała zmniejszy się do

$$G_3 = G_1 \frac{100 - b_1}{100 - b_3} = 100 \frac{100 - 80}{100 - 70} = 66,67 \text{ kg}$$

W suszarni wskutek tego należy usunąć

$$66,67 - 21,05 = 45,62 \text{ kg wody}$$

oszczędność więc wyniesie $\frac{78,95 - 45,62}{78,95} \cdot 100 = 42,2\%$

Jeżeli wilgotność ciała obniżymy przez wirowanie do $b_4 = 25\%$, to ciężar jego zmniejszy się do

$$G_4 = G_1 \cdot \frac{100 - b_1}{100 - b_4} = 100 \cdot \frac{100 - 80}{100 - 25} = 26,67 \text{ kg}$$

W suszarni w tym przypadku należy odparować

$$26,67 - 21,05 = 5,62 \text{ kg wody}$$

a, oszczędność wyniesie $\frac{78,95 - 5,62}{78,95} \cdot 100 = 92,9\%$

Widzimy więc, że zmniejszenie wilgotności pierwotnej ciała na drodze mechanicznej tylko o 10% daje oszczędność na suszeniu przekraczającą 42%, przy energiczniejszym zaś odwirowaniu lub wyciskaniu oszczędność na suszeniu jest większa.

Wilgotność w ciałach stałych znajduje się albo na ich powierzchni zewnętrznej, albo wewnątrz w porach i drobniutkich (kapilarnych) kanalikach ciał sypkich i porowatych o budowie ziarnistej i włóknistej, albo w komórkach ciał pochodzenia roślinnego i zwierzęcego.

Wilgoć na powierzchni zewnętrznej utrzymuje się wskutek sił adhezji. Paruje ona w każdej temperaturze, jeżeli tylko prężność jej pary jest większa od ciśnienia cząstkowego pary w otaczającym powietrzu. Ciecz znajdująca się wewnątrz ciał stałych, przedostaje się podczas suszenia wskutek dyfuzji i osmozy kanalikami i po przez ścianki komórek, które dla wody i pary wodnej są przenikliwe, na powierzchnię ciała, gdzie następuje jej parowanie.

Zjawisko parowania wilgoci z powierzchni zewnętrznej ciała objaśnić można w sposób następujący. Dookoła ciała wilgotnego, znajdującego się w strumieniu powietrza lub jakiegoś innego suszącego się gazu, wytwarza się wskutek działania sił adhezji, cienka nieruchoma warstewka, oddzielająca wilgotną powierzchnię ciała od suszącego powietrza. Grubość δ tej warstewki zależy od prędkości strumienia powietrza lub gazu. Ze wzrostem prędkości grubość warstewki zmniejsza się. Powierzchnia wewnętrzna jej, przylegająca do ciała wilgotnego, jest nasycona oparami cieczy, której prężność cząstkowa na tej powierzchni równa się prężności pary w temperaturze panującej na powierzchni ciała. Im dalej od ciała wilgotnego tym prężność cząstkowa pary jest mniejsza, tak że na powierzchni odgraniczającej warstwę nieruchomą od powietrza suszącego równa się prężności cząstkowej pary w tym powietrzu.

Cząsteczki pary drogą dyfuzji, wywołanej różnicą ciśnień, przechodzą przez nieruchomą warstewkę z jednej jej strony na drugą, gdzie porywane są przez strumień powietrza lub suszącego gazu i unoszone dalej. Na ich miejsce wskutek parowania wydzielają się na powierzchni wilgotnego ciała nowe cząsteczki, które jak i poprzednie przechodzą przez nieruchomą warstwę i są unoszone przez suszące powietrze.

Zjawisko opisane przed chwilą można zilustrować wykresom podanym na rysunku 1. Linia OG jest to wilgotna powierzchnia suszonego ciała, linia AB jest powierzchnią rozgraniczającą nieruchomą warstewkę od suszącego powietrza. Odcinek OC przedstawia sobą prężność pary na wewnętrznej powierzchni, a odcinek AD - prężność pary na zewnętrznej powierzchni nieruchomej warstwy. Linia CD symbolizuje ciśnienie pary wewnątrz nieruchomej warstwy, odcinek AB przedstawia ciśnienie atmosferyczne (barometryczne), odcinek AD ciśnienie cząstkowe pary w suszącym powietrzu, a odcinek DB - ciśnienie cząstkowe powietrza. Jeżeli suszenie zachodzi w tej samej objętości powietrza przez pewien okres czasu, to w miarę jak wilgoć paruje ciśnienie cząstkowe pary w powietrzu wzrasta, wskutek czego zmniejsza się różnica ciśnień na obu granicznych powierzchniach nieruchomej warstwy. Suszenie przerywa się gdy ciśnienie cząstkowe pary w suszącym powietrzu (linia AF) jest równe ciśnieniu pary na powierzchni ciała wilgotnego (linia OC), albowiem wtedy nie może zachodzić dyfuzja cząsteczek pary po przez warstewkę graniczną, gdyż różnica ciśnień cząstkowych pary po obu stronach tej powierzchni jest równa zeru.

Ze wzrostem prędkości suszącego powietrza lub innego gazu

grubość nieruchomej warstewki granicznej, jak było zaznaczone poprzednio jest mniejsza, wskutek czego cząsteczki wilgoci mają do przebycia krótszą drogę. Tym się tłumaczy dlaczego intensywność suszenia wzrasta ze wzrostem prędkości powietrza.

Gdy prężność cząstkowa pary nad powierzchnią ciała, zawierającego wilgoć jest równa prężności pary nasyconej w tej samej temperaturze, to ciało powyższe nazywają wilgotnym, jeżeli zaś jest mniejszą od tego ciśnienia to ciało nosi nazwę hygroskopijnego. W tym ostatnim przypadku ciało wciąga wilgoć z otaczającego go powietrza.

Ciało zwykle jest wilgotnym, gdy zawiera dostatecznie dużo cieczy, a hygroskopijnym, gdy ilość cieczy w nim jest mała. Procentowa zawartość cieczy, powyżej której ciało pozostaje wilgotnym, a poniżej hygroskopijnym, nosi nazwę punktu hygroskopijnego.

Podczas suszenia, jeżeli to nie jest konieczne ze względów technologicznych, nie należy obniżać zawartości wilgoci w materiałach suszonych poniżej punktu hygroskopijnego, albowiem ciała przesuszone będą pochłaniać wilgoć z otoczenia, aż wartość w nich cieczy nie zbliży się do wilgotności odpowiadającej punktowi hygroskopijnemu. Ciepło więc zużyte na nadmierne wysuszenie materiału zostanie niepotrzebnie stracone. Jeżeli z jakichś powodów potrzeba usunąć z ciała wilgoć poniżej jego punktu hygroskopijnego, to należy go po wysuszeniu przechowywać w hermetycznie zamkniętych naczyniach.

§ 2. Czas i szybkość suszenia.

Najważniejszym zagadnieniem, które trzeba wyjaśnić przy

obliczaniu wszelkiego rodzaju urządzeń, przeznaczonych do suszenia jest czas potrzebny na wysuszenie danej substancji oraz związana z tym szybkość suszenia. Tylko po ustaleniu szybkości suszenia w określonych warunkach można przeprowadzić obliczenia cieplne i energetyczne i ustalić wydajność suszarni.

Szybkością suszenia nazywamy ilość kg wilgoci odparowanej z 1 m² ogólnej powierzchni wilgotnej materiału w przeciągu 1 godziny. Jest ona wprost proporcjonalna do ilości wody odparowanej oraz odwrotnie proporcjonalna do powierzchni wilgotnej ciała i czasu w przeciągu którego została ta ilość wody odparowana.

Oznaczając przez

U - szybkość suszenia w $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$

W - ilość kg odparowanej wody

τ - czas w godzinach

b_1 - wilgotność początkową ciała w % wagowych

b_2 - " " " " " " " "

G_1 - ciężar ciała wilgotnego przed suszeniem

G_2 - " " " " " " " "

F - powierzchnia ogólna suszenia w m²

G_s - ilość kg suchej substancji w suszonym materiale

będziemy mogli napisać, że

$$U = \frac{1}{F} \cdot \frac{dW}{dt}$$

lub dla średniej szybkości U_{sr}

$$(1) \quad U_{\text{sr}} = \frac{W}{F \cdot \tau}$$

Układając bilans suchej substancji przed i po wysuszeniu.

otrzymujemy równanie

$$G_s = G_1 \left(1 - \frac{b_1}{100}\right) = G_2 \left(1 - \frac{b_2}{100}\right)$$

skąd możemy obliczyć ilość kg odparowanej podczas suszenia wilgoci

$$W = G_1 - G_2 = G_s \left(\frac{100}{100-b_1} - \frac{100}{100-b_2} \right) = G_s \cdot \frac{b_1-b_2}{A}$$

gdzie

$$A = \frac{(100-b_1)-(100-b_2)}{100}$$

wobec czego

$$(2) \quad U_{\text{sr}} = G_s \frac{b_1-b_2}{A \cdot F \cdot \tau}$$

Zastanawiając się nad wielkościami wchodzącymi w skład powyższego wzoru przychodzimy do przekonania, że w miarę trwania procesu suszenia zmniejsza się wilgotność końcowa materiału b_2 , wzrasta współczynnik A i czas τ , wskutek czego szybkość suszenia nie pozostaje stałą, ale zmienia się z biegiem czasu, jak to wynika ze wzoru (2).

Dokładne badania procesu suszenia potwierdzają powyższy wniosek. Dopóki podczas suszenia odparowywana jest wilgoć, utrzymująca się na powierzchni suszonego ciała wskutek sił adhezji, szybkość suszenia jest stałą, jeżeli tylko warunki suszenia, to jest temperatura, wilgotność i prędkość powietrza suszącego, są przez cały czas jednakowe. Gdy zaś w którymkolwiek miejscu wilgoć z powierzchni materiału suszonego zniknie, szybkość suszenia zmniejsza się mniej więcej równomiernie aż do momentu, gdy ciecz nie zostanie całkowicie odparowana z powierzchni materiału. Zaczynając od tej chwili szybkość suszenia silnie spada.

Na rysunku 1a podany jest typowy wykres przebiegu suszenia jakiegoś wilgotnego materiału. Na osi poziomej tego wykresu

odłożona jest wilgotność, a na pionowej szybkość suszenia. Z wykresu widać, że dopóki wilgotność materiału była większa od 7,9% wysychał on ze stałą szybkością, gdy zaś jego wilgotność obniżyła się poniżej 7,9%, proces suszenia odbywał się coraz wolniej. Dalsze zahamowanie tego procesu nastąpiło, gdy materiał osiągnął wilgotność 3,8%.

Podczas pierwszego okresu suszenia (linia AB) na wykresie wilgoć pokrywała całą powierzchnię materiału suszonego, parowanie zachodziło tak jak ze swobodnej powierzchni cieczy, zgodnie więc ze wzorem Daltona

$$U_{\text{sr}} = \frac{W}{F \cdot T} = \alpha \cdot \frac{p_1 - \varphi p_2}{B}$$

gdzie p_1 - jest to prężność pary w temperaturze cieczy

p_2 - jest prężnością pary w temperaturze powietrza

φ - wilgotność powietrza

B - ciśnienie barometryczne

α - współczynnik zależny od prędkości powietrza.

Dla stałych warunków suszenia wszystkie powyższe wielkości są stałe wskutek czego stałą powinna być i szybkość suszenia, co właśnie wynika z wykresu (linia AB).

Podczas drugiego okresu suszenia (linia BC na wykresie) wilgoć z powierzchni materiału, w miarę trwania procesu, stopniowo znika, parowanie więc zachodzi z coraz mniejszej powierzchni, a że dyfuzja wilgoci z wnętrza ciała jest słaba, szybkość suszenia jest coraz mniejsza, albowiem zmniejsza się powierzchnia parowania.

Podczas trzeciego okresu (linia CD) wilgoci na powierzchni suszonego ciała nie ma, gdyż w miarę jak przedostaje się ona, na skutek dyfuzji z wnętrza ciała na jego powierzchnię, następuje jej parowanie. Proces suszenia w trzecim okresie za-

chodzi coraz wolniej w skutek tego że szybkość dyfuzji, wobec wyczerpywania się wilgoci wewnątrz ciała i spadku z tego powodu różnicy koncentracji, jest coraz. mniejsza.

Na szybkość suszenia, zgodnie ze wzorem Daltona i z wynikami badań, mają wpływ wilgotność powietrza, jego prędkość i temperatura. Ze wzrostem wilgotności powietrza szybkość suszenia w pierwszym i drugim okresach zmniejsza się. Z powiększeniem się zaś jego prędkości, szybkość suszenia w obu pierwszych okresach wzrasta, wskutek zmniejszenia się grubości warstewki granicznej. Ani wilgotność powietrza ani jego prędkość nie mają wpływu na szybkość suszenia w trzecim okresie; albowiem decydujący wpływ na proces suszenia wywiera w tym czasie szybkość dyfuzji cieczy na powierzchnię ciała. Wzrost temperatury ciała suszonego przyspiesza w nim dyfuzję cieczy, gdyż zmniejsza się jej lepkość, wskutek czego wzrasta szybkość suszenia również i w trzecim okresie. Przyrost temperatury powietrza suszącego i ciała suszonego wpływa dodatnio na szybkość suszenia we wszystkich okresach, gdyż powiększa się różnica pomiędzy prężnością pary, wydzielającej się z suszonego materiału, a ciśnieniem cząstkowym pary w powietrzu wskutek czego wzrasta szybkość suszenia.

Oprócz rozpatrzonych trzech najważniejszych czynników na szybkość suszenia mają również wpływ

- a) struktura wewnętrzna oraz własności fizyczne i chemiczne materiału suszonego,
- b) kształt i wymiary jego kawałków,
- c) początkowa i końcowa wilgotność materiału suszonego,
- d) intensywność mieszania materiału podczas suszenia,
- e) konstrukcja suszarni.

materiału suszonego w tych suszarniach zmienia się w zależności od miejsca, które zajmuje on, przesuwając się w suszarni. Suszarnie o działaniu ciągłym dają materiał wysuszony w sposób jednorodny, zużywają mniej ciepła oraz wymagają mniejszej obsługi niż suszarnie okresowe. Natomiast są bardziej skomplikowane i znacznie droższe. Stosowane są do suszenia materiałów o mniej więcej jednakowym składzie i wymiarach, jak na przykład do kleju stolarskiego, wyrobów ceramicznych, papieru, roztworów ciał stałych, owoców, jarzyn i t. p. Zaliczają do nich suszarnie tunelowe, taśmowe, korytkowe, słupowe i rozpryskowe.

Suszarnie o działaniu okresowym pracują z przerwami.

Materiał wilgotny doprowadza się do nich, a wysuszony odprowadza się w dużych odstępach czasu. Bardzo często ładuje się wilgotny materiał przed rozpoczęciem suszenia, a wyładowuje się wysuszony po zakończeniu procesu. Stan materiału suszonego zależy w tego rodzaju suszarniach nie tylko od miejsca położenia jego w suszarni, ale również i od czasu.

Suszarnie o działaniu okresowym zużywają dużo ciepła. Początkowo co prawda gorące powietrze szybko pochłania duże ilości pary i sprawność suszarni wtedy jest duża, ale w miarę wysychania materiał coraz wolniej oddaje wilgoć, szybkość suszenia zmniejsza się, tak że ogólna sprawność jest mała. Materiał wysycha w suszarniach tego typu ogólnie nierównomiernie. Ta część jego, która leży blisko kanału, przez który dopływa gorące powietrze, oddaje wilgoć prędzej niż część leżąca przy kanale odlotowym. Wskutek tego albo wyładowuje się suszarnię, gdy część materiału jeszcze nie jest dostatecznie wysuszona, albo przedłuża się czas suszenia, co powoduje przesuszenie

części materiału, zmniejsza wydajność suszarni i obniża jej sprawność.

Suszarnie periodyczne są proste i z tego powodu tanie. Łatwo je dostosować do różnych warunków pracy, oraz łatwo w nich kontrolować sam proces suszenia. Stosowane są one do suszenia materiałów, których wilgotność końcowa jest ściśle określona i których wobec tego nie należy przesuszać. Do tej grupy zaliczają suszarnie komorowe, szatkowe oraz próżniowe. Według sposobu doprowadzania ciepła, suszarnie można podzielić na trzy grupy.

- 1) Suszarnie z bezpośrednim działaniem powierzchni ogrzewalnej.
- 2) Suszarnie w których ciepło doprowadzane jest z suszącym powietrzem lub innym gazem.
- 3) Suszarnie w których stosowane są oba powyższe sposoby doprowadzania ciepła.

Do pierwszej grupy zaliczana jest suszarnia przedstawiona schematycznie na rysunku 2, przeznaczona do suszenia soli kuchennej, saletry, węgla kostnego i innych materiałów, ogrzewana gazami spalinowymi z kotłowni lub z jakiegoś innego pieca. Posiada ona płytkę ceramiczną lub płytkę prostokątna nisę metalową A, pod którą wymurowane są kanały dymowe B. Gazy spalinowe z kotła parowego lub z jakiegoś paleniska dopływają kanałami B₁, ogrzewają płytę, na której jest rozłożony materiał suszony C, i odchodzą do komina kanałami B₂.

Więcej nowoczesną suszarnią o bezpośrednim działaniu powierzchni ogrzewalnej jest suszarnia przedstawiona na rysunku 3, stosowana przy fabrykacji brykietów do suszenia bardzo wilgotnego węgla drobnego. Suszarnia ta składa się z kilkunastu

lub więcej nieruchomych półek o podwójnych ściankach, ogrzewanych parą, która jest doprowadzana z pionowych przewodów parowych A rurkami B. Suszony węgiel przesypywany jest z półki na półkę przy pomocy grabi C, osadzonych na wale D i obracających się wraz z tym wałem. Zęby grabi tak są ustawione, że węgiel na jednych półkach przesuwany jest od środka do ich zewnętrznych brzegów, gdzie znajdują się w półkach otwory E, którymi on spada na półki dolne. Na innych grabie przesuwają węgiel od brzegów zewnętrznych do środka, gdzie on spada niżej przez otwory E₁. Para ogrzewająca przebywa pomiędzy donkami półek krętą drogą i odchodzi w postaci skroplin rurkami F do pionowych przewodów G.

Suszarnie w których ciepło dostarczane jest z suszącym powietrzem lub z gazami spalinowymi stanowią najwięcej rozpowszechnioną grupę. Powietrze i gazy spalinowe nie tylko nasycają się w tych suszarniach parą, ale, obniżając swoją temperaturę, dostarczają potrzebne do odparowania wilgoci ciepło. Szeregi przykładów tego rodzaju suszarni będą rozpatrzone w następnych paragrafach.

Według rodzaju źródła ciepła suszarnie można podzielić na następujące 5 grup

- 1) Suszarnie z ogrzewaniem parowym
- 2) " " " " ogniowym
- 3) " " " " powietrznym
- 4) " " " " cieciami
- 5) " " " " elektrycznym

Ogrzewanie parowe posiada szereg zalet, omówionych w rozdziale X. "Urządzenia grzejne" i dlatego jest chętnie stosowane w suszarniach szczególnie w tych przypadkach, gdy jest do roz-

porządzenia para odłotowa z silników parowych albo z aparatów wyparnych, lub gdy chodzi o czystość. Para może oddać swoje ciepło albo bezpośrednio ogrzewając suszony materiał, leżący na powierzchni ogrzewalnej (rysunek 3), albo ogrzewając powietrze lub inne gazy przy pomocy kaloryferów, umieszczonych w samej suszarni lub przed nią. (rys. 7, rys. 8 i inne). Poza tym wyłącznie parą ogrzewane są suszarnie walcowe i próżniowe.

Ogrzewanie gazami spalinowymi ze specjalnych palenisk (ogrzewanie ogulowe) lub gazami spalinowymi z kotłów parowych i pieców stosowane jest w suszarniach, przeznaczonych do suszenia wielkich ilości materiałów, odpornych na temperaturę wysokości $^{\circ}\text{C}$. Ogrzewanie ogniowe stosuje się do suszenia w suszarniach bębnowych siarczanu amonu, saletry amonowej, kaolinu, półfabrykatów przemysłu cementowego i ceramicznego, wysłodków buraczanych i innych. Gazy spalinowe stosowane są nie tylko do ogrzewania bezpośredniego, ale również i do pośredniego, ogrzewając powietrze w specjalnych kaloryferach, omawianych w § 16 rozdziału X "Urządzenia grzejne".

Do zalet ogrzewania suszarni gazami spalinowymi zaliczamy 1) możliwość wyzyskania ciepła odpadowego z kotłów parowych i pieców oraz 2) wysoką temperaturą, która potrzebna jest, w szczególnych przypadkach, do suszenia niektórych materiałów. Do wad należy odnieść zanieczyszczenie suszonych ciał sadzą, niebezpieczeństwo pożaru i inne.

Powietrze, stosowane do ogrzewania suszarni, nie jest pierwotnym lecz wtórnym źródłem ciepła. Podgrzewane jest ono w specjalnych kaloryferach parowych lub ogniowych, umieszczonych albo wewnątrz suszarni, albo oddzielnie. Chociaż ogrzewanie powietrzem jest więcej skomplikowane niż ogrzewanie gazami

spalinowymi lub parą, stosuje się jednak częściej, albowiem powietrze podgrzane łatwiej wchłania wilgoć, nie zanieczyszcza suszonych produktów i łatwo go można ogrzać do temperatur 40° - 110°C. zwykle stosowanych w praktyce suszarnianej.

Ogrzewanie cieczami najczęściej przy pomocy gorących olejów mineralnych, stosowane jest w suszarniach bardzo rzadko, tam gdzie wymagają tego specjalne warunki.

Ogrzewanie elektryczne stosowane jest w suszarniach laboratoryjnych, gdy chodzi o dokładną regulację temperatury, w przemyśle zaś tylko w wyjątkowych wypadkach w małych stosunkowo urządzeniach.

Według kierunku ruchu materiału suszonego i powietrza suszącego można podzielić suszarnie na następujące 3 grupy

- 1) Suszarnie współprądowe
- 2) " przeciwprądowe
- 3) " o prądach skrzyżowanych.

W suszarniach współprądowych materiał, zawierający najwięcej wilgoci i posiadający najniższą temperaturę, spotyka przy wejściu do suszarni powietrze lub gazy spalinowe o najmniejszej wilgotności i najwyższej temperaturze wskutek czego odrazu intensywnie traci wilgoć. Przy wyjściu z suszarni, posiadając wyższą temperaturę i stosunkowo mało wilgoci, styka się z powietrzem o większej wilgotności i niższej niż na początku temperaturze.

Suszarnie współprądowe stosuje się do suszenia materiałów, które nie wytrzymują w suchym stanie wysokich temperatur, jak na przykład wysłodki buraczane w cukrowniach, sole potasowe i superfosfaty. Stosują je również do materiałów mało higroskopijnych lub do takich, które w stanie wilgotnym poddają się

łatwiej intensywnemu suszeniu niż w stanie podsuszonym.

Ze względu na racjonalne wykorzystanie ciepła suszarnie współprądowe ustępują przeciwnym.

Suszarnie przeciwnym są stosowane do suszenia materiałów, które nie znoszą energicznego suszenia oraz są odporne w stanie suchym na działanie stosunkowo wysokich temperatur. W suszarniach przeciwnym wilgotny i zimny materiał spotyka się, wchodząc do suszarni, z powietrzem (lub gazami spalinowymi) o dużej wilgotności i stosunkowo niewysokiej temperaturze, wskutek czego powoli się ogrzewa i paruje. Posuwając się w głąb suszarni, podnosi on stopniowo swoją temperaturę i wysycha pod działaniem coraz gorętszego i suchszego powietrza. Przy suszeniu niektórych materiałów, owoców, grzybów i jarzyn ważne jest, aby proces suszenia nie był szybszy niż ruch wilgoci w materiale wskutek dyfuzji. Zbyt szybkie suszenie powoduje wyschnięcie zewnętrznej tkanki i, co na tym idzie niemożność przeniknięcia wilgoci z wnętrza. Wyszuszone tkanka zewnętrzna przestaje być przepuszczalna, a wzrost wewnątrz ciśnienia powoduje jej pęknięcie, co ujemnie wpływa na wygląd suszu i obniża jego wartość rynkową. Poza tym przez pęknięcia dostają się bakterie, które powodują psucie się suszu. Suszenie powolne w suszarniach przeciwnym jest najodpowiedniejsze dla tego rodzaju materiałów.

Suszarnie o prądach krzyżujących się stosowane są do suszenia materiałów mało wrażliwych na wysokie temperatury zarówno w stanie wilgotnym jak i suchym oraz do takich, które dobrze wytrzymują intensywne suszenie.

Według cech konstrukcyjnych suszarnie można podzielić na:

- 1) Suszarnie otwarte

2	Suszarnie	komorowe
3	"	szafkowe
4	"	tunelowe
5	"	taśmowe
6	"	szybowe
7	"	słupowe
8	"	bębnowe
9	"	walcowe
10	"	próżniowe
11	"	rozpryskowe
12	"	różne inne

Oczywiście każdą suszarnie można jednocześnie zaliczyć do kilku z wymienionych wyżej grup. Naprzykład suszarnię przedstawioną na rysunku 3 można scharakteryzować jako suszarnię półkową o działaniu ciągłym, ogrzewaną parą przez powierzchnię ogrzewalną, otwartą o prądach krzyżujących się.

§ 4. Wilgotność, ciężar właściwy i entalpia powietrza.

Powietrze atmosferyczne z punktu widzenia suszarnictwa składa się z powietrza suchego i pary wodnej. Im więcej znajduje się w nim pary tym jest ono wilgotniejsze. Zawartość jednak pary wodnej w powietrzu nie może być większą od tej, przy której ciśnienie cząstkowe pary jest równe prężności jej w temperaturze powietrza. Powietrze, zawierające największą możliwą w danej temperaturze ilość pary wodnej, nazywamy nasyconym.

W fizyce i technice rozróżniamy wilgotność powietrza bezwzględną i względną. Wilgotnością bezwzględną nazywamy ilość gramów pary wodnej zawartej w 1 m^3 powietrza. Wilgo-



tnością względną zaś nazywamy stosunek ilości pary znajdującej się w powietrzu o określonej temperaturze do ilości pary wodnej, która by powietrze w tej temperaturze nasycała.

Oznaczając przez γ_{H_2O} ciężar właściwy w $\frac{kg}{m^3}$ pary wodnej, znajdującej się w powietrzu, a przez γ_n $\frac{kg}{m^3}$ ciężar właściwy pary, która w danej temperaturze powietrze nasyca, będziemy mogli napisać, że wilgotność względna powietrza φ równa się

$$\varphi = \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_n} \text{ lub } \varphi = 100 \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_n} \%$$

Dla suszarnictwa większe znaczenie posiada wilgotność względna, albowiem, gdy jest ona mniejsza od 1 (lub od 100%) powietrze, będąc nienasyconym, nadaje się do suszenia, gdyż może wchłaniać parę.

Stosując do pary wodnej równanie Clapeyrona, można łatwo udowodnić, że wilgotność względna φ równa się stosunkowi ciśnienia cząstkowego P_{H_2O} pary, znajdującej się w powietrzu, do prężności pary P_n , nasycającej powietrze w danej temperaturze, albowiem

$$P_{H_2O} \cdot \frac{1}{\gamma_{H_2O}} = RT \quad \text{oraz} \quad P_n \cdot \frac{1}{\gamma_n} = RT$$

skąd

$$\varphi = \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_n} = \frac{P_{H_2O}}{P_n}$$

oraz

$$P_{H_2O} = \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_n} \cdot P_n \quad \text{i} \quad \gamma_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_n} \cdot \gamma_n = \varphi \gamma_n$$

Ciężar właściwy γ_p suchej części powietrza wilgotnego zależy, jak przekonamy się niżej, od temperatury, wilgotności i ciśnienia barometrycznego B, gdyż stosując równanie Gay-Lussac'a możemy napisać

$$\gamma_p = \gamma_{273} \cdot \frac{P}{760} \cdot \frac{273}{T}$$

gdzie ciśnienie cząstkowe powietrza P_p równa się $B - P_{H_2O}$ wobec

czego

$$\gamma_p = 1,293 \frac{B - P_{H_2O}}{760} \cdot \frac{273}{273+t} = \delta (B - P_{H_2O}) \quad (3)$$

albowiem ciężar właściwy powietrza w normalnych warunkach wynosi

$$\gamma_p = 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{a} \quad \delta = f(t) = \frac{1,293}{760} \cdot \frac{273}{273+t} \quad (4)$$

Wartości liczbowe δ w zależności od temperatury podane są w tabelicy I.

tablica I

Wartości liczbowe $\delta = \frac{1,293}{760} \cdot \frac{273}{273+t}$

t	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$10^6 \delta$	1700	1669	1641	1584	1532	1482	1437	1394	1353	1314	1278	1244

Ilość gramów pary wodnej przypadającej na 1 kg suchego powietrza wynosi

$$d = \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_p} \cdot 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

Ciężar właściwy gazu doskonałego pod ciśnieniem p i temperaturze t wynosi

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \frac{p}{760} \cdot \frac{273}{273+t}$$

Traktując parę jako gaz doskonały i, uwzględniając, że

$$\gamma_0 = \frac{18}{22,4} = 0,804 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \text{ otrzymamy że}$$

$$\gamma_{H_2O} = 0,804 \frac{P_{H_2O}}{760} \cdot \frac{273}{273+t}$$

lub

$$\gamma_{H_2O} = 0,804 \frac{P_{H_2O} \cdot \delta}{1,293} = 0,622 P_{H_2O} \cdot \delta$$

wobec czego

$$d = 622 \frac{P_{H_2O}}{B - P_{H_2O}} \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

lub

$$d = 622 \frac{\psi \cdot P_n}{B - \psi P_n} \cdot \frac{\text{g}}{\text{kg}} = 0,622 \cdot \frac{\psi P_n}{B - \psi P_n} \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \quad (5)$$

Ze wzorów powyższych wynika, że

- 1) ilość pary wodnej przypadającej na 1 kg suchego powietrza przy stałym ciśnieniu barometrycznym zależy tylko od jej ciśnienia cząstkowego
- 2) wobec tego, że ciśnienie cząstkowe pary zależy od wilgotności względnej powietrza i jego temperatury, ilość pary przypadającej na 1 kg suchego powietrza zależy również od tych czynników
- 3) największa zawartość wilgoci w 1 kg suchego powietrza odpowiada wilgotności $\varphi = 1$, to jest całkowitemu nasyceniu powietrza wilgocią.

Entalpia suchego powietrza zależy od jego temperatury i wynosi $i_p = c_p t = 0,24 \cdot t \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$, gdzie $c_p = 0,24 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ jest średnim ciepłem właściwym powietrza w granicach temperatur, spotykanych w suszarnictwie.

Entalpia pary wodnej, znajdującej się w powietrzu, może być z dokładnością dostateczną do celów suszarnictwa obliczona ze wzoru:

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = 595 + 0,47t \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \quad (6)$$

Entalpia powietrza wilgotnego przeliczonego na 1 kg suchego powietrza wynosi

$$I = i_p + \frac{d}{1000} \cdot i_{\text{H}_2\text{O}} = 0,24t + 0,001 \cdot d \cdot (595 + 0,47t) \quad (7)$$

Z równania tego wynika, że entalpia wilgotnego powietrza zależy od jego temperatury i wilgotności.

Ciepło właściwe pary wodnej w granicach temperatur, spotykanych w technice suszarniczej, można przyjmować równym

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 0,47 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Z powyższych bardzo uproszczonych podstaw teoretycznych suszarnictwa można wyciągnąć następujące wnioski

- 1) Prężność pary cieczy zawartej w materiale wilgotnym powinna być większa od ciśnienia cząstkowego pary w suszącym powietrzu (lub w innym suszącym gazie).
- 2) Ciśnienie cząstkowe pary w powietrzu suszącym (lub innym gazie) powinno być mniejsze od prężności pary nasyconej w temperaturze powietrza.
- 3) Ilość powietrza (lub innego gazu), doprowadzona do suszarni, powinna być dostateczna, ażeby po wchłonięciu w postaci pary, odparowanej tam cieczy, wilgotność jego była mniejsza od 1 lub w najgorszym wypadku prawie równa 1 (lub 100%).
- 4) Jeżeli suszarnia ogrzewana jest powietrzem (lub gazami spalinowymi), to ilość ciepła, które ono do suszarni wprowadza, powinna być dostateczna do odparowania i pokrycia wszystkich strat cieplnych.

§ 5. Kierunek naturalny prądu powietrza i gazów w suszarni.

Z fizycznego punktu widzenia działanie suszarni powietrznych i spalinowych jest jednakowe. Suszarnie jednak powietrzne z różnych powodów stosowane bywają częściej niż spalinowe i dlatego będziemy je mieli na myśli w dalszych rozważaniach.

Suszarnie powietrzne składają się zwykle z kaloryfera do podgrzewania powietrza, z komory suszarnianej, gdzie odbywa się suszenie oraz z urządzenia do wytwarzania ciągu. Urządzeniem takim może być wentylator tłoczący lub ssący albo komin. Na rys.4 przedstawiona jest schematycznie suszarnia powietrzna. Powietrze zimne dostaje się od dołu przez przewód A, do kaloryfera parowego, wykonanego z rur żebrowych K, Ogrzewając się,

podnosi się ono do góry i przechodzi przewodem B do komory suszarnianej S, gdzie znajduje się suszony materiał. Tam powietrze, susząc, nawilża się oparami cieczy i wskutek tego obniża swą temperaturę. Wilgotne i oziębione powietrze odchodzi z komory suszarnianej przewodem C. Ruch powietrza w suszarni wywołany jest albo przez wentylator tłoczący ustawiony przed kaloryferem na przewodzie A, albo przez wentylator ssący, ustawiony za komorą suszarnianą na przewodzie C, albo przez konin.

W rozpatrywanej suszarni powietrze doprowadzane jest do komory suszarnianej od góry, a odprowadzane dołem, wskutek czego kierunek jego ruchu w suszarni jest z góry na dół. Istnieje w przemyśle dużo urządzeń suszarnianych, w których ruch powietrza jest odwrotny. Dla prawidłowego działania suszarni ważne jest, aby kierunek jego w komorze suszarnianej był naturalny.

Jeżeli ciężar właściwy powietrza, na skutek procesów zachodzących w suszarni, wzrasta, kierunek naturalny ruchu jest z góry na dół w przeciwnym razie, gdy ciężar właściwy powietrza w suszarni maleje, naturalny kierunek jest z dołu do góry.

W komorze suszarnianej ogrzewanej powietrzem zachodzą jednocześnie dwa procesy fizyczne

- 1) nawilżanie się powietrza oparami cieczy (wody)
- 2) obniżanie się wskutek tego jego temperatury.

Pierwszy z nich wpływa na zmniejszenie się ciężaru właściwego powietrza, albowiem powietrze wilgotne jest lżejsze od suchego. Drugi wpływa na powiększenie się jego ciężaru właściwego, gdyż powietrze zimne jest cięższe od gorącego. Przy jednoczesnym działaniu obu czynników wpływ oziębiania się powie-

trza, jak przekonamy się na rozpatrywanym niżej przykładzie, jest większy niż nawilżania się, wskutek czego ciężar właściwy jego w komorze suszarnianej wzrasta.

Przykład. Powietrze absolutnie suche wchodzi do komory suszarni w temperaturze $t_1 = 80^\circ\text{C}$, gdzie oziębia się do temperatury $t_2 = 40^\circ\text{C}$, zużywając ciepło tylko na odparowanie wody. Obliczyć, nie uwzględniając strat cieplnych, przyrost ciężaru właściwego powietrza.

Rozwiązanie: 1 kg powietrza suchego w warunkach normalnych posiada objętość właściwą $V_0 = 1,293 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$, a w temperaturze 40°C i pod ciśnieniem atmosferycznym

$$V_{40} = v_0(1 + \alpha t) = 1,293 \cdot \left(1 + \frac{40}{273}\right) = 0,887 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Ilość ciepła zużyta przez powietrze na odparowanie wody wynosi

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta t = 1,0,24 \cdot (80 - 40) = 9,6 \text{ kcal}$$

Koszttem tego ciepła zostanie odparowana następująca ilość wody

$$W = \frac{Q}{r} = \frac{9,6}{574} = 0,0167 \text{ kg},$$

gdzie $r = 574 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$ jest ciepłem parowania wody w temperaturze 40°C .

Para nasycona w temperaturze 40°C posiada prężność $P_{\text{H}_2\text{O}} = 54,9 \text{ mm Hg}$ wobec czego prężność powietrza wilgotnego w tej temperaturze wyniesie

$$P_p = B - P_{\text{H}_2\text{O}} = 760 - 54,9 = 705,1 \text{ mm Hg},$$

a objętość jego

$$V = v_{40} \frac{B}{P_p} = 0,887 \cdot \frac{760}{705,1} = 0,956 \text{ m}^3$$

Powietrze wilgotne waży

$$G_w = 1 + 0,0167 = 1,0167 \text{ kg},$$

a w taki razie jego ciężar właściwy wynosi

$$\gamma_w = \frac{G}{V} = \frac{1,0167}{0,956} = 1,070 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ciężar właściwy suchego powietrza w temperaturze $t_1 = 80^\circ\text{C}$ równa się

$$\gamma_1 = \gamma_0 \frac{273}{273+t_1} = 1,293 \frac{273}{353} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Przyrost więc ciężaru właściwego powietrza w suszarni wynosi

$$\Delta \gamma = \gamma_w - \gamma_1 = 1,07 - 1,00 = 0,07 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Trzeba zaznaczyć, że w obliczeniach nie zostały uwzględnione straty ciepła na promieniowanie, przewodnictwo i inne, gdyby je uwzględnić, to przyrost ciężaru właściwego powietrza w suszarni byłby większy.

Z przykładu powyższego wynika, że jeżeli odparowywanie w suszarni zachodzi kosztem ciepła wprowadzonego z powietrzem, to ciężar właściwy jego wzrasta. Inaczej sprawa się przedstawia jeżeli w komorze suszarnianej zainstalowane są kaloryfery, przez które doprowadza się ciepło potrzebne na odparowanie wilgoci i pokrycie strat cieplnych, jak to jest w suszarni przedstawionej na rysunku 8. Wtedy temperatura powietrza w suszarni zmienia się niewiele, a więc jej wpływ na jego ciężar właściwy jest mały, wskutek czego, w miarę wzrostu wilgotności ciężar właściwy powietrza w suszarni jest co raz mniejszy. W tego rodzaju suszarniach kierunek naturalny powietrza w komorze suszarnianej jest z dołu do góry.

Suszarnie w których powietrze lub suszące gazy posiadają ruch nienaturalny działają nieprawidłowo. Jako przykład suszarni źle działającej z powodu niewłaściwego ruchu powietrza w komorze suszarnianej podana jest schematycznie na rysunku 5 suszarnia do grzybów, zbudowana na kilka lat przed wojną na

wzór suszarni niemieckiej firmy B.Schilde przez jedną z polskich fabryk na Pomorzu.

W suszarni tej, przeznaczone do suszenia grzyby, znajdują się na półkach sitowych A, umieszczonych jedna nad drugą w komorze suszarnianej. Powietrze gorące, doprowadzane z góry przez kanał B, dzieli się przegrodami kierowniczymi C z blachy na kilka poziomych strumieni, które, jak przypuszczał konstruktor, będą przepływać pomiędzy półkami na drugą stronę suszarni, zachowując swój kierunek poziomy. Tam wszystkie te poziome strumienie teraz wilgotnego i oziębionego powietrza będą się zbierać, zgodnie z jego przypuszczeniami, w pionowym kanale D i odchodzić z suszarni przewodem E.

W rzeczywistości w suszarni ustalił się inny ruch gazów niż przewidywał konstruktor. Gorące, a więc lżejsze powietrze, po przez półki sitowe wznosiło się odrazu do góry i najkrótszą drogą dążyło do przewodu odlotowego E. Zimne zaś i wilgotne, jako cięższe, opadało na dół, gdzie, wskutek braku odpływu, w dalszym ciągu stygło i wobec tego wydzielalo parę, która osiadała w postaci rosy na leżących tam grzybach. W rezultacie grzyby znajdujące się w górnym lewym rogu komory suszarnianej pozbywały się bardzo prędko prawie całej zawartej w nich wilgoci, wysychając poniżej punktu hygroskopijnego tak, że łatwo je można było rozetrzeć palcami na proszek. Natomiast grzyby znajdujące się w dolnym prawym rogu komory zupełnie nie schły. Po pięciogodzinnym pobycie w suszarni łatwo było, ściskając je w dłoni, wycisnąć zawartą w nich wodę.

Działanie powyższej suszarni można było znacznie poprawić, nadając powietrzu suszącemu kierunek naturalny. W tym celu należało odprowadzić wilgotne powietrze dołem albo w sposób podany na rys. 6a, albo w sposób

podany na rysunku 5. b. Wtedy zniknęła by martwa przestrzeń w prawym dolnym rogu komory i grzyby nie zaparzały by się w tej przestrzeni. Natomiast suszenie na górnych półkach nawet poprawionej suszarni będzie zachodzić prędzej niż na dolnych, ale tego rodzaju wadę posiada wiele nawet dobrych suszarni.

§ 6. Suszarnie komorowe i szafkowe.

Suszarnie komorowe i podobne do nich suszarnie szafkowe przedstawiają sobą komręw której rozłożony jest w sposób luźny, ale równomierny materiał suszony. Powietrze suszące ogrzewane jest w kaloryferze, który może stanowić jedną całość z komorą suszarnianą, albo jest aparatem samodzielnym, obsługującym nie jedną, lecz kilka lub kilkanaście komór.

Na rysunku 7 przedstawiona jest suszarnia komorowa syst. B. Schilde w zastosowaniu do suszenia farb i takich produktów chemicznych, dla których wymagana jest stosunkowo niska lecz dokładnie regulowana temperatura suszenia. Przy niskiej temperaturze konieczny jest kilkakrotny obieg powietrza, gdyż przy jednorazowym przepływie nie zostanie całkowicie wykorzystana jego zdolność do pochłaniania wilgoci. Powietrze uchodzące będzie wskutek tego zawierać dużo ciepła, a mało oparów.

W suszarni syst. B. Schilde zastosowana jest cyrkulacja wewnętrzna. Powietrze świeże wchodzi przez otwór A, regulowany klapą i razem z powietrzem wilgotnym, będącym w obiegu, tłoczona jest przez wentylator śrubowy B do komory suszarnianej. Po drodze przepływa ono przez kaloryfer parowy K, wykonany z kilku lub kilkunastu rur żebrowych, ustawionych poziomo, gdzie ogrzewa się do potrzebnej temperatury. Blachy kierownicze C dzielą suszące powietrze na kilka części i kierują je pomiędzy półki, które są ustawione jedna nad drugą, albo na stałym

rusztowaniu jak na rysunku 7, albo specjalnym wózku.

Półki nie są sitowe, jak w poprzednio rozpatrywanej suszarni do grzybów, lecz wykonane są z blach^{metalowych} lub z dykty. Wskutek tego powietrze przepływa poziomo, susząc leżący na półkach materiał. Powietrze wilgotne, odpływające pionowym kanałem D do góry, jest dzielone nastawną przegrodą E na dwie części. Jedna odchodzi kanałem F na zewnątrz, druga, zasysana przez wentylator B, wraca do obiegu.

Przez zastosowanie cyrkulacji wewnętrznej, zyskuje się dość dużą oszczędność na ciepło, gdyż wilgotność powietrza po jednorazowym przejściu przez suszarnię jest niewielka, a entalpia duża. Poza oszczędnością na parze ogrzewającej, cyrkulacja wewnętrzna jest w niektórych przypadkach stosowana w tym celu, aby proces suszenia nie był zbyt szybki, albowiem, jak było wyjaśnione w § 3, szybkie suszenie jest nie wskazane dla niektórych materiałów. Zawracanie do obiegu powietrza wilgotnego podnosi wilgotność powietrza suszącego, co hamująco wpływa na proces parowania.

Odprowadzanie powietrza wilgotnego górą, z punktu widzenia naturalnego biegu gazów, nie jest rozwiązaniem szczęśliwym. Materiał leżący na dolnych półkach jest z tego powodu w gorszych warunkach i dlatego należy po uruchomieniu suszarni bardzo starannie uregulować przy pomocy śrub G i blach kierowniczych C rozdział powietrza pomiędzy górne i dolne półki.

Rozpatrywana suszarnia B. Schildego działa w sposób periodyczny. Po zakończeniu suszenia półki z wysuszonym materiałem wyjmowane są z komory, a na ich miejsce wsuwane są inne z materiałem wilgotnym. Oczywiście na ładowanie i wyładowanie półek zużywa się pewna stosunkowo znaczna ilość czasu. Komora

przez ten czas jest otwarta, ściany jej stygną, co powiększa straty ciepłne, a więc i rozchód pary na suszenie. Znacznie krótszą jest manipulacja ładowania i wyładowywania, gdy półki są ustawione na specjalnym wózku, który szybko można wyprowadzić z komory po zakończeniu suszenia i wprowadzić natychmiast na jego miejsce inny naładowany poprzednio świeżym materiałem. Wózki podnoszą koszt suszarni, ale oszczędność na czasie i na zużyciu pary wkrótce amortyzuje włożony na ich nabycie kapitał.

Na rysunku 8 podana jest suszarnia komorowa syst. Gordona. W suszarni tej wentylator A zasysa świeże powietrze przez otwór B, a wilgotne przez C i przeciąga powstałą w ten sposób mieszaninę przez parowy kaloryfer K_1 z rur żebrowych. Podgrzane do potrzebnej temperatury powietrze, tłoczy on następnie kanałem D do dolnej części komory, gdzie przechodzi ono na drugą stronę, płynąc poziomymi strumieniami pomiędzy półkami z materiałem suszonym. Z prawej strony komory znajduje się kaloryfer K_2 który ogrzewając przechodzące przez niego powietrze, uzupełnia ciepło zużyte na odparowywanie wilgoci. Po przejściu przez ten kaloryfer, powietrze w powrotnym biegu na lewą stronę suszarni przepływa pomiędzy półkami środkowej części komory, suszy leżący na nich materiał i powiększa przez to swoją wilgotność, a obniża temperaturę. W końcu środkowego biegu znajduje się kaloryfer K_3 , który doprowadza do powietrza ilość ciepła odpowiadającą ilości zużytej w tym biegu na suszenie. Po przejściu następnie w trzecim biegu pomiędzy półkami w górnej części komory powietrze wilgotne rozdzielą się przegrodą E na dwie części, z których jedna odchodzi na zewnątrz przez otwór F, a druga kanałem C zwracana jest do obiegu.

Wskutek zastosowania w tej suszarni dodatkowego ogrzewania

powietrza przy pomocy kaloryferów K_2 i K_3 , umieszczonych w komorze suszarnianej, kierunek jego w suszarni z dołu do góry jest, jak było wyjaśnione w § 5, biegiem normalnym. Dlatego suszy ta suszarnia materiał znacznie równomierniej niż suszarnia B. Schilde.

Półki w suszarni przedstawionej na rysunku 8 ustawione są na wózkach. Można je również umieszczać wewnątrz suszarni na nieruchomym rusztowaniu jak w suszarni podanej na rysunku 7.

Suszarnie Schildoego i Gordona działają w sposób periodyczny. Ładowanie i wyładowywanie materiału suszonego połączone jest z dłuższymi lub krótszymi przerwami w pracy suszarni i ze związanymi z tym stratami ciepłoty. Poza tym suszenie w nich materiałów, które wymagają ostrożnego suszenia, jak owoce, grzyby i inne, przy zmiennej temperaturze i wilgotności suszonego powietrza, zależne jest od sumiennosci i staranności obsługi. Znacznie lepsze są z tych punktów widzenia suszarnie przeciwprądowe o działaniu ciągłym. Z kilku konstrukcyj tego rodzaju suszarni rozpatrzmy przeciwprądową suszarnię skupową systemu niemieckiej firmy T.A.G. oraz suszarnię systemu prof. W. Iwanowskiego.

Suszarnia firmy T.A.G. (Trocknungs - Anlagen - Gesellschaft) przedstawiona jest na rysunku 9. Powietrze, zasysane przy pomocy wentylatora A, przechodzi w pierw przez kaloryfer B, ogrzewa się i dostaje się do komory suszarnianej od dołu. Materiał suszony rozłożony jest na półkach C w kształcie niskich skrzyń z dnem sitkowym, ustawionych jedna nad drugą. Powietrze, przepływając przez te skrzynie z dołu do góry suszy materiał i usuwane jest przez wentylator A na zewnątrz. Komora, a w małych suszarniach szafa, posiada dwoje drzwi, z których górne D

przeznaczone są do wprowadzania do niej skrzynek z materiałem wilgotnym, a dolne E służą do wyjmowania sit z materiałem wysuszonym. Skrzynki sitowe wprowadzane są i wyjmowane po kolei w miarę jak odbywa się suszenie, przy czym wyjmuje się skrzynkę najniższą, spoczywającą swobodnie na podtrzymujących ją kątownikach. Pozostałe zaś opuszczają się na dół przy pomocy specjalnego mechanizmu na taką wysokość, aby najniższa z nich zajęła miejsce usuniętej. Przez górne drzwiczki na zwolnione miejsce wprowadzona jest następnie skrzynka ze świeżym wilgotnym materiałem. Wynika z tego, że im skrzynka położona jest niżej tym dłużej przebywa w suszarni znajdujący się w niej materiał, a więc tym więcej jest on wysuszony. Wskutek nie - naturalnego kierunku powietrza suszącego, materiał, ułożony na sicie, schnie nierównomiernie. Leżący bliżej lewej ścianki komory wysycha prędzej, a po stronie przeciwnej wolniej.

Suszarnia syst. prof. W. Iwanowskiego, podana na rysunku 10, przedstawia sobą szafę, zawierającą kilkanaście sit z materiałem suszonym, ustawionych jedna nad drugą. Sito z wilgotnym materiałem wprowadzone jest przez dolne drzwiczki A na podnośnik, przy pomocy którego podnosi się do góry, odchylając 4 zapadki B, jak to pokazane jest na rysunku 11. Po przejściu sita przez zapadki opadają one do swego normalnego położenia tak, że po opuszczeniu podnośnika cały słup sit opiera się na nich.

Mechanizm podnoszący składa się (Rys. 10) z czterech prowadnic C, połączonych ze sobą listwaną D, do których przymocowane są dwie zębaki E. Z zębatkami zazębiają się kółka zębate F, osadzone na wałku, spoczywającym w łożyskach G. Średnica kółek F i długość zębatek E tak są dobrane, że wystarczy ob-

rócić korbą H o kąt nieco większy od 200° , ażeby podnieść sito ze świeżym materiałem na potrzebną wysokość. Sito z materiałem wysuszonym wyjmuje się przez górne drzwiczki I. Materiał w tej suszarni porusza się wobec tego do góry. Im wyżej tym na półkach leży suchszy materiał. Powietrze, ogrzane w kaloryferze, znajdującym się poza suszarnią, wchodzi do szafy od góry i, płynąc na dół, suszy materiał. Bieg powietrza w tej suszarni jest naturalny, wobec czego działa ona lepiej niż suszarnia poprzednia. Wskutek zastosowania przeciwprądu na świeży wilgotny materiał działa powietrze o stosunkowo wysokiej wilgotności i niskiej temperaturze. W miarę jak materiał podycha, podnoszony jest co raz wyżej, gdzie na niego działa powietrze o coraz większej temperaturze i niższej wilgotności. Na materiał prawie suchy działa powietrze o najmniejszej wilgotności i najgorętsze, doprowadzając suszenie jego do końca. Szafa suszarni prof. Iwanowskiego wykonywana jest z drewnianego lub żelaznego szkieletu obitego wewnątrz blachą cynkową, a na zewnątrz dyktą. Przestrzeń pomiędzy wewnętrzną i zewnętrzną ścianką wypełniona jest tanim materiałem izolacyjnym w celu zmniejszenia strat cieplnych. Wymiary jej podane na rysunku tak są dobrane, ażeby można było łatwo ją obsługiwać. Jak wykazała praktyka na 1 m^2 powierzchni sita w suszarni tej, w zależności od siły ciągu i rodzaju suszonego materiału, można odparować od 10 do 15 kg pary na dobę przy ciągu naturalnym i do 25 kg pary na dobę przy ciągu sztucznym. Wobec tego, że powierzchnia ogólna sit, znajdujących się w jednej szafie, wynosi około 12 m^2 , ilość wody, którą można odparować w jednej szafie, waha się od 120 do 300 kg na dobę.

Gdy potrzebna jest instalacja suszarniana o większej wy-

dajności, suszarnie szafkowe i komorowe mogą tworzyć baterie równoległe lub szeregowo. Baterie szeregowo pracują w podobny sposób jak piec Hoffmana lub bateria dyfuzyjna w cukrowni. Powietrze suszące przepływa przez wszystkie komory baterii włączona w obieg, wchodząc do tej z nich, w której znajduje się materiał najsuchszy i najdawniej załadowany i wychodząc z komory świeżo napełnionej materiałem wilgotnym. Co pewien czas komorę najdawniej załadowaną wyłączają z baterii w celu usunięcia z niej wysuszonego materiału natomiast włączają komorę załadowaną przed chwilą. Baterie szeregowo pracują więc na zasadzie przeciwpędu.

Na rysunku 12 przedstawiona jest schematycznie bateria szeregowo składająca się z 6 komór suszarnianych. W baterii tej powietrze suche wchodzi do komory I, wilgotne zaś wychodzi z komory V, w której znajduje się materiał bardziej wilgotny. Gdy załadanie VI komory będzie zakończone, a materiał w V komorze nieco podsuszony, zostanie wyłączona z baterii komora I, a włączona VI. Powietrze przy tym będzie wyprowadzane do komory II, a wyprowadzane z VI, komora zaś I będzie włączana, a następnie załadowana. W ten sposób powietrze najbardziej wilgotne działa na materiał świeży, a powietrze najsuchsze na materiał najwięcej podsuszony, jak w zwykłych suszarniach przeciwpędowych.

W baterii równoległej każda komora lub szafa pracuje samodzielnie niezależnie od innych. Na rysunku 13 przedstawiona jest schematycznie bateria równoległa składająca się z 8 suszarni słupowych syst. prof. W. Iwanowskiego. Wentylator, nie pokazany na rysunku, tłoczy powietrze ogrzane w kaloryferze do głównego kanału rozdzielczego C, skąd rurami D dostaje się

ono do poszczególnych komór, z których odpływa dołem do wspólnego kanału odlotowego E. Zasuwy F służą do wyłączania poszczególnych suszarni z baterii.

§ 7. Suszarnie tunelowe.

Suszarnie tunelowe przedstawiają sobą jak widać na rysunku 14 długi kanał, w którym powoli przesuwają się, umieszczone na wózkach materiały suszone. Suszenie zachodzi przy pomocy ogrzanego w kaloryferze powietrza lub gazami spalinowymi z kotła parowego, pieca albo ze specjalnego paleniska. Powietrze lub gazy spalinowe przepływają przez tunel w przeciwnym kierunku do ruchu materiału. Ciąg jest wytwarzany przy suszeniu powietrzem przez wentylatory, a przy suszeniu gazami spalinowymi często tylko przez komin. Prędkość powietrza lub suszących gazów w tunelu wynosi około $2 \frac{m}{sek}$. Podczas przepływu przez tunel powietrze i gazy mają tendencję do rozwarstwiania się. Gorące powietrze płynie góra zimne dołem, wskutek tego suszenie zachodzi nierównomiernie. Warstwy materiału leżące na wózkach wysoko, wysychają prędzej i zwykle są przesuszone, natomiast materiał leżący nisko blisko pomostu wózka jest przy krótkim tunelu niedosuszony. Dla dobrego wysuszenia dolnych warstw materiału potrzebny jest dostatecznie długi kontakt

jego z suszącym powietrzem, co zmusza do budowy suszarni tunelowych, których długość dochodzi do 60 lub więcej metrów. Jeżeli tunel jest krótki, a materiał wymaga suszenia przy pomocy powietrza albo gazów o zwiększonej wilgotności, stosowana bywa częściowa cyrkulacja wewnętrzna powietrza wilgotnego. Tego rodzaju instalacja przedstawiona jest na rysunku 15. Wentylator A zasysa część powietrza wilgotnego przez zasuwę regulującą B i tłoczy razem ze świeżym powietrzem, któ-

re dopływa rurą C, do kaloryfera D, skąd po ogrzaniu się pły- nie ono do tunelu, gdzie suszy, posuwający się w przeciwnym kierunku na wózkach, materiał.

W wypadku suszenia materiałów, wymagających niskich tem- peratur i powolnego suszenia stosowana jest suszarnia tunelo- wa ze stopniowym podgrzewaniem powietrza przy pomocy kalory- ferów umieszczonych wewnątrz suszarni. Taka suszarnia jest na rysunku 16. Podzielona jest ona na kilka części, z których każda posiada własny wentylator W i kaloryfer K. Powietrze po przejściu przez kaloryfer kierowane jest przy pomocy specjal- nych przegród P prostopadle do kierunku ruchu materiału, posu- wającego się w tunelu na wózkach. Tunel w tej suszarni jest szeroki. Mieści się w nim dwa lub trzy tory wskutek czego suszarnia jest stosunkowo krótka. Powietrze suche i wózki z materiałem wilgotnym wchodzi do suszarni z jednego jej koń- ca (na rysunku 16 z lewego), wysuszony zaś materiał i wilgot- ne powietrze wyprowadzane są z drugiego końca tunelu. Jest więc to w zasadzie suszarnia współprądowa.

W dużych cegielniach stosowane są suszarnie tunelowe, przedstawione w przekroju poprzecznym na rysunku 17. Tunel tej suszarni, o wysokości 2 m i o długości od 20 do 60 m, posiada od 2 do 10 torów, pomiędzy którymi znajdują się ka- loryfery z rur żebrowych do ogrzewania powietrza. Wyloty to- rów z tej strony tunelu, z której odchodzą wózki z wysuszonym materiałem, są zamknięte żelaznymi drzwiami, otwieranymi co jakiś czas tylko na krótko w celu wyciągnięcia z tunelu wóz- ka z gotowym produktem. Drugi koniec tunelu, przez który wpro- wadzane są wózki z materiałem, przeznaczonym do suszenia i ułożonym na nich w odpowiedni sposób jest otwarty, wskutek

czego wchodzi z tego końca tunelu zasysane przez wentylatory powietrzne.

Działanie suszarni jest następujące: wózki, wprowadzane do tunelu od strony otwartej, posuwają się okresowo ku przeciwnemu końcowi i dostają się w rejony coraz gorętsze. Materiał, znajdujący się na nich, stopniowo, w miarę posuwania naprzód, podgrzewa się i wysycha. Po odbyciu drogi przez całą długość kanału, wózek z wysuszonym materiałem wydostaje się na zewnątrz. Przy wyprowadzaniu każdego nowego wózka, cały pociąg wewnątrz tunelu przesuwają się o długość jednego wózka.

Pod względem ogrzewania tunel podzielony jest na trzy strefy, z których każda czerpie ciepło z innego źródła.

W pierwszej wstępnej strefie w rurach kaloryferów, znajdujących się pomiędzy torami, płynie powietrze, odprowadzane ze strefy gorącej. To powietrze, posiadając stosunkowo wysoką temperaturę, zawiera dużo pary wodnej z wysuszonego materiału. W rurach kaloryferów powietrze powoli stygnie, a para wodna skrapla się, przez co ogrzewa się powietrze, znajdujące się na zewnątrz rur i podsuszające w tunelu świeży materiał. Ciepło stąd, uzyskane nie jest zbyt obfite, to też temperatura w tej strefie jest dość niska, a tym samym tempo suszenia powolne.

W strefie środkowej kaloryfery z rur żebrowych ogrzewane są parą wodną, zwykle parą odlotową z maszyn lub turbin parowych. Temperatury w tej strefie są wyższe, to też tempo suszenia przybiera na sile. Wózki z tej strefy przechodzą do następnej już z ogrzonym, częściowo podsuszonym materiałem. W trzeciej ostatniej strefie nie ma rur żebrowych tylko paleniska z kaloryferami ogniowymi, w których ogrzewa się powietrze su-

szące. W tej strefie suszenie jest najintensywniejsze i, jeżeli wyroby ceramiczne przy niuńniejnym prowadzeniu suszarni nie wyschły w pierwszych dwóch strefach tak dalece, iż mogą znosić wyższe temperatury, to wskutek zbyt szybkiego suszenia w tej strefie często pękają.

Ruch powietrza suszącego odbywa się w suszarni w sposób następujący: wzdłuż tunelu, po obu jego stronach znajdują się komory wentylacyjne A i B, połączone ze sobą kanałami C, biegnącymi pod torami, tworząc ostry kąt z osią tunelu, wskutek czego końce wylotowe kanałów C położone są w tunelu głębiej niż wlotowe. Powietrze, wchodzące do suszarni przez otwarty koniec tunelu, dostaje się w obręb działania wentylatora W, w pierwszej komorze wentylacyjnej A, który pędzi je przez kanał pod torami na drugą stronę do komory B₁. Stamtąd płynie wpoprzek tunelu po przez kaloryfery i materiał na wózkach do wentylatora W₂ znajdującego się w komorze wentylacyjnej A₂. Przesyła on powietrze po przez drugi kanał pod torami C₂ do komory wentylacyjnej B₂ i t. d. Biegnie więc ono po przestrzennej linii spiralnej w tym samym kierunku co i wózki, coraz więcej się ogrzewając i nasycając oparami wydzielającymi się z suszonych materiałów. Ekshauster, umieszczony w końcu trzeciej strefy, wyciąga z suszarni powietrze najgorętsze i zawierające najwięcej wilgoci i tłoczy go do rur żebrowych, znajdujących się pomiędzy torami pierwszej strefy, gdzie część ciepła, w nim zawartego, zostaje użytecznie wykorzystana. Zużycie ciepła w tej suszarni jest małe, to też pracuje ona bardzo ekonomicznie, lecz, ze względu na wysokie koszty budowy, opłaca się tylko dla glin łatwo schnących. Jeżeli czas suszenia przekracza 48 godzin, tunel wypada zbyt długi, co zwiększa

tabor wózków i nadmiernie podnosi koszt instalacyjny.

§ 8. Suszarnie taśmowe i grabkowe.

Suszarnie taśmowe są typowym przykładem urządzeń o działaniu ciągłym, przeznaczonych do suszenia ciał sypkich. Najprostrza suszarnia tego typu przedstawiona jest w sposób schematyczny na rysunku 18. Składa się ona z taśmy bez końca, naciągniętej na dwa bębny, z których prawy A otrzymuje napęd, a lewy B posiada urządzenie do naciągania taśmy, oraz z osłony w postaci długiego prostokątnego kanału, w którym porusza się górna część taśmy. Materiał wilgotny, doprowadzany bez przerwy przez lej B, posuwa się na taśmie w przeciwnym kierunku do suszącego powietrza i oddaje mu swoją wilgoć. Wysuszony materiał odchodzi przez lej D. Rolki E służą do podtrzymywania taśmy, przeciwdziałając jej przewisaniu. Suche gorące powietrze wtłaczane do suszarni przy pomocy wentylatora przewodem F, płynie w kierunku przeciwnym do ruchu suszonego materiału, zabiera od niego wilgoć i odchodzi z suszarni rurą H. Choć suszarnia ta jest prosta, tania i nie wymaga dużej obsługi, stosują ją rzadko, gdyż jest bardzo długa, chyba gdy jednocześnie pełni rolę transportera, albowiem do wysuszenia przeciętnie wilgotnych materiałów, potrzebna jej długość przekracza 100 m. Z tego powodu najczęściej suszarnie taśmowe bywają jako suszarnie piętrowe.

Jedną z takich suszarni przedstawiona jest w sposób schematyczny na rysunku 19. Zamiast jednej, jak suszarnia poprzednio (rys.18), posiada ona pięć taśm bez końca, z których każda porusza się w kierunku przeciwnym niż sąsiednio. Umieszczone są one we wspólnej osłonie jedna nad drugą (rys.19). Materiał wilgotny doprowadzony jest do suszarni przez górny lej A

na lewy koniec najwyższej taśmy równomiernie i w sposób ciągły. Posuwa się on wraz z taśmą i spada w prawym jej końcu na taśmę drugą, która unosi go w kierunku przeciwnym. Przesypuje się on następnie na taśmę trzecią, potem w drugim jej końcu na czwartą, następnie na piątą i spada z ostatniej taśmy do leja B, skąd odchodzi z suszarni.

Powietrze suche po ogrzaniu w kaloryferze wtlaczane jest do suszarni przewodem C. Płynię ono w przeciwnym kierunku z suszonym materiałem poziomymi kanałami, na które podzielona jest przegrodami D cała przestrzeń suszarni, odbiera od materiału wilgoć i wychodzi przewodem E.

W miarę tego jak materiał wilgotny oddziela się od leja zasilającego A wysycha on co raz więcej, spotykając co raz suchsze powietrze. Oczywiście najszybciej traci wilgoć materiał znajdujący się na powierzchni warstwy, leżącej na taśmie, ta część zaś jego, która przylega bezpośrednio do taśmy, wysycha znacznie wolniej. Przesuwanie się materiału z wyższego piętra na niższe powoduje automatycznie mieszanie się jego, co dobrze wpływa na równomierność suszenia.

W suszarniach taśmowych najczęściej są używane taśmy bawełniane, rzadziej taśmy z innych materiałów. Szerokość taśmy wynosi od 0,5 do 1,2 m, odległość pomiędzy bębnami dochodzi do 16 m. Prędkość taśmy waha się w granicach od 0,2 do 0,5 $\frac{m}{sek}$ prędkość zaś powietrza od 2,5 do 5 $\frac{m}{sek}$.

W omawianej suszarni tylko górna połowa taśmy jest wykorzystana użytecznie, dolna powraca bez materiału. Są suszarnie, w których wykorzystana jest cała długość taśmy. Materiał w nich leży i na górnej i na dolnej jej połowie. Oczywiście konstrukcja tego rodzaju suszarni jest więcej skomplikowana niż susza-

rni przedstawionej na rysunku 19.

W suszarniach grabkowych (rys.20) materiał jest przesuwany na półkach z blachy dziurkowanej przy pomocy grabi lub skrobaczek, przyczepionych do łańcuchów bez końca, które naciągnięte są na kołach łańcuchowych otrzymujących ruch obrotowy od silnika albo pędni. Wilgotny materiał, doprowadzany na najwyższą półkę suszarni przez górny lej A, spada z półki na półkę co raz niżej i odchodzi wysuszony przez dolny lej B. Na półkach przesuwany jest on z jednego końca na drugi przy pomocy transporterów grabkowych rozpatrzonych szczegółowo w rozdziale III "Urządzenia transportowe".

Suszące powietrze, po przejściu przez kaloryfery, gdzie jest ogrzane do pożądaney temperatury, dostaje się do suszarni pod najniższą półkę przewodem C. Wznosi się ono następnie do góry, przepływa przez materiał, leżący na półkach z blachy dziurkowanej suszy go i po nawilżeniu się oparami wilgoci opuszcza suszarnię przewodem D. Bieg więc powietrza w tej suszarni jest nienaturalny, co powoduje powstawanie w niej martwych przestrzeni, gdzie materiał wysycha znacznie wolniej. Lepiej działa suszarnia, w której pomiędzy półkami umieszczone są dodatkowe kaloryfery K, (na rysunku 20 pokazany jest linia przerywaną kaloryfer K z rur żebrowych pomiędzy drugą i trzecią półką). Jeżeli jest ich więcej, na przykład pomiędzy wszystkimi półkami, to utrzymują one temperaturę suszącego powietrza na stałej wysokości wskutek czego kierunek jego od dołu do góry w tym przypadku będzie naturalnym.

Suszarnie grabkowe są stosowane do suszenia waty, wełny, oraz różnego rodzaju materiałów włóknistych.

§ 9. Suszarnie bębnowe.

Suszarnie bębnowe są stosowane do suszenia materiałów sypkich. (Rys.21), główną składową ich części jest bęben, ustawiony na rolkach A poziomo lub, co się częściej zdarza, nieco pochyło. Posiada on wewnątrz szereg półek B z taśm stalowych, pokazanych na rysunku 22 a. Półki te przynocowane są do jego wewnętrznej powierzchni wzdłuż całej długości. Podnoszą one podczas pracy suszarni wilgotny materiał i rozsypują go stopniowo wewnątrz bębna w strumieniu przepływającego powietrza. W ten sposób rozwijana jest duża powierzchnia parowania wilgoci, co dodatnio wpływa na proces suszenia.

W celu lepszego rozrzucenia suszonego materiału niektóre firmy robią w bębnie dość skomplikowane przegrody i półki z szerokich taśm stalowych, unocowanych równoległe do jego osi. Parę przykładów takiego wypełnienia podano są na rysunku 22. Ze względu na łatwość oczyszczania bębna najodpowiedniejsze są konstrukcje, przedstawione na rysunkach 22 a i 22 b.

Bęben otrzymuje napęd od silnika lub pędni za pośrednictwem przekładni zębatej C. Suche powietrze wchodzi do kaloryfera parowego K przewodem E, tam się ogrzewa i dostaje się następnie do bębna. Wilgotne zaś wyciąga wentylator F i usuwa poza suszarnię. Materiał surowy doprowadzany jest równomiernie przez lej zasilający G i, oddając stopniowo wilgoć, przepływającemu w przeciwnym kierunku suszącemu powietrzu, przesuwa się jednocześnie, wskutek pochyłego ustawienia bębna, z jednego jego końca w drugi. Następnie dostaje się po wysuszeniu do komory H, skąd zostaje usunięty przy pomocy ślinaka J.

Suszarnie bębnowe budowane bywają różnej wielkości, zaczynając od najmniejszych o średnicy bębna $D = 800$ mm do bardzo

dużych o średnicy bębna dochodzącej do $D = 4000$ mm. Długość bębna zwykle jest pięciokrotnie większa od jego średnicy i wynosi od 4000 mm dla najmniejszej do 20000 mm dla największej.

Ilość obrotów bębna waha się w granicach od $8 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$ dla małych suszarni do $2 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$ dla dużych. Kąt nachylenia osi do bębna do poziomu jest mały. Wielkość jego zależy od ilości obrotów bębna i czasu, który powinien przebywać materiał w suszarni. Najczęściej waha się on w granicach od 4° do 6° . Ilość materiału znajdującego się jednocześnie w bębnie wynosi zwykle od 10 do 15% jego objętości. Zależy ona od konstrukcji półek oraz od kąta nachylenia osi bębna i dochodzi w niektórych wypadkach do 25%. W celu zmniejszenia strat ciepłych bęben bardzo często posiada płaszcz zewnętrzny z cienkiej blachy stalowej o średnicy większej od średnicy bębna o 200 lub więcej mm, przez co tworzy się izolacja powietrza grubości 100 mm lub więcej. Zamiast płaszcza zewnętrznego czasami bęben bywa obłożony warstwą materiału izolacyjnego.

Jako medium suszące stosowane są w suszarniach bębnowych częściej niż powietrze gazy spalinowe. Oczywiście można je stosować do suszenia takich materiałów, którym nie szkodzi ani wysoka temperatura, ani zanieczyszczenie sadzą lub innymi składnikami spalin. Suszenie gazami spalinowymi posiada dużo cech dodatnich. Przede wszystkim jest ono ekonomiczniejsze niż suszenie powietrzem, gdyż powietrze wprowadzane do suszarni musi być ogrzane albo gazami spalinowymi w kaloryferach ogniowych, albo parą w kaloryferach parowych, para zaś pobiera ciepło w kotłach parowych od gazów spalinowych. Źródłem więc ciepła we wszystkich wypadkach są spaliny. Oczywiście bezpośre-

dnie stosowanie spalin do suszenia daje możliwość uniknięcia strat ciepła i w kaloryferach i w kotle parowym. Drugą cechą dodatnią suszenia gazami spalinowymi jest znaczne zwiększenie wydajności suszarni, gdyż wysoka temperatura i mała wilgotność suszących gazów przyspiesza parowanie. Do cech dodatnich suszenia spalinami zaliczyć należy również możliwość wyzyskania ciepła odpadkowego, zawartego w gazach spalinowych z kotłów parowych i różnego rodzaju pieców, przez skierowanie ich bezpośrednio nie do komina lecz przez suszarnię.

Gdy w powietrznych suszarniach bębnowych materiał przesuwany się zwykle w przeciwnym kierunku do suszącego powietrza, w suszarniach spalinowych stosowany jest zarówno współprąd jak i przeciwny.

Z punktu widzenia wyzyskania ciepła, przeciwny jest lepszy od współprądu. Gorące i suche spaliny spotykają się przy przeciwnym kierunku z podsuszonym materiałem, wychodzącym z suszarni i odbierają od niego pozostałą wilgoć. Wilgotne zaś i oziębione gazy, opuszczając suszarnię, spotykają się z zimnym i wilgotnym materiałem, oddają mu resztę ciepła i podnoszą swoją wilgotność w niektórych wypadkach do pełnego nasycenia się oparami. Przy przeciwnym kierunku więc wykorzystywana jest całkowicie zdolność gazów do pochłaniania wilgoci oraz prawie całkowicie zawarte w nich ciepło. Nie można jednak stosować przeciwnego kierunku, gdy jest obawa przegrzania suszonego materiału lub niebezpieczeństwo jego zapalenia się. Nie należy go również stosować i w przypadku, gdy surowy zimny materiał zawiera tyle wilgoci, że dalsze jej zwiększenie, wskutek kondensacji na jego powierzchni pary, zawartej w odchodzących wilgotnych gazach spali-

rni przeciwprądowej zostanie zauważone skraplanie się pary na świeżym materiale, należy albo zwiększyć ilość suszących gazów, albo zmniejszyć intensywność zasilania suszarni wilgotnym materiałem. Do wad przeciwprądu trzeba również zaliczyć duże straty ciepła, zawartego w odchodzącym wysuszonym materiale, albowiem opuszcza on suszarnię, posiadając wysoką temperaturę.

Współprąd stosowany jest przy suszeniu gazami spalinowymi wtedy, gdy nie można z jakichś powodów zastosować przeciwprądu. Stosowany on jest również i wtedy, gdy chodzi o obniżenie wilgotności materiału suszonego tylko do określonej granicy bez obawy przesuszenia. Regulując wtedy ilość dopływających gazów i ich temperaturę, można osiągnąć ustalenie się temperatury i wilgotności gazów odlotowych na odpowiedniej wysokości, a przez to zabezpieczyć suszony materiał przed obniżeniem się jego wilgotności poniżej pożądaną wielkość.

Ciąg gazów spalinowych w suszarniach bębnowych może być naturalnym wywołanym przez komin albo sztucznym, zachodzącym pod wpływem wentylatora lub ekshaustera. W przypadku ciągu naturalnego gazy spalinowe opuszczają suszarnię, posiadając, ze względu na dobry ciąg, dość wysoką temperaturę, a przez to unoszą do komina dużo ciepła, które jest w ten sposób stracone dla celów suszarnianych. Przy ciągu sztucznym spaliny można ochłodzić w suszarni prawie do temperatury nasycenia ich oparami wilgoci, a przez to prawie całkowicie wyzyskać zawarte w nich ciepło. Poza tym ciąg sztuczny daje możliwość regulowania ilości doprowadzanych do suszarni gazów spalinowych.

Najprostszą współprądową suszarnią bębnową, w której zachodzi suszenie przy pomocy gazów spalinowych, przedstawiona

jest schematycznie na rysunku 23. Materiał wilgotny doprowadzony do suszarni przez lej A, przechodzi we współprądzie z gazami spalinowymi przez bęben i odchodzi wysuszony do komory rozdzielczej B, skąd usuwany jest przez transporter ślimakowy C. Gazy spalinowe, wytwarzane w palenisku D, przepływają przez bęben, obniżając swoją temperaturę i pochłaniając wilgoć wydzielającą się z suszonego materiału. Dostają się one następnie do komory rozdzielczej B, skąd usuwa je wentylator i tłoczy do odpylacza E. Komin F czynny jest podczas rozpalania paleniska oraz służy do odprowadzania przez niego gazów spalinowych, gdy praca suszarni ulega z jakichś powodów krótkiej przerwie.

Jeżeli materiał przeznaczony do suszenia wytrzymuje wysokie temperatury, lecz szkodzi mu zanieczyszczenie sadzą lub innymi składnikami gazów spalinowych, stosowane są suszarnie bębnowe, w których źródłem ciepła są spaliny, a substancją pochłaniającą wilgoć jest powietrze. Taka suszarnia przedstawiona jest na rysunku 24. Bęben jej A posiada rurę koncentryczną B, która łączy się przy pomocy 3 krótców C z komorą zewnętrzną D, utworzoną przez obmurowanie bębna w taki sposób, że może on swobodnie obracać się na rolkach E, otrzymując napęd przy pomocy przokładni zębatej F.

Gazy spalinowe, wytwarzające się w palenisku G, płyną wzdłuż bębna, ogrzewając go od zewnątrz. Następnie dostają się przez krótcie C do centralnej rury B i, ogrzewając bęben od wewnątrz, kierują się do wentylatora H, który usuwa je poza suszarnię. Jak widać z rysunku nigdzie nie stykają się one z suszonym materiałem, a więc nie ma obawy, żeby mogły go zanieczyścić.

Materiał wilgotny doprowadzany przez lej L lewego końca bębna i rozsypywany wewnątrz niego podczas ruchu suszarni przy pomocy podłużnych żeber, posuwa się, tracąc wilgoć, do prawego końca bębna, gdzie zabierany jest przez ślinak S.

Powietrze suszące, przeciągane przez suszarnię przy pomocy wentylatora J, wchodzi do bębna z prawego jego końca rurą I, przepływa w przeciwnym kierunku z materiałem przez pierścieniową przestrzeń pomiędzy rurą centralną i płaszczem bębna, omiata rozsypywany w nim materiał, zabiera od niego wilgoć i odchodzi do wentylatora J.

Suszarnie bębnowe, ogrzewane gazami spalinowymi, stosowane są do suszenia głównie materiałów nieorganicznych jak rudy, węgiel, fosforyty, ziemia Fullera, kaolin, glina, itp. Materiały organiczne suszone są w nich tylko w nielicznych wypadkach jak np. wysłodki buraczane w niektórych cukrowniach. Jeżeli suszony materiał nie obawia się bezpośredniego zetknięcia się z gazami spalinowymi jak, rudy, węgiel, piasek i inne, to stosowane są suszarnie, w których spaliny nie tylko są źródłem ciepła, lecz również służą do pochłaniania wilgoci, jak to się dzieje w suszarni przedstawionej na rysunku 23. W przeciwnym przypadku na przykład przy suszeniu ziemi Fullera, kaolinu, ochry, materiałów do wyrobu farb i innych, gazy spalinowe są tylko źródłem ciepła, do pochłaniania zaś wilgoci służy powietrze, jak na przykład w suszarni przedstawionej na rysunku 24.

Wydajność suszarni bębnowych zależy od prędkości gazów spalinowych i jest tym większa im prędzej przepływają one przez suszarnię. Prędkość zaś spalin nie może być zbyt wielką ze względu na ilość unoszonego przez nich pyłu, który pozostaje z suszonego materiału podczas pracy suszarni. Jeżeli

ilość ^{pyłu} ~~gazy~~ jest duża, albo jeżeli jest on cenny, gazy spalinowe należy przepuścić przez konory pyłowe, cyklony lub innego rodzaju odpylacze, gdzie część pyłu zostaje odzyskana. Temperatura spalin ma również wpływ na wydajność, ze wzrostem jej wydajność się podnosi. Zbyt wysoka jednak temperatura wpływa ujemnie na metalowe ścianki bębna. Z tego powodu temperatura gazów spalinowych wchodzących do suszarni nie powinna przekraczać 750°C.

Suszarnie bębnowe nie nadają się do suszenia materiałów lepkich, ale jeżeli materiał przeznaczony do suszenia jest tego rodzaju, że po dodaniu do niego pewnej ilości materiału wysuszonego, obniża swoją lepkość w takim stopniu, że przestaje oblapiać bęben suszarni, to można go suszyć we współprądowych suszarniach bębnowych.

W przypadku, gdy suszone materiały nie mogą być zanieczone żelazem i rdzą, jak na przykład kaolin, glina i piasek w przemyśle ceramicznym i szklarskim, bęben suszarni można wewnątrz wyłożyć drzewem i prowadzić suszenie nie gazami spalinowymi lecz powietrzem.

§ 10. Suszarnie walcowe,

Gdy wilgotny materiał posiada kształt długich taśm, jak na przykład papier, celuloza, płótno lub inne materiały włókiennicze, to w celu wysuszenia przepuszczają go przez szereg walców, ogrzewanych od wewnątrz parą. Materiał prędko podnosi na nich swą temperaturę, aż do temperatury wrzenia wody, intensywnie paruje i w ten sposób wysycha. Przykładem tego rodzaju suszarni mogą służyć walce suszące maszyny papierniczej lub kalandry w fabrykach włókienniczych.

Na rysunku 25 przedstawiona jest schematycznie część susząca maszyny papierniczej. Składa się ona w niektórych wypadkach z przeszło dwudziestu walców. Do każdego z nich doprowadzana jest para ogrzewająca i odprowadzane są skropliny. Papier przechodząc przez walce, przylega do nich naprzemiennie to jedną, to drugą swą stroną i energicznie paruje.

XX Materiały włókniste jak papier, tektura, celuloza oraz materiały włókiennicze podczas suszenia mają tendencję do kurczenia się. Zjawisko kurczenia się występuje zawsze, gdy suszenie tych materiałów, pociętych na kawałki, zachodzi w suszarniach komorowych. Inaczej dzieje się gdy suszenie ich odbywa się na walcach. Jeżeli wszystkie walce suszące posiadają jednakową średnicę i jednakową ilość obrotów, to cała taśma materiału suszonego posiada jednakową prędkość liniową, wobec czego w części taśmy, która wskutek wysychania powinna się skurczyć, powstają naprężenia rozciągające, przeciwdziałające kurczeniu się materiału. W rezultacie długość wysuszonego w ten sposób papieru nie zmienia się, natomiast wytrzymałość jego jest mniejsza niż papieru suszonego w suszarniach komorowych. Można uniknąć osłabienia materiałów, suszonych na suszarniach walcowych, przez dostosowanie prędkości obwodowej każdego walca do zmniejszania się długości taśmy na walcach poprzednich, nadając następnym walcem odpowiednie średnicy i ilości obrotów.

Wydajność suszarni walcowych do suszenia tkanin (kalandrów) waha się w granicach od 6 do 12 kg pary na 1 m² i godzinę.

Średnice walców w tych suszarniach wynoszą od 300 do 800 mm.

Suszarnie walcowe innej nieco konstrukcji stosowane są do odparowywania nieszanin ciał stałych w cieczach, roztworów

koloidalnych oraz takich postrwołów, z których nie krystalizuje rozpuszczone ciało stałe, pomimo odparowywania rozpuszczalnika.

Dopóki tego rodzaju roztwory lub mieszaniny zawierają dużo cieczy i są wobec tego rzadkie, usuwanie z nich wilgoci zachodzi w zwykłych aparatach wyparnych. W miarę tego jednak jak ilość cieczy w nich się zmniejsza, robią się one coraz gęstsze i więcej lepkie, wskutek czego odparowywanie ich w aparatach wyparnych jest coraz trudniejsze i przestaje być ekonomicznym. Dlatego po wstępnym zagęszczeniu tych ciał na aparatach wyparnych, do wskazanych praktyką granic, dalsze usuwanie z nich wilgoci zachodzi przez suszenie.

Suszarnie walcowe do suszenia materiałów ciekłych bywają jedno i dwuwalcowe. Dwuwalcowa suszarnia konstrukcji firmy Vonuleth w Darnszacie przedstawiona jest schematycznie na rysunku 26. Składa się ona z dwóch walców ogrzewanych parą i wolno obracających się w osłonie w przeciwnych do siebie kierunkach. Materiał ciekły, przeznaczony do suszenia, doprowadzany jest do suszarni bezpośrednio na walec przez otwór A. Podczas pracy suszarni, w miarę wymurzania się walców z cieczy, powstaje na nich cienka warstwa materiału, która prędko wysycha i jest zeszkrobana przy pomocy skrobaczek B, mających kształt długich noży, przylegających do walców wzdłuż tworzących. Materiał znajduje się na powierzchni walców dość krótko, w większości wypadków mniej niż $\frac{1}{2}$ minuty, gdyż obracają się one z prędkością kilku obrotów na minutę. Z tego powodu suszarnie walcowe dobrze nadają się do suszenia materiałów, które nie wytrzymują dłuższego ogrzewania jak na przykład krow, mleko, mąka kartoflana i szereg innych produktów.

Walce są wykonane z żeliwa, stali lub brązu. Zewnętrzna ich powierzchnia jest gładko wypolerowana, a ilość obrotów tak dobrana, ażeby materiał zdążył dostatecznie wyschnąć zanim zostanie z nich usunięty przez skrobaczki. Staranne i dokładne wykonanie wałców i noży, oraz utrzymywanie ich w należytych stanie jest warunkiem dobrego funkcjonowania suszarni.

Powietrze suszące doprowadzane jest od dołu, a odprowadzane górą przewodem C, suchy zaś materiał odchodzi przez lej D (Rys. 26).

Średnica wałców w suszarniach walcowych firmy Venuloth waha się w granicach od 320 mm do 1350 mm, długość od 650 mm do 3100 mm. Powierzchnia ogrzewalna dwuwalcowych suszarni wynosi od 1,3 m² do 26,3 m², ilość obrotów od 1 do 10 $\frac{\text{obr}}{\text{min}}$, zużycie zaś mocy od 1 KM dla najmniejszych suszarni od 10 KM dla największych. Natężenie powierzchni ogrzewalnej zależy od temperatury pary ogrzewającej i od lepkości suszonych materiałów i w niektórych przypadkach dochodzi do 70 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$.

Dla delikatnych materiałów, których nie można ogrzewać do temperatury wrzenia cieczy pod ciśnieniem atmosferycznym, stosowane są jedno i dwuwalcowe suszarnie, w których suszenie zachodzi pod próżnią. Jedną z takich jednowalcowych suszarni konstrukcji fabryki E. Passburg przedstawiona jest na schematycznym rysunku 27. (Suszarnie próżniowe innych typów będą rozpatrywane w § 12). Wałek tej suszarni obracający się wewnątrz hermetycznie zamkniętej cylindrycznej osłony, zanurzony jest swą dolną częścią w suszonym materiale ciekłym, który może być w razie potrzeby ogrzewany dodatkowo przy pomocy węzownicy A. Materiał wilgotny, doprowadzany rurą B, przylega cienką warstwą do obracającego się i ogrzewanego od

wewnątrz walca C, paruje i prędko wysycha. Materiał suchy, zeskrobywany z powierzchni walca przez noż D, spada do odbieralnika, składającego się z poziomego zbiornika E i hermetycznie zamkniętego cylindra F, w którym umieszczony jest zbiornik. Dla obserwowania przebiegu ciśnienia służy wziernik G i elektryczna lampa oświetlająca H.

Suszarnia połączona jest w celu wytworzenia i utrzymywania próżni przewodem J ze skraplaczem i pompą próżniową, dzięki czemu można w niej odparować wilgoć pod znacznie niższym niż atmosferyczne ciśnieniem, a więc i w niższej niż pod ciśnieniem atmosferycznym temperaturze. Nadaje się więc ona do suszenia takich ciał, które ulegają rozkładowi w temperaturach poniżej 100°C i nie wytrzymują długiego suszenia.

Walcowa suszarnia próżniowa E. Passburga (Rys. 27) pracuje w sposób ciągły tak długo dopóki nie napełni się zbiornik E. Gdy to nastąpi, suszenie należy przerwać, suszarnię odłączyć, od skraplacza i po wpuszczeniu do niej powietrza przez kranik powietrzny, nie pokazany na rysunku, usunąć z cylindra F zbiornik, wypełniony wysuszonym materiałem, wstawiając na jego miejsce próżny. Następnie, po zamknięciu cylindra F i kranika powietrznego, należy połączyć suszarnię ze skraplaczem i pompą próżniową i gdy zostanie osiągnięta potrzebna próżnia, można zacząć znowu normalne suszenie. Oczywiście manipulacja związana z usuwaniem z suszarni wysuszonego produktu jest dość kłopotliwa i połączona ze stratą czasu. Aby przerwy w pracy suszarni zachodziły rzadziej pojemność odbieralnika powinna być dość duża. Zwykle robi się go takiej wielkości, aby mogła w nim się zmieścić ilość wysuszonego materiału odpowiadająca trzygodzinnej pracy suszarni.

Dla zmniejszenia do minimum przerw w pracy budowane są próżniowe suszarnie walcowe z dwoma odbieralnikami. Gdy jeden z nich zostanie napełniony, odłącza się go od suszarni, włączając jednocześnie drugi, i w tym czasie, gdy do niego zsypuje się wysuszony materiał, pierwszy jest opróżniany i oczyszczany. W ten sposób pracuje ona bez przerwy. W momencie jednak włączenia pustego odbieralnika zachodzi spadek próżni w instalacji, co wprowadza zakłócenie w normalnej pracy suszarni na okres czasu, potrzebny na doprowadzanie próżni do stanu pierwotnego.

Wydajność próżniowych suszarni walcowych jest kilkakrotnie mniejsza od suszarni walcowych pracujących pod atmosferycznym ciśnieniem. Przyczyną tego są nie tylko przerwy i zakłócenia w pracy ale przede wszystkim znaczne zmniejszenie się różnicy temperatur pomiędzy parą ogrzewającą walce od wewnątrz, a temperaturą parowania wilgoci na powierzchni walców. Natężenie powierzchni ogrzewalnej w tych suszarniach wynosi tylko od 15 do 20 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$, gdy w suszarniach walcowych pracujących pod ciśnieniem atmosferycznym dochodzi do 70 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$.

§ 11. Suszarnie rozpryskowe.

Jeżeli zachodzi potrzeba szybkiego odparowania wielkich ilości cieczy i otrzymania suchego produktu w krótkim czasie, jak to się dzieje przy suszeniu mleka, krwi, drożdży i innych ciekłych materiałów, stosowane jest suszenie w suszarniach rozpryskowych. Zasada ich działania jest prosta. Ciecz rozpyła się na drobną mgłę w komorze, przez którą przepływa gorące powietrze. Przez rozwinięcia bardzo wielkiej powierzchni, dochodzącej do 300 m² na 1 litr, wskutek rozbicia cieczy na bardzo drobne kro-

pelki o wymiarach od 0,01 mm 0,05 mm materiał ciekły intensywnie paruje i szybko wysycha, suchy zaś spada na dno komory.

Chociaż pierwszy patent na suszarnię rozpryskową, działającą na powyższej zasadzie, został wydany w roku 1872, jednak przez dłuższy okres czasu nie były one stosowane, wskutek niedostatecznego opanowania różnych technologicznych trudności, związanych z tym sposobem suszenia ciekłych materiałów. Jedną z trudności, na przykład, było osiadanie niedostatecznie wysuszonego produktu na ścianach komory suszarnianej w postaci lepkiej kleistej warstwy, co prowadziło do psucia się dużych jego ilości. Powiększenie wymiarów komory, lepsze rozpylenie oraz skierowywanie powietrza suszącego w taki sposób, aby kropelki materiału wysychały przed zetknięciem się ze ściankami doprowadziło do usunięcia powyższej wady i do większego rozpowszechnienia się suszarni rozpryskowych. W skali przemysłowej zaczęto je budować dopiero od roku 1911 i obecnie są one dość często stosowane, gdy chodzi o suszenie dużych ilości ciekłych materiałów.

Główną czynnością, od której w znacznym stopniu zależy dobre działanie suszarni, jest dostatecznie drobne rozpylenie przerabianej cieczy w wielu przypadkach gęstej i lepkiej. Rozpylenie w czynnych obecnie suszarniach zachodzi albo mechanicznie pod działaniem siły odśrodkowej, albo pneumatycznie pod działaniem dużego ciśnienia powietrza lub gazów na powierzchnie cieczy przeznaczonej do suszenia. Pod wpływem tego ciśnienia, podobnie jak w przesyłaczach nontejus, ciecz przepływa z dużą prędkością przez specjalne dysze, umieszczone w komorze suszarnianej, które i wywołują rozbicie jej na drobne kropelki. Zamiast przetłaczarek nontejus można stosować również do

tłoczenia cieczy przez dysze zwykle pompy tłokowe lub odśrodkowe.

Urządzenie do mechanicznego rozpylania posiada tarczę wirującą z dużą prędkością kątową. Na środek tej tarczy doprowadzany jest surowy ciekły materiał. Pod wpływem siły odśrodkowej rozpryskuje się on na wszystkie strony, rozbijając się przy tym na drobniutkie kropelki o średnicy dochodzącej do 10μ . Kształt tarczy, jej wymiary i ilość obrotów zależą od własności fizycznych suszonej cieczy, głównie zaś od jej lepkości i procentowej zawartości w niej wilgoci.

W przypadku przerabiania materiałów ciekłych o dużej lepkości, stosowana jest tarcza przedstawiona na rysunku 28. Posiada ona kształt gładkiego talerza z zagłębionym denkiem. Suszony materiał wypełnia początkowo dno talerza, następnie zaś w miarę pokonywania przez siłę odśrodkową oporów wywołanych siłami tarcia wewnętrznego cieczy (sił lepkości) oraz tarcia jej o powierzchnię talerza, przepływa ze wzrastającą prędkością ku jego brzegom, i pod wpływem dużej siły odśrodkowej, wylatuje w postaci drobnej mgły.

Tarcza do rozpryskiwania cieczy o małej lepkości konstrukcji G. Krause przedstawiona jest na rysunku 29. Jest to właściwie zbiornik cylindryczny A, od którego odchodzą 2 lub więcej rurki B średnicy 10mm. Ażoby pod wpływem dużej siły odśrodkowej nie zostały one wyrwane z cylindra, drugi ich koniec przytrzymywany jest przez zewnętrzne ścianki C tej tarczy. Suszony materiał, doprowadzany przewodem D na dno wirującego cylindra, odrzucany jest przez siłę odśrodkową na jego boczne ściany, skąd dostaje się do poziomych rurek B. Przepływając przez te rurki ruchem przyspieszonym pod działaniem wzrastają-

cej siły odśrodkowej, opuszcza on przyrząd w postaci bardzo drobnych kropelek.

Tarcze rozpryskowe budowane bywają w kilku wymiarach. Ich średnica waha się w granicach od 160 mm do 500 mm, ilość obrotów na minutę do 4000 dla tarcz dużej średnicy do 20000 dla tarcz małych, prędkość zaś obwodowa wynosi od 100 $\frac{m}{sek}$ dla tarcz dużych do 160 $\frac{m}{sek}$ dla małych.

Ciśnienie na ciecz wywołane przez siłę odśrodkową w momencie rozrywania się jej na drobniutkie kropelki waha się w granicach od 50 atm do 200 atm, co łatwo można sprawdzić ze wzoru

$$p = \gamma \frac{c^2}{2g}$$

podstawiając do niego odpowiednie wartości liczbowe. Tym się tłumaczy dlaczego ciecz, wylatująca z wirującej tarczy, jest tak silnie rozdrobiona.

W czynnych obecnie suszarniach tarcze rozpryskowe otrzymują napęd albo bezpośrednio od turbiny parowej, lub silnika elektrycznego, z którym oś tarczy połączona jest przy pomocy sprzęgła, albo od silnika elektrycznego za pośrednictwem przekładni zębatej lub ślimakowej, przyczyn ślimak w tym przypadku osadzony jest na wałku tarczy, a ślimacznicą na wale silnika.

Z wielu różnych konstrukcji suszarni, w których stosowane jest mechaniczne rozpylanie ciekłego materiału, rozpatrzmy suszarnię natryskową syst. G. Krause, przedstawioną schematycznie na rysunku 30. Jest to komora kwadratowa wysokości 7 m i szerokości 6,25 m, wykonana z żelazobetonu. W jej środku, na wysokości około 2,6 m od posadzki, unieszonym jest tarcza rozpylająca T, której napęd, w celu ochrony go od kurzu, znajduje się pod osłoną O. Materiał, przeznaczony do suszenia

doprowadzany jest do zbiornika Z, skąd rurą R dopływa do tarczy rozpryskującej T. Ażeby zasilanie jej cieczą było zawsze jednakowe, poziom cieczy w zbiorniku Z utrzymywany jest na stałej wysokości przy pomocy odpowiednich urządzeń regulujących. Powietrze wtłaczane jest do suszarni po przejściu przez kaloryfer, gdzie się on ogrzewa, przewodem rurowym dużej średnicy F. Wchodzi ono do komory przez zakrzywione łopatki kierownicze K, nadając mu wewnątrz komory ruch wirowy, co ułatwia dobre wymieszanie się jego z rozpylonym materiałem. Wysuszony produkt spada na posadzkę komory, skąd jest zgarniany przy pomocy grabi G i kierowany przez lej L do transportera ślimakowego S. Powietrze wilgotne, unoszące z komory pewną ilość pyłu, odprowadzane jest rurą B do urządzeń odpylających, na przykład filtrów workowych lub innych, gdzie zostaje odebrany od niego pył, wskutek czego zmniejszają się straty materiału przez rozkurz. Wydajność tej suszarni wynosi 1000 kg odparowanej wilgoci w ciągu 1 godziny przy zużyciu około 2,5 kg pary ogrzewającej na 1 kg odparowanej wilgoci. Napędzani jest ona przez silnik o mocy 40 KW.

rozpylanie pneumatyczne stosowane jest w suszarniach rozpryskowych nie mniej licznie niż mechaniczne. W suszarniach do mleka firmy Nestle urządzenie do pneumatycznego rozpylania, przedstawione na rysunku 31, składa się z dwóch dysz: poziomej A i pionowej B, umieszczonych przed komorą suszarnianą C. Z dyszy poziomej wylatuje z dużą prędkością strumień gorącego powietrza, który spotyka na swej drodze strumień cieczy (mleka) przeznaczony do suszenia, rozбивa go na drobne kropelki i unosi przez otwór O do komory C. Tam zachodzi suszenie i odświeżenie od wilgotnego powietrza wysuszonego materiału, który

opada na posadzkę konory. Dalsze dokładne rozdzielenie następuje w urządzeniu odpylającym do którego odchodzi powietrze z konory.

Aby można było regulować położenie obu dysz względem siebie, w celu najlepszego ich ustawienia, przynajmniej jedna z nich, w danym wypadku dysza B, jest ruchoma.

Na rysunku 32, przedstawiona jest dysza do rozpylania z kwasoodpornej stali fabryki G. Schlick w Dreźnie. Posiada ona wewnątrz ślimak spiralny, nadający cieczy, przepływającej przez nią silny ruch wirowy, wskutek czego, gdy wypływa z niej przerabiany materiał następuje rozbicie jego pod działaniem siły odśrodkowej na drobne kropelki. Otwór wylotowy dyszy jest mały. Średnica jego waha się w granicach od 1 do 2 mm, Stopień rozpylania i wydajność dyszy zależą od ciśnienia roboczego, pod którym wtłaczany jest do niej materiał. Najlepiej je charakteryzuje tablica II. sporządzona dla dyszy, posiadającej otwór wylotowy średnicy 1,2 mm, w której rozpyła się czysta woda.

tablica II.

Ciśnienie robocze atm. mdc	2	4	6	8
Wydajność dyszy $\frac{\text{liter}}{\text{godz}}$	27	38	47	54
Przeciętna średnica kropel mm	0,11	0,08	0,055	0,042
Ilość kropel na 1 liter	$143 \cdot 10^7$	$376 \cdot 10^7$	$1142 \cdot 10^7$	$2590 \cdot 10^7$
Ogólna powierzchnia kropel m ²	54,4	75,56	108,50	143,49

Z tablicy tej wynika, że im większe jest ciśnienie robocze tym drobniejsze, a więc lepsze rozpylenie.

Jeżeli suszony materiał nie obawia się zanieczyszczeń

sadzą i innymi składnikami gazów spalinowych oraz wytrzymuje wysokie temperatury, to można doprowadzać do suszarni rozpryskowej zamiast powietrza gazy spalinowe. Zmniejsza to zużycie ciepła, upraszcza instalację i daje możliwość wykorzystania ciepła odpadkowego z kotłów parowych i pieców, unoszonego normalnie przez gazy spalinowe do kominu. Jedną z suszarni rozpryskowych w których suszenie odbywa się przy pomocy spalin podana jest na rysunku 33. Jest to długa i dość wysoka komora nuruwana nieco zwężająca się ku dołowi i posiadająca przy samym dnie transporter taśmowy D. Z jednego końca komory doprowadzany jest przez dyszę A syst. G. Schlicka lub inną, drobno rozpylony materiał przeznaczony do suszenia. Gazy spalinowe wchodzi do komory z kanałów B, znajdujących się po obu jej stronach, przez szereg otworów C. Podczas pracy suszarni rozpylony materiał, opadając w atmosferze gorących gazów na transporter taśmowy wysycha i jest unoszony do komory odbiorczej E, skąd przez lej F odchodzi poza suszarnię. Spaliny opuszczają komorę kanałami G w przeciwnym końcu niż wchodzi materiał i, po przejściu przez odpylacz, idą do kominu.

Bardzo ważną składową częścią wszelkiego rodzaju instalacji do suszenia ciekłych materiałów metodą rozpryskową jest urządzenie do odpylania suszącego powietrza lub gazów spalinowych, które unoszą z komory suszarnianej w niektórych przypadkach dość duży procent wysuszonego produktu w postaci drobnego pyłu. Oddzielenie tego pyłu od powietrza lub spalin zachodzi w istniejących instalacjach albo przy pomocy filtrów workowych, albo w cyklonach i następnie w płóczkach, albo tylko w cyklonach, albo w odpylaczach elektrycznych typu Cottrell'a.

Filtry workowe z materiałów włókienniczych można stosować, gdy temperatura gazów jest niższa od 100°C oraz cząstki pyłu są dość duże. Jeżeli średnica cząstek jest mniejsza od $0,5\mu$, to oczyszczanie gazów przy pomocy filtrów z materiałów włókienniczych jest niedostateczne. Filtry workowe poza tym stawiają dość duży opór przepływającym gazom.

Cyklony szeroko są stosowane w instalacjach suszarnianych w Ameryce. Są one proste, ale zajmują dużo miejsca i mniej dokładnie oczyszczają gazy od pyłu niż filtry workowe. Dlatego dość często gaz odpylony w cyklonie przepuszczany jest dla dokładniejszego oczyszczenia jeszcze przez płócnkę.

Odpylacze elektryczne oczyszczają gazy dość dokładnie, zużywają stosunkowo mało energii, wskutek czego koszty eksploatacyjne ich nie są wielkie, ale wymagają dużych wydatków instalacyjnych. Z tego powodu są stosowane tylko w bardzo wielkich instalacjach.

§ 12. Suszarnie próżniowe.

Suszarnie!

Pod zmniejszonym ciśnieniem wszystkie substancje pracują w znacznie niższej temperaturze niż pod ciśnieniem atmosferycznym. Z tego powodu w suszarniach próżniowych powstaje duża różnica temperatur pomiędzy parą ogrzewającą i odparowywaną cieczą, co dodatnio wpływa na przewodnictwo ciepła i powiększa ilość wilgoci odparowywanej z każdego m^2 powierzchni ogrzewalnej. Daje to możliwość stosowania w suszarniach próżniowych pary o niskim ciśnieniu, a nawet pary odlotowej z naszyn i turbin parowych o prędkości do $0,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$, albowiem suszenie bardzo wielu produktów przebiega zupełnie normalnie w temperaturze około 50°C , para zaś wodna o prędkości $0,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ posiada temperaturę $80,9^{\circ}\text{C}$. W suszarniach próżniowych poza tym można

suszyć w niskich temperaturach roztwory, które pod ciśnieniem atmosferycznym parują w temperaturach wysokich (200-300°C). Nie stosując próżni trzeba by je ogrzewać źródłem ciepła o temperaturze jeszcze wyższej, co jest trudne do osiągnięcia przy ogrzewaniu parą nasyconą.

Dużą zaletą suszenia pod próżnią jest to, że odparowywane substancje są w hermetycznie zamkniętej instalacji suszarnianej przez co otoczenie jest zabezpieczone od wydzielających się w wielu wypadkach szkodliwych dla zdrowia gazów i pyłu, jak to się dzieje na przykład podczas suszenia bieli ołowianej, cjanu potasu i farb anilinowych. Suszony w hermetycznie zamkniętej instalacji materiał zabezpieczony jest poza tym od utleniającego działania powietrza, które zachodzi w suszarniach pod ciśnieniem atmosferycznym przy suszeniu^u wysokich temperaturach niektórych materiałów (na przykład tłuszczów).

Substancje bardzo hygroskopijne, jak saletra potasowa, chlorek wapnia i azotan amoni, chłoną ściwie wilgoć z powietrza i z tego powodu należy je suszyć pod próżnią.

Normalnie przy suszeniu powietrzem przez suszarnię przepływa duża jego ilość. Zawiera ono różnego rodzaju bakterje, które mogą dostać się do suszonych produktów i wywołać ich zakażenie. W suszarniach próżniowych tego niebezpieczeństwa nie ma. Suszenie materiałów wybuchowych i łatwa zapalnych w suszarniach próżniowych również jest mniej niebezpieczne niż w suszarniach powietrznych.

Suszarnie próżniowe posiadają jeszcze jedną wielką zaletę, a mianowicie dają one możność skraplania oparów wilgoci. Jest to ważne ze względu na możność uchwycenia i regenerację niektórych cennych rozpuszczalników jak benzyna, eter, alkohol

i inne, znajdujących się w szczególnych wypadkach w suszonych substancjach. Jeżeli uwzględnimy jeszcze, że suszarnie próżniowe nadają się, ze względu na niską temperaturę, do suszenia substancyj, które ulegają w wyższych temperaturach rozkładowi, to zupełnie będzie jasne dlaczego znalazły one tak szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu chemicznego.

Każda próżniowa instalacja suszarniana składa się z 1) suszarni, posiadającej wewnątrz powierzchnię ogrzewalną, 2) skraplacza, w którym kondensują się opary, wydzielające się z suszonego materiału i 3) pompy próżniowej, wytwarzającej i utrzymującej w instalacji próżnię.

Wszystkie suszarnie próżniowe spotykane w przemyśle można podzielić na następujące grupy: 1) Próżniowe suszarnie szafkowe kształtu cylindrycznego lub prostokątnego. 2) Suszarnie próżniowe z przesładkami. 3) Próżniowe suszarnie walcowe. 4) Suszarnie specjalne i kombinowane.

Na rysunku 34 przedstawiona jest prostokątna suszarnia szafkowa. Posiada ona 9 półek A o podwójnych ściankach, ogrzewanych parą, doprowadzaną do każdej z nich ze wspólnego kolektora pionowego B. Skropliny odprowadzane są przewodem rurowym C. Zamiat pary można stosować do ogrzewania gorącą wodę. Na półki ładuje się wilgotny materiał na odpowiednich tacach. Warstwa jego wynosi od 30 do 60 mm. Po hermotycznym zamknięciu drzwiczek D, uruchamia się pompę próżniową i doprowadza się do półek parę ogrzewającą. Gdy suszenie jest zakończone, należy, po zatrzymaniu pomp, wpuścić wpierw do suszarni powietrze przez kranik powietrzny E, a następnie można otworzyć drzwiczki i wyjąć gotowy materiał.

Szafa przedstawiona na rysunku 34 wykonana jest z żeliwa.

Płaskie jej ścianki wznocnione są żebrami. Jest ona z tego powodu bardzo ciężka. Znacznie lżejsze są cylindryczne suszarki szafkowe, wykonywane ze stali i posiadające z tego powodu cieńsze ścianki. Działanie ich jest takie same jak suszarki o kształcie prostokątnym.

Wydajność próżniowych suszarki szafkowych zarówno prostokątnych jak i cylindrycznych jest mała, a natężenie powierzchni ogrzewalnej półek wynosi tylko od 1 do 3 kg wilgoci na godzinę i 1 m^2 , przy czym powierzchnia półek liczy się z jednej strony. Ilość powietrza usuwanego z suszarki przez pompę próżniową zależy od tego, jak ^{szczerlnie} zamknięta jest suszarka i wynosi od 0,2 do 0,1 m^3 na $1 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ odparowywanej w suszarki wilgoci.

W szafkowych suszarkach próżniowych materiał leży spokojnie na półkach przez cały czas suszenia, wskutek czego trwa ono dość długo. Znacznie prędzej zachodzi suszenie w suszarkach próżniowych, w których podczas suszenia ulega on intensywnemu mieszaniu, wskutek czego natężenie powierzchni ogrzewalnej dochodzi w tych suszarkach do $20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$. Jedną z takich suszarki konstrukcji firmy Venuleth przedstawiona jest w sposób schematyczny na rysunku 35.

W cylindrycznym korpusie tej suszarki obraca się wał A z osadzonymi na nim skośnymi łapani B. Połowa tył łap, mieszając materiał przesuwają go w jednym kierunku pozostałe zaś w przeciwnym. Wał, otrzymujący napęd od silnika lub pędni, co jakiś czas (zwykle co 5 - 8 minut) zmienia pod wpływem specjalnego przełącznika, kierunek ruchu.

Suszarka ogrzewana jest parą, która doprowadzana jest pomiędzy podwójne ścianki korpusu. Opary odprowadzane przez wodociąg C do skraplacza, unoszą z sobą pewną ilość pyłu, który

powstaje wskutek nieszania wysychającej substancji. Pył ten nie tylko jest przyczyną strat materiału czasami dość cennego, lecz zanieczyszcza przewody i skraplacz. W niektórych, przypadkach, powstaje tak dużo pyłu, że należy ustawiać bezpośrednio przy suszarni łapacze (odpylacze) a w przewodach, odprowadzających z suszarni opary, specjalne mechaniczne urządzenia do zawracania pyłu, który w nich osiadł z powrotem do suszarni. Urządzenie takie składa się ze ślimaka D, umieszczonego w przewodzie E (Rys. 36) i napędzanego przy pomocy kółka łańcuchowego F.

Przewody odprowadzające opary z tej suszarni powinny posiadać dużą średnicę, tak że prędkość w nich pary nie przekracza $20 - 25 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$.

§ 13. Analityczna metoda obliczania suszarni.

Teoretyczne obliczenie procesu suszenia jest bardzo skomplikowane i w większości przypadków niemożliwe, albowiem nie umiemy jeszcze obliczać w sposób teoretyczny czasu, potrzebnego na całkowite wysuszenie jakiegokolwiek substancji. Z tego powodu obliczanie suszarni musi się oprzeć na danych eksperymentalnych, w sposób teoretyczny można obliczyć tylko ilość powietrza potrzebnego do suszenia i teoretyczną ilość ciepła zużywanego na odparowanie wilgoci. Natomiast ilości ciepła, straconego przez promieniowanie i przewodnictwo nie możemy obliczyć w sposób teoretyczny, gdyż nie znany jest czas suszenia. Ustala się on drogą doświadczalną. W tym celu przeprowadza się badanie laboratoryjne czasu suszenia materiału w warunkach jak najwięcej zbliżonych do tych, w jakich będzie zachodzić suszenie w projektowanej suszarni.

Ilość powietrza i teoretyczną ilość ciepła potrzebną do

suszenia obliczany z bilansów materiałowego i cieplnego.

Przed przystąpieniem do obliczeń należy jednak wyjaśnić czy suszenie zachodzi przy pomocy powietrza, czy spalin oraz czy suszarnia pracuje w sposób periodyczny, jak suszarnie przedstawione na rysunkach 7 i 8 czy w sposób ciągły, jak suszarnie podane na rysunkach 9, 10, 14 i innych, albowiem suszarnie o działaniu periodycznym obliczane są nieco inaczej niż suszarnie pracujące w sposób ciągły, w których można przyjąć, że proces suszenia i zjawiska cieplne są ustalone. Na przebieg obliczenia ma wpływ również sposób doprowadzania ciepła do suszarni. Jeżeli powietrze suszące ogrzewane jest nie tylko w kaloryferach zewnętrznych przed jego wprowadzeniem do komory suszarnianej, ale również dodatkowo przy pomocy kaloryferów wewnętrznych, jak w suszarniach przedstawionych na rysunkach 8, 16 i 17, to obliczanie jest więcej skomplikowane niż w przypadku, gdy dodatkowo ogrzewanie nie jest stosowane.

Przyjmując, że obliczamy suszarnię powietrzną, działającą w sposób ciągły i nie posiadającą dodatkowego ogrzewania wyprowadźmy następujące oznaczenia

L - ilość powietrza suchego w kg

t_0 - temperaturę powietrza przed kaloryferem oraz temperaturę otoczenia w $^{\circ}\text{C}$

t_1 - temperaturę powietrza ogrzanego wchodzącego do suszarni w $^{\circ}\text{C}$

t_2 - temperaturę powietrza wilgotnego, opuszczającego suszarnię w $^{\circ}\text{C}$

t_3 - temperaturę materiału wysuszonego, półek, tac wózków i innych urządzeń pomocniczych opuszczających suszarnię

d_0 - ilość kg wilgoci przypadającej na 1 kg powietrza zewnętrznego

d_2 - ilość kg wilgoci przypadającej na 1 kg powietrza opuszczającego suszarnię

G_1 - ilość kg materiału surowego wprowadzanego do suszarni

G_2 - ilość kg produktu wysuszonego odprowadzanego z suszarni

b_1 - wilgotność początkową materiału surowego w %

b_2 - wilgotność materiału wysuszonego w %

w - ilość kg wilgoci odparowanej w suszarni w kg

i_2 - entalpia pary w temperaturze t_2

Q_s - straty ciepła przez promieniowanie i inne w kcal

Q_u - straty ciepła w urządzeniach pomocniczych

C_n - ciepło właściwe absolutnie suchego materiału w $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

Ilość kg absolutnie suchej substancji, doprowadzanej do suszarni, równa się ilości suchej substancji w wysuszonym produkcie wobec czego

$$G_1 \frac{100 - b_1}{100} = G_2 \frac{100 - b_2}{100}$$

skąd
$$G_2 = G_1 \frac{100 - b_1}{100 - b_2} \quad (8)$$

Układając bilans wilgoci w suszarni, możemy napisać, że ilość wilgoci, doprowadzonej z powietrza zewnętrznego i z materiałów surowych, równa się ilości wilgoci, odprowadzonej z materiałów wysuszonych i z powietrzem wychodzącym z suszarni, to jest że

$$L \cdot d_0 + G_1 \frac{b_1}{100} = G_2 \frac{b_2}{100} + L \cdot d_2$$

Skąd ilość wilgoci W , odparowanej w suszarni wynosi

$$W = G_1 \frac{b_1}{100} - G_2 \frac{b_2}{100} = L d_2 - L d_0 \text{ kg} \quad (9)$$

d₀ = 0,62
B = 4,0 p₀
(10)

a ilość potrzebnego powietrza

$$L = \frac{W}{d_2 - d_0} \text{ kg}$$

Bilans cieplny suszarni, przyjmując że ciepło właściwe powietrza suchego wynosi $0,24 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$, a pary wodnej

$0,47 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$, przedstawia się w sposób następujący

Przychód

1. Ciepło zawarte w powietrzu wilgotnym, doprowadzanym do kaloryfera $Q_0 = L \cdot 0,24 \cdot t_0 + L \cdot d_0 \cdot 0,47 \cdot t_0 = L \cdot (0,24 + 0,47d_0) \cdot t_0$

2. Ciepło dostarczone na podgrzanie powietrza w kaloryferze przed suszarnią

$$Q_k = L \cdot (0,24 + 0,47d_0) \cdot (t_1 - t_0)$$

3. Ciepło zawarte w materiale wilgotnym, doprowadzanym do suszarni

$$Q_m^1 = G_1 \cdot \frac{100 - b_1}{100} \cdot C_m \cdot t_0 + G_1 \cdot \frac{b_1}{100} \cdot t_0$$

4. Ciepło zawarte w urządzeniach pomocniczych, jak półki, tace i wózki, wprowadzanych do suszarni

$$Q_u^1 = G_u \cdot C_u \cdot t_0$$

Rozchód

1. Ciepło zawarte w odchodzącym powietrzu

$$Q_2 = L \cdot 0,24 \cdot t_2$$

2. Ciepło zawarte w odchodzących z powietrzen oparach

$$Q_p = L \cdot d_0 \cdot 0,47 \cdot t_2 + W \cdot i_2$$

3. Ciepło zawarte w materiale wysuszonym

$$Q_m^2 = G_2 \cdot \frac{100 - b_2}{100} \cdot C_m \cdot t_3 + G_2 \cdot \frac{b_2}{100} \cdot t_3$$

4. Ciepło zawarte w odprowadzanych z suszarni urządzeniach pomocniczych

$$Q_u'' = G_u \cdot C_u \cdot t_3$$

5. Straty ciepła przez promieniowanie, przewodnictwo i inne Q_s

Opierając się na powyższym bilansie cieplnym możemy napisać, że

$$Q_0 + Q_k + Q_m' + Q_u' = Q_2 + Q_p + Q_m'' + Q_u'' + Q_s$$

lub

$$\begin{aligned} L \cdot (0,24 + 0,47d_0) \cdot t_0 + L(0,24 + 0,47d_0)(t_1 - t_0) + Q_m' + Q_u' = \\ = L \cdot 0,24 \cdot t_2 + L \cdot d_0 \cdot 0,47 \cdot t_2 + W \cdot i_2 + Q_m'' + Q_u'' + Q_s \end{aligned}$$

Po uproszczeniu otrzymamy

$$L \cdot (0,24 + 0,47d_0)(t_1 - t_2) = W \cdot i_2 + Q_m'' - Q_m' + Q_u'' - Q_u' + Q_s$$

albo

$$L \cdot (0,24 + 0,47d_0)(t_1 - t_2) = W \cdot i_2 + Q_m'' + Q_u'' + Q_s \quad (11)$$

gdzie $Q_u = Q_u'' - Q_u'$ jest stratą ciepła w urządzeniach pomocniczych, a $Q_m = Q_m'' - Q_m'$ jest różnicą pomiędzy ciepłem odprowadzonym z suszarni z materiałem wysuszonym, a ciepłem doprowadzonym do suszarni z materiałem wilgotnym.

Z powyższego wynika, że do obliczenia suszarni metodą analityczną mamy dwa równania (10) i (11).

Gdy przystępujemy do obliczania suszarni znany (lub zakładany) stan powietrza zewnętrznego, ilość i wilgotność materiału surowego, wilgotność wysuszonego produktu, ciepło właściwe suchej substancji i najwyższą temperaturę t_1 , którą wytrzymuje suszony materiał. Znany więc następujące wielkości

$B, t_0, \varphi_0, d_0, G_1, b_1, b_2, c_m, t_1$, na podstawie których możemy obliczyć z równania (8) G_2 , a z równania (9) W

Różnicę Q_m pomiędzy ciepłem Q_m'' wyprowadzonym z suszarni z materiałem wysuszonym, a ciepłem Q_m' wprowadzonym do suszar-

ni z materiałów wilgotnym obliczamy w sposób następujący

$$Q_n = Q''_n - Q'_n = G_2 \frac{100-b_2}{100} \cdot C_n \cdot t_3 + G_2 \cdot \frac{b_2}{100} \cdot t_3 - G_1 \frac{100-b_1}{100} \cdot C_n \cdot t_0 + G_1 \frac{b_1}{100} \cdot t_0$$

$$Q_n = G_2 \left(\frac{100-b_2}{100} C_n + \frac{b_2}{100} \right) t_3 - G_1 \left(\frac{100-b_1}{100} C_n + \frac{b_1}{100} \right) t_0$$

W równaniu tym temperaturę wysuszonego materiału t_3 , przyjmujemy dla suszarni przeciwprądowych równą temperaturze t_1 powietrza gorącego wchodzącego do suszarni, a dla suszarni współprądowych - temperaturze t_2 powietrza wilgotnego, opuszczającego suszarnię.

Straty ciepła w urządzeniach pomocniczych, jak półki, tace, wózki i t. p. obliczamy ze wzoru

$$Q_u = G_u \cdot C_u (t_3 - t_0)$$

Strat ciepła przez promieniowanie, przewodnictwo i inne Q_s obliczyć dokładnie nie można. Zwykle obliczamy je w przybliżeniu, opierając się na prawach przewodnictwa ciepła, albo przyjmujemy odpowiednią wielkość liczbową, opierając się na obserwacji i pomiarach, pracujących w przemyśle, podobnych do obliczanej, instalacji suszarnianych.

Normalnie wynoszą one od 10 do 25 % ciepła zużytego użytecznie na odparowanie wilgoci, lub od 5 do 15 % ciepła doprowadzonego do suszarni z podgrzany powietrzem, jeżeli pracuje ona bez kaloryferów wewnętrznych, albo całkowitej ilości ciepła doprowadzonej do suszarni przez kaloryfery i zewnętrznie i wewnętrznie.

Po ustaleniu wartości liczbowych dla Q_n , Q_u , Q_s oraz W , nie są jeszcze znane w równaniach (10) i (11) następujące wielkości:

- 1) temperatura t_2 wilgotnego powietrza opuszczającego suszarnię
- 2) entalpia i_2 oparów w temperaturze t_2
- 3) ilość kg wilgoci d_2 , przypadającej na 1 kg powietrza suchego.

Entalpia pary oraz ilość wilgoci d , zawartej w jednym kg powietrza suchego, są bardzo skomplikowanymi funkcjami temperatury. Z tego powodu zależność entalpii od temperatury podawana zwykle bywa w postaci tablicy. (Tablica III). Co się zaś tyczy zawartości wilgoci w powietrzu d , to zależność jej od temperatury jest złożona, albowiem, jak widać ze wzoru (5) w § 4, jest ona funkcją prężności pary nasyconej p_n , która jest, jak wiadomo, zależną od temperatury. Zależność ta również jest przedstawiona w postaci tablic (tablica III).

Zawartość wilgoci w 1 kg suchego powietrza d , jest, jak wynika ze wzoru (5), funkcją nie tylko temperatury lecz również i wilgotności względnej powietrza φ . Okoliczność ta unieważnia rozwiązanie równań (10) i (11) bez założenia wartości liczbowej φ_2 , na podstawie badań i obserwacji, pracujących instalacji suszarnianych, podobnych do obliczanej.

Po przyjęciu odpowiedniej wartości dla φ_2 , przebieg dalszych obliczeń jest następujący:

- 1) bierzemy z tablicy III wartość p_n dla odpowiedniej wilgotności φ i temperatury t_2 , którą przypuszczamy, że będzie posiadało wilgotne powietrze, opuszczające suszarnię i wstawiamy do równania (5), ilość którego obliczamy d_2 . Ustaloną w ten sposób zawartość wilgoci w 1 kg powietrza odchodzącego z suszarni wstawiamy do równania (10),
- 2) obliczoną z równania (10) ilość powietrza L oraz wartość

Tablica III

Zależność entalpii i prężności pary nasyconej od temperatury.

temperat $t^{\circ}\text{C}$	entalpia i $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	prężność pary P_n mm Hg	temperat $t^{\circ}\text{C}$	entalpia i $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	prężność pary P_n mm Hg
0	595	4,26	38		49,30
5	597,3	6,53	40	613,5	54,91
10	599,6	9,16	43		64,35
12	600,6	10,46	45	615,7	74,39
14	601,6	11,91	50	618,0	91,98
15	602,0	12,70	55	620,2	117,48
16	602,5	13,54	60	622,5	148,79
18	603,4	15,36	65	624,7	186,94
20	604,3	17,40	70	626,8	233,16
22	605,3	19,66	75	629,0	288,52
24	606,2	22,18	80	631,1	354,64
26	607,1	24,99	85	633,2	433,04
28	608,0	28,10	90	635,3	525,39
30	608,9	31,55	95	637,4	633,69
32	609,8	35,36	100	639,4	760,00
35	611,2	41,83	110	643,3	1074,64

liczbą entalpii i_2 , wziętej z tablicy III dla tej samej przypuszczalnej temperatury t_2 wstawiany do równania (11) i obliczany z niego temperaturę t_2 .

Jeżeli obliczona w ten sposób temperatura mało się różni od przypuszczalnej, to uznajemy, że temperatura t_2 i ilość powietrza L są już określono, w przeciwnym przypadku zakładamy inną temperaturę t_2 i przeprowadzamy te same obliczenia co

poprzednio oraz robimy następujący wykres (Rys.37).

Na osi poziomej odkładamy temperatury zakładane (przy -
puszczalne) a na osi pionowej odpowiadające im temperatury
obliczone z równania (11). Otrzymane w ten sposób dwa punkty
A i B łączymy. Następnie prowadzimy przez początek układu
współrzędnych prostą OD pod kątem 45° do osi współrzędnych. Punkt
C przecięcia się tej prostej z prostą AB (lub z jej przedłu-
żeniem) wyznaczy właściwą temperaturę t_2 . Znając zaś tempe-
raturę powietrza, opuszczającego suszarnię, obliczenie cieplno
instalacji suszarnianej nie przedstawia większych trudności.

Przykład. Obliczyć rozchód ciepła Q , ilość powietrza potrze-
bnego do suszenia L oraz sprawność η suszarni przeciwprądowej
syst. prof. W. Iwanowskiego, przeznaczonej do suszenia

$G_1 = 1000$ kg jarzyn na dobę, jeżeli wilgotność początkowa ja-
rzyn wynosi $b_1 = 85\%$, a wilgotność produktu wysuszonego $b_2 = 20\%$.

Najwyższa temperatura dopuszczalna powietrza gorącego wynosi
 $t_1 = 70^{\circ}\text{C}$. Ciśnienie barometryczne $B = 752$ mm Hg, temperatura
powietrza zewnętrznego $t_0 = 10^{\circ}\text{C}$, wilgotność $\varphi_0 = 1$ (100%).

Jarzyny umieszczone są w suszarni na drewnianych półkach sito-
wych o ciężarze 5 kg, przy czym na każdym sicie nieści się
4 kg jarzyn. Średnia wilgotność powietrza, opuszczającego su-
szarnię, wynosi $\varphi_2 = 0,80$. Straty ciepła przez promieniowanie
stanowią 20 % ciepła zużytego użytecznie.

Rozwiązanie. Ilość kg jarzyn wysuszonych

$$G_2 = G_1 \frac{100-b_1}{100-b_2} = 1000 \frac{100-85}{100-20} = 187,5 \text{ kg}$$

Ilość wilgoci odparowanej

$$W = G_1 \frac{b_1}{100} - G_2 \frac{b_2}{100} = 1000 \frac{85}{100} - 187,5 \frac{20}{100} = 812,5 \text{ kg}$$

Dla obliczenia różnicy Q pomiędzy ciepłami, wyprowadzonym

z suszarni z materiałów wysuszonych, a ciepłem doprowadzonym z materiałów wilgotnych, przyjmujemy, że temperatura materiału wysuszonego równa się temperaturze gorącego powietrza, to jest że $t_3 = t_1 = 70^\circ\text{C}$, a ciepło właściwe suchej substancji równa się ciepłu właściwemu drzewa sosnowego t.j. że $C_n = 0,65 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$

$$Q_n = G_2 \left(\frac{100-b_2}{100} C_n + \frac{b_2}{100} \right) t_3 - G_1 \left(\frac{100-b_1}{100} C_n + \frac{b_1}{100} \right) t_0 =$$

$$= 137,5 \left(\frac{100-20}{100} \cdot 0,65 + \frac{20}{100} \right) \cdot 70 - 1000 \left(\frac{100-85}{100} \cdot 0,65 + \frac{85}{100} \right) \cdot 10 =$$

$$= -25 \text{kcal}$$

Straty ciepła w półkach sitowych opuszczających suszarnię wynoszą

$$Q_u = G_u \cdot C_u \cdot t_3 = 1250 \cdot 0,65 \cdot 70 = 56875 \text{ kcal}$$

Ciepło stracone przez promieniowanie wynosi, jak wynika z warunków zadania 20 % ciepła zużytego użytecznie, które równa się w przybliżeniu 600 W, wobec czego straty przez promieniowanie wynoszą

$$Q_s = \frac{20}{100} \cdot 600 \text{ W} = 120 \cdot 812,5 = 97,500$$

Zawartość wilgoci w 1 kg powietrza zinnego obliczamy, opierając się na tablicy III, ze wzoru (5)

$$d_o = 0,622 \frac{\varphi_o \cdot p_n}{B + \varphi_o \cdot p_n} = 0,622 \frac{9,16}{752 - 9,16} = 0,0077 \text{ kg}$$

Podstawiając znane wartości liczbowe do równań (10) i (11) otrzymamy

$$L = \frac{812,5}{1 - 0,0077} \quad (*)$$

$$L(0,24 + 0,47 \cdot 0,0077)(70 - t_2) = 812,5 \cdot 1,2 - 25 + 56875 + 97500$$

lub po uproszczeniu

$$0,2436L(70 - t_2) = 812,5 i_2 + 154350 \quad (* *)$$

Dla rozwiązania równań (*) i (**) założymy, że temperatura $t_2 = 30^\circ\text{C}$. Wtedy z tablicy III odczytamy, że $p_n = 31,55$ mm Hg, a $i_2 = 608,9 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$. Wstawiając znane wartości do równania (5) otrzymamy

$$d_2 = 0,622 \frac{0,80 \cdot 31,55}{752 - 0,80 \cdot 31,55} = 0,0216 \text{ kg}$$

wobec czego z równania (*)

$$L = \frac{812,5}{0,0216 - 0,0077} = 58453$$

Podstawiając znane wartości do równania (**) będziemy mieli

$$0,2436 \cdot 58453(70 - t_2) = 812,5 \cdot 608,9 + 154350$$

Rozwiązując powyższe równanie otrzymamy, że $t_2 = 24,4^\circ\text{C}$, co znacznie się różni od temperatury założonej, wobec czego obliczenia należy powtórzyć.

W tym celu przyjmujemy teraz, że temperatura powietrza opuszczającego suszarnię wynosi $t_2 = 27^\circ\text{C}$, to wtedy $p_n = 26,54$ mm Hg $i_2 = 607,5$ a d_2 ze wzoru (5) równa się

$$d_2 = 0,622 \frac{0,80 \cdot 26,54}{752 - 0,80 \cdot 26,54} = 0,0181 \text{ kg}$$

wobec czego

$$L = \frac{812,5}{0,0181 - 0,0077} = 78082$$

Podstawiając do równania (**) otrzymamy

$$0,2436 \cdot 78082 \cdot (70 - t_2) = 812,5 \cdot 607,5 + 154350$$

skąd $t = 35,9^\circ\text{C}$

Odkładając na osi poziomej temperatury założone, a na osi pionowej obliczone otrzymamy z wykresu (Rys.37), że tempera -

tura powietrza opuszczającego suszarnie wynosi $t_2 = 29^\circ\text{C}$

Dla sprawdzenia czy temperatura t_2 jest określona prawidłowo, obliczamy z równań (*) i (***) ilość powietrza L , potrzebną do suszenia.

Jeżeli otrzymane z tych wzorów wyniki identyczne, lub mało różniące się od siebie, to wskazywałoby to, że temperatura $t_2 = 29^\circ\text{C}$ jest temperaturą właściwą.

Dla temperatury 29°C z tablicy III otrzymujemy, że $p_n = 29,82 \text{ mm Hg}$ a $i_2 = 608,5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$

Podstawiając do równania (5) będziemy mieli

$$d = 0,622 \frac{0,80 \cdot 29,82}{752 - 0,80 \cdot 29,82} = 0,0203 \text{ kg}$$

wobec czego L z równania (*) wynosi

$$L = \frac{812,5}{0,0203 - 0,0077} = 64484 \text{ kg,}$$

a z równania (***)

$$L = \frac{812,5 \cdot 608,5 + 154350}{0,2436 \cdot (70 - 29)} = 64796 \text{ kg}$$

Widzimy, że różnica pomiędzy wartościami dla L obliczonymi z równań (*) i (***) jest mała. Wynosi ona 314 kg co stanowi tylko $\frac{1}{2}\%$ wartości średniej, która równa się

$$L = \frac{64484 + 64796}{2} = 64640 \text{ kg}$$

Ilość powietrza na 1 kg odparowanej wilgoci wynosi

$$l = \frac{L}{W} = \frac{64640}{812,5} = 79,6 \text{ kg}$$

Ilość ciepła, którą należy doprowadzić do powietrza ze wewnętrznego, aby go ogrzać w kaloryferze przed suszarnią od temperatury $t_0 = 10^\circ\text{C}$ do temperatury $t_1 = 70^\circ\text{C}$ wynosi

$$Q = L(0,24 + 0,47 \cdot d_0) (t_1 - t_0) =$$
$$= 64640(0,24 + 0,47 \cdot 0,0077)(70-10) = 944778 \text{ kcal.}$$

Ciepło zużyte w suszarni na odparowanie wilgoci wynosi

$$Q_{uz} = W \cdot (i_2 - t_0) = 812,5 \cdot (608,5 - 10) = 486281.$$

Sprawność więc suszarni równa się

$$\eta = \frac{Q_{uz}}{Q} = \frac{486281}{944778} = 0,515$$

Bilans cieplny obliczanej suszarni przedstawia się w sposób następujący

Przychód

- 1) Ciepło wprowadzone z gorącym powietrzem

$$L \cdot (0,24 + 0,47 d_0) \cdot t_1 = 1103871$$

- 2) Ciepło zawarte w materiale wilgotnym

$$Q'_m = G_1 \left(\frac{100-b_1}{100} C_m + \frac{b_1}{100} \right) \cdot t_0 = 9475$$

Razem 1113346

Rozchód

- 1) Ciepło odprowadzone w powietrzu wilgotnym

$$Q_p = L(0,24 + 0,47 d_0) t_2 + W \cdot i_2 = 951768$$

- 2) Ciepło zawarte w materiale wysuszonym

$$Q''_m = G_2 \left(\frac{100-b_2}{100} C_m + \frac{b_2}{100} \right) t_2 = 9450 \quad 9450$$

- 3) Straty na ogrzanie urządzeń

$$Q_u = G_u \cdot C_u \cdot (t_2 - t_0) = 56875$$

- 4) Straty przez promieniowanie

97256

Razem 1115349

Bilans się nie zgodził o -2003 kcal. Błąd więc wskutek

niedokładności obliczeń wynosi 0,18 %.

§ 14. Graficzna metoda obliczania suszarni.

Metoda analityczna obliczania suszarni, rozpatrywana w poprzednim paragrafie, jest dość kłopotliwa, gdyż wymaga skomplikowanych obliczeń i dużo czasu. Znacznie łatwiejszą, prędszą i więcej pogładową jest metoda graficzna.

W literaturze technicznej, poświęconej suszarnictwu, można znaleźć kilka mniej lub więcej podobnych do siebie sposobów graficznego rozwiązania suszarnictwa. Odrębne metody graficzne opracowane między innymi przez profesorów I. Ramzina i J. Birkgana w Rosji, Martin'a i Pierre'a we Francji, prof. Molliera w Niemczech i prof. Cz. Grabowskiego w Polsce.

Metoda, opracowana pod kierownictwem prof. Grabowskiego i w Zakładzie Maszynoznawstwa Ogólnego i Chemicznego Politechniki Warszawskiej, jest bezsprzecznie najbardziej pogładową. Pozwala ona szybko i z dostateczną do celów technicznych dokładnością określić dane, niezbędne do obliczenia ilości potrzebnego do suszenia powietrza, zużycia ciepła oraz sprawność suszarni. Wobec tego, że została ona teoretycznie uzasadniona i opisana w pracy prof. Grabowskiego "Teoria suszarnictwa w oświetleniu graficznym" (Gazeta Cukrownicza' rok 1934) oraz w pracy inż. Zb. Margasinskiego "Przykłady graficznych obliczeń bilansów cieplnych w suszarni" wydanej przez Koło Chemików S.P.W. w roku 1937, podam ją w skrócie.

Metoda graficzna prof. Cz. Grabowskiego oparta jest na trzech zasadniczych wykresach podanych na rysunku 38.

Na wykresie I zostały przedstawione ciśnienia cząstkowe pary wodnej P_{H_2O} w zależności od temperatury t i wilgotności

względnej powietrza φ i ciśnienia cząstkowe zostały obliczone ze wzoru

$$P_{H_2O} = \varphi \cdot P_n$$

przy czym prężność pary wodnej nasyconej w zależności od temperatury zostały wzięte z tablicy III.

Odejmując od ciśnienia barometrycznego B ciśnienie cząstkowe pary wodnej P_{H_2O} , otrzymamy ciśnienie cząstkowe powietrza P_p .

$$P_p = B - P_{H_2O}$$

Prof. Cz. Grabowski przedstawia ciśnienia cząstkowe powietrza w zależności od temperatury i od stopnia nasycenia na specjalnym wykresie, który nie został na rysunku 38 podany, jako posiadający mniejsze znaczenie.

Na wykresie II zostały przedstawione ilości pary wodnej d w jednym kg suchego powietrza w zależności od temperatury t i wilgotności względnej φ , przy czym ilość pary wodnej d zostały obliczone z równania (5).

Na wykresie III przedstawiona jest entalpia powietrza wilgotnego jako funkcja temperatury t i wilgotności względnej φ . Wykres ten składa się z dwóch części. Pierwsza z nich nad osią temperatur przedstawia sobą ciepło q , zawarte w parze wodnej, znajdującej się w 1 kg suchego powietrza, a drugą pod osią entalpię suchego powietrza i_p w zależności od temperatury.

Ciepło zawarte w parze wodnej obliczone zostało na podstawie równania (6) ze wzoru

$$q = d \cdot i_{H_2O} = d(595 + 0,47 t)$$

entalpia zaś suchego powietrza ze wzoru

$$i_p = 0,24 t$$

Wykresy powyższe posiadają wspólną poziomą oś temperatur, co pozwala wykonać ich jeden pod drugim na wspólnej siatce i rzutować punkty z wykresu na wykres. Każdemu punktowi na jednym wykresie odpowiada jeden tylko ściśle określony punkt na dwóch pozostałych wykresach.

Wykresy podane na rysunku 38 sporządzone zostały w założeniu, że ciśnienie barometryczne B wynosi 760 mm Hg. Dla suszarni znajdujących się w miejscowościach, gdzie średnie ciśnienie barometryczne znacznie się różni od 760 mm należy wykonać wykresy dla właściwego ciśnienia barometrycznego.

Aby wyjaśnić, jak należy się posługiwać powyższymi wykresami przy obliczaniu suszarni, rozwiążmy przykład, podobny do rozwiązywanego w poprzednim paragrafie.

Przykład. Obliczyć rozchód ciepła Q ilość powietrza potrzebną do suszenia L oraz sprawność suszarni przeciwprądowej syst. prof. W, Iwanowskiego, przeznaczonej do suszenia $G_1 = 1000$ kg jarzyn na dobę jeżeli wilgotność początkowa jarzyn wynosi $b_1 = 85\%$, a wilgotność produktu wysuszonego $b_2 = 20\%$. Najwyższa dopuszczalna temperatura powietrza gorącego wynosi $t_1 = 70^\circ\text{C}$. Ciśnienie barometryczne $B = 760$ mm Hg, temperatura powietrza zewnętrznego $t_0 = 10^\circ\text{C}$, wilgotność $\psi = 1(100\%)$. Na podgrzanie wysuszonego produktu oraz półek sitowych, na których leżą suszone jarzyny zużywa się 5% , a na pokrycie strat ciepła przez promieniowanie 3% ciepła doprowadzonego z podgrzanyim powietrzem. Wilgotność powietrza opuszczającego suszarnie wynosi $\psi_2 = 0,80$.

Rozwiązanie. W przykładzie obliczania suszarni metodą rachunkową została ustalona ilość odparowanej wilgoci, która wynosi $W = 812,5$ kg. Do kaloryfera suszarni wchodzi powietrze o temperaturze $t_0 = 10^\circ\text{C}$

i wilgotności $\psi_0 = 100 \%$. Parametry te wyznaczą na wykresie II punkt A. Na osi pionowej możemy odczytać zawartość wilgoci d_0 w jednym kg powietrza doprowadzonego $d_0 = 0,0057$ kg.

W kaloryferze powietrze ogrzewa się do temperatury $t_1 = 70^{\circ}$, przy czym ilość wilgoci w nim pozostaje bez zmian, wobec czego proces ogrzewania w kaloryferze można przedstawić linią poziomą AB, Punkt B wyznaczy wilgotność względną powietrza, wchodzącego do suszarni. Wynosi ona $\psi_1 = 2,6 \%$.

Znając temperaturę i wilgotność powietrza, wchodzącego do suszarni, możemy wyznaczyć punkt B na wykresie III i otrzymamy entalpię i , powietrza, wchodzącego do suszarni, która wynosi $i_1 = 16,8 + 3,6 = 20,4 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$, albowiem przedstawia ją odcinek BB_1 .

Z jednym kg suchego powietrza wchodzi więc do suszarni 20,4 kcal ciepła zawartego w 1 kg powietrza i w 0,005 kg pary. Część tego ciepła, wynosząca według warunków zadania $5 + 8 = 13 \%$, zużywa się na podgrzanie półek sitowych i na pokrycie strat ciepła przez promieniowanie, a reszta czyli $20,4 - 0,13 \cdot 20,4 = 17,74$ kcal zawarta w powietrzu, przepływa - jącym przez suszarnię, bierze czynny udział w procesie suszenia i zostaje uniesiona z suszarni przez powietrze odlotowe.

Odejmując od odcinka BB_1 odcinek $BC = 0,13 BB_1$, otrzymamy punkt C, który wyznacza na wykresie III ilość ciepła przypadającego na 1 kg suchego powietrza, która bierze czynny udział w procesie suszenia. Aby znaleźć temperaturę t_2 powietrza opuszczającego suszarnię poprowadzimy przez punkt C prostą pochyłą, równoległą do linii OB_1 . Punkt E przecięcia się tej prostej z krzywą stałej wilgotności $\psi = 80 \%$ wyznaczy temperaturę t_2 , którą odczytujemy z wykresu III $t_2 = 28,8^{\circ} \text{C}$. Łącząc punkty

B i E ze sobą otrzymamy prostą BE, przedstawiającą w przybliżeniu brzebieg procesu suszenia w komorze suszarni, jeżeli podgrzewanie półek sitowych i pokrycie strat ciepłych na promieniowanie zachodzi równomiernie z suszeniem.

Mając temperaturę t_2 i wilgotność względną φ_2 , możemy wyznaczyć punkt E na wykresie II i odczytać z niego zawartość wilgoci d_2 w jednym kg powietrza opuszczającego suszarnię $d_2 = 0,0192$ kg.

Ilość powietrza potrzebna do wysuszenia wynosi

$$L = \frac{W}{d_2 - d_0} = \frac{812,5}{0,0192 - 0,0057} = 60185 \text{ kg}$$

Rozchód ciepła

$$Q = L(0,24 + 0,47 \cdot d_0)(t - t_n) = \\ = 60185(0,24 + 0,47 \cdot 0,0057)(70 - 10) = 876294 \text{ kcal}$$

Ciepło zużyte w suszarni na odparowanie wilgoci

$$Q_{uz} = W(i_2 - t_0) = 812,5(608,2 - 10) = 486037 \text{ kcal}$$

gdzie $i_2 = 608,2$ jest to entalpia pary w temperaturze $28,8^\circ\text{C}$ (tab. III)

Sprawność suszarni

$$\eta = \frac{Q_{uz}}{Q} = \frac{486037}{876294} = 0,555$$

Straty ciepła przez promieniowanie

$$Q_s = 0,08 \cdot L \cdot i_1 = 0,08 \cdot 60185 \cdot 20,4 = 98222 \text{ kcal}$$

Ciepło zużyte na ogrzewanie wysuszonego produktu i półek sitowych

$$Q_m + Q_u = 0,05 \cdot 60185 \cdot 20,4 = 51389 \text{ kcal}$$

Przykład II. Obliczyć rozchód ciepła Q , ilość powietrza potrzebną do suszenia L oraz sprawność suszarni o działaniu ciągłym przeznaczoną do suszenia $G_1 = 2000$ kg na dobę od wilgotności początkowej $b_1 = 70\%$ do wilgotności końcowej $b_2 = 15\%$. Najwyższa temperatura dopuszczalna dla powietrza gorącego wynosi $t_1 = 50^\circ\text{C}$. Ciśnienie barometryczne $B = 760$ mm Hg, temperatura powietrza zewnętrznego $t_0 = 15^\circ\text{C}$, wilgotność $\varphi_0 = 0,7$. Na podgrzanie materiału wysuszonego i urządzeń pomocniczych oraz straty ciepłe przez promieniowanie traci się 18% ciepła zużytego na odparowanie wilgoci. Suszarnia posiada kaloryfery wewnętrzne utrzymujące temperaturę na stałym poziomie tak, że proces suszenia jest izotermicznym. Wilgotność powietrza, opuszczającego suszarnię wynosi $\varphi_2 = 0,5$ (50%).

Rozwiązanie. Ciężar produktu wysuszonego

$$G_2 = G_1 \frac{100-b_1}{100-b_2} = 2000 \frac{100-70}{100-15} \cong 706 \text{ kg}$$

Ilość odparowanej wody

$$W = G_1 - G_2 = 2000 - 706 = 1294 \text{ kg}$$

Stan powietrza zewnętrznego o temperaturze $t_0 = 15^\circ\text{C}$ i wilgotności $\varphi_0 = 70\%$ przedstawia na wykresie II punkt M. Zawiera ono, jak widać z wykresu, $d_0 = 0,0074$ kg pary na 1 kg suchego powietrza, oraz

$$J_M = 0,24 t_0 + d_0 \cdot i_0 = 3,60 + 4,46 = 8,06 \text{ kcal}$$

ciepła na 1 kg suchego powietrza.

Powietrze to przed wprowadzeniem do suszarni zostaje podgrzane do 50°C . Punkt odpowiadający powietrzu podgrzanemu wyznaczamy graficznie, kreśląc przez punkt M na wykresie I lub II

(Rys. 38) poziomą prostą, aż do przecięcia się jej w punkcie N z izotermą $t_1 = 50^\circ\text{C}$. Przenosząc następnie punkt N na wykres III, odczytujemy entalpię

$$J_N = 0,24 \cdot t_0 + d_0 \cdot i_1 = 12 + 4,57 = 16,57 \text{ kcal}$$

Powietrze nawilża się w suszarni oparami wilgoci przy stałej temperaturze, ciepło zaś potrzebne na odparowanie cieczy oraz na ogrzanie urządzeń pomocniczych i na pokrycie strat cieplnych doprowadzane jest przez kaloryfery wewnętrzne. Izotermiczny proces suszenia przedstawia na wykresach II i III pionowa prosta NP, poprowadzona przez punkt N do krzywej stałej wilgotności $\varphi_2 = 50\%$. Punkt P przedstawia na wykresach stan powietrza opuszczającego suszarnię. Zawiera ono, jak widać z wykresu II, $d_2 = 0,0405$ kg wilgotności na 1 kg suchego powietrza oraz, jak wynika z wykresu III,

$$J_P = 0,24 \cdot t_2 + d_2 \cdot i_2 = 12 + 25,02 = 37,03 \text{ kcal}$$

ciepła na 1 kg suchego powietrza

Na odparowanie W kg wilgoci potrzeba suchego powietrza

$$L = \frac{W}{d_2 - d_0} = \frac{1294}{0,0405 - 0,0074} = 39094 \text{ kg}$$

Ilość ciepła zużyta na odparowanie wilgoci, wynosi

$$Q_{uz} = W(i_2 - t_0) = 1294(618 - 15) = 780282 \text{ kcal}$$

gdzie $i_2 = 618$ jest entalpią pary w temperaturze $t_2 = 50^\circ\text{C}$

(z tablicy III)

Ciepło stracone na podgrzanie wysuszonego materiału, urządzeń pomocniczych i przez promieniowanie wynosi

$$Q_{str} = 0,18 \cdot Q_{uz} = 0,18 \cdot 780282 = 140451 \text{ kcal}$$

Ciepło zużyte na podgrzanie powietrza od $t_0 = 15^{\circ}\text{C}$ do $t_1 = 50^{\circ}\text{C}$ w kaloryferze przed suszarnią

$$\begin{aligned} Q_1 &= L(0,24 + 0,47 d_0)(t_1 - t_0) = \\ &= 39094 \cdot (0,24 + 0,47 \cdot 0,0074)(50 - 15) = 333081 \text{ kcal} \end{aligned}$$

Ciepło dostarczane przez kaloryfery wewnętrzne

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_{\text{str}} + L(J_p - J_N) = 140451 + 39094(37,03 - 16,57) = \\ &= 940314 \text{ kcal} \end{aligned}$$

Ogólna ilość doprowadzonego ciepła

$$Q = Q_1 + Q_2 = 333081 + 940314 = 1273395 \text{ kcal}$$

Sprawność suszarni

$$\eta = \frac{Q_{\text{uż}}}{Q} = \frac{780282}{1273395} = 0,613$$

Wykresy suszarnicze prof. Cz. Grabowskiego, jak widzimy są wygodne w użyciu, jeżeli wykonane są w małej skali, ale w tym przypadku są mało dokładne. Zwiększając skale, zyskujemy na dokładności, lecz posługiwanie się wykresami jest mniej wygodne. Trzeba zaznaczyć, że należy je sporządzać, zresztą jak i wykresy innych autorów, dla średnich ciśnień barometrycznych miejscowości, w której znajduje się obliczana suszarnia. Posługiwanie się wykresem, sporządzonym dla innego ciśnienia barometrycznego (na przykład dla ciśnienia $B = 760 \text{ mm Hg}$) prowadzi z punktu widzenia teoretycznego do błędnych wyników.

Wobec tego jednak, że wykonanie wykresów w dużej skali dla właściwego ciśnienia barometrycznego jest dość uciążliwe i zabiera sporo czasu, można dla przybliżonych obliczeń stosować wykresy sporządzone dla ciśnienia 760 mm Hg .

Bardzo szybko można zebrać dane, niezbędne dla obliczenia

suszarni, posługując się nomogramem suszarniczym sporządzonym przez inżyniera Zb. Margasińskiego, starszego asystenta Zakładu Maszynoznawstwa Ogólnego i Chemicznego. Nomogram ten został przez niego opisany we wspomnianej poprzednio pracy "Przykłady graficznych obliczeń bilansów cieplnych suszarni".

Inż. Zb. Margasiński opisuje swój nomogram w sposób następujący *)

Nomogram przedstawiony na Rys. 39 jest próbą spopularyzowania wykresów suszarniczych. Jest on prosty, przejrzysty, łatwy w użyciu, a dokładność jego dla obliczeń technicznych jest dostateczna. Składa się z 4 linii, zaopatrzonych w 6 skal:

- 1) prosta AB, posiadająca równomierną skalę, wyraża procent nasycenia powietrza parą wodną
- 2) prosta CD, zaopatrzona w podwójną skalę:
 - a) równomierną, wyrażającą ciśnienie cząstkowe pary wodnej
 - b) nierównomierną, wyznaczającą ilość gramów pary wodnej, przypadającej na 1 kg suchego powietrza w myśl równania

$$d = 622 \cdot \frac{P_{H_2O}}{B - P_{H_2O}}$$

- 3) prosta BC, zaopatrzona w
 - a) nierównomierną skalę temperatur, wyznaczoną graficznie oraz

*) W opisie tym zmieniłem oznaczenia inż. Zb. Margasińskiego na stosowane dotychczas przeze mnie.

b) nierównomierną skalę entalpii 1 kg suchego powietrza wyznaczoną z równania

$$i_p = 0,24 t$$

4) krzywa CE, stanowiąca praktycznie linię prostą, stanowi oś entalpii d gramów pary wodnej, nasycającej 1 kg suchego powietrza.

Tablice IV, V, VI i VII zawierają liczbowe dane niezbędne do wyznaczenia skal nomogramu.

Zasada wykresu. Własności fizyczne powietrza wilgotnego są przedstawione na 4 liniach. Jeśli znamy dla danego powietrza dwie własności fizyczne, wyznaczające punkty na 2-ech spośród linii powyższych, to kreśląc prostą przez te dwa punkty, otrzymamy, jako przecięcie się tej prostej z innymi skalami pozostałe własności fizyczne. Tak np. dla powietrza o tem. 15°C i 70% nasycenia, znajdujemy punkt F na skali AB (70 % nasycenia), oraz punkt K na skali BC (15°C) łączymy te dwa punkty prostą i odczytujemy z przecięć: punkt H z linią CE i punkt M z linią CD. Otrzymujemy liczbowe dane: $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 8,9 mm Hg, $i_p = 3,6$ kcal, $i_{\text{H}_2\text{O}} = 4,5$ kcal d = 7,35 g.

Wyznaczenie skali temperatur. Punkt A odpowiadający 100 % nasycenia łączymy kolejno z punktami na skali CD odpowiadającym prężnościom pary nasyconej. Otrzymujemy szereg przecięć ze skalą CB, które nam utworzą na tej linii skalę temperatur. O ile prężność pary wodnej przekracza wymiary wykresu, możemy wyznaczyć temperatury przy mniejszych nasyceniach.

Wyznaczenie skali entalpii pary wodnej. Wyznaczamy na wykresie za pomocą dwóch prostych - dwa stany powietrza o jednakowej i_{H_2O} entalpii pary wodnej. Punkt przecięcia tych prostych daje nam punkt skali CE. Tak np., aby wyznaczyć punkt, odpowiadający 6 kcal na skali CE, wyznaczamy proste dla powietrza o

1) temperaturze $15^{\circ}C$., $d_1 = 9,97$ g i

2) " $100^{\circ}C$., $d_2 = 935$ g

Punkt przecięcia tych prostych wyznacza punkt 6 kcal na prostej CE.

Wykreślanie pozostałych skal nomogramu nie wymaga specjalnych wyjaśnień. Aby wykazać dokładność wykresu przytoczę kilka przykładów zestawień teoretycznych wartości z odczytanymi z wykresu

Temperat.	Nasyconie	odczyt.	Teoretycznie	Błąd %
$15^{\circ}C$	70 %	$d=7,35$ $i=4,5$	7,4 4,46	-0,7 +0,9
$60^{\circ}C$	6 %	$d=7,35$ $i=4,65$	7,4 4,62	-0,7 +0,7
$60^{\circ}C$	40 %	$d=53,0$ $i=33,4$	53,08 33,06	-0,1 +1,0
$40^{\circ}C$	50 %	$d=23,6$ $i=14,56$	23,42 14,42	+0,5 +1,0

Błąd maksymalny nie przekracza 1 %, co stanowi dostateczną dokładność dla obliczeń technicznych, zwłaszcza, że każda metoda graficzna daje pewne odchylenia.

tablica IV.

Zależność prężności pary wodnej od temperatury.

Temperatura	Prężność pary wodnej nasyconej	Procent nasycenia	Cisnienie cząstkowe pary wodnej	Temperatura	Prężność pary wodnej nasyconej	Procent nasycenia	Cisnienie cząstkowe pary wodnej
t°C	p _n mm Hg	%	P _{H₂O}	t°C	p _n mm Hg	%	P _{H₂O}
0	4,58			50	92,51	50	46,26
5	6,54			55	118,04	40	47,22
10	9,21			60	149,38	30	44,81
15	12,79			65	187,54	20	37,51
20	17,54			70	233,7	20	46,74
25	23,76			75	289,1	10	28,91
30	31,82			80	355,1	10	35,51
35	42,17			85	433,6	10	43,36
40	55,32	90	49,79	90	525,8	10	52,58
45	71,88	70	50,32	95	633,9	5	31,70
				100°	760,0	5	38,00

tablica V.

Zawartość pary wodnej w powietrzu wilgotnym w gramach na kg suchego powietrza w zależności od ciśnienia cząstkowego pary wodnej

d w gram.	p _n mm Hg	d w gram	p _n mm Hg
0	0	15	17,896
1	1,220	20	23,676
2	2,436	25	29,366
3	3,648	30	34,968
4	4,856	35	40,486
5	6,061	40	45,921
		45	51,547
10	12,025	50	56,547

tablica VI.

Entalpia 1 kg suchego powietrza w zależności od temperatury.

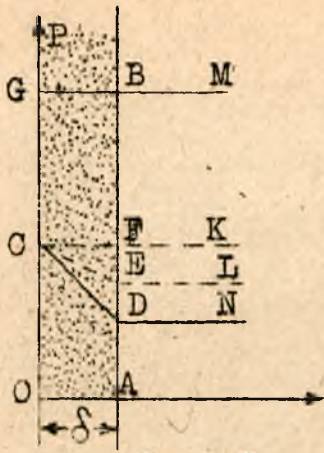
Entalp. i _p kcal	temp. t°C	Entalp. i _p kcal	temp. t°C
0	0	8	33,333
1	4,166	9	37,50
2	8,333	10	41,66
3	12,500	12	50,00
4	16,666	14	58,33
5	20,833	16	66,66
6	25,000	18	75,00
7	29,166	20	83,33

tablica VII

Entalpia pary wodnej, przypadającej na 1 kg suchego powietrza w zależności od temperatury i ilości pary wodnej.

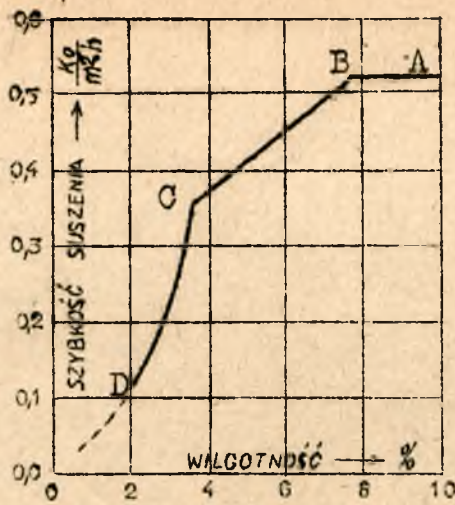
Entalpia pary wodnej w kcal	temperatura t_1 °C	Entalpia 1 kg pary wodnej	ilość pary wodnej w gram. na 1kg suchego powietrza	temperatura t_2 °C	Entalpia 1 kg pary wodnej	ilość pary wodnej w gram. na 1kg suchego powietrza
1	0	595,0	1,68	100	642,0	1,56
2	0	595,0	3,36	100	642,0	3,12
3	5	597,3	5,02	100	642,0	4,67
4	10	599,6	6,67	100	642,0	6,23
5	15	602,0	8,31	100	642,0	7,79
6	15	602,0	9,97	100	642,0	9,35
7	20	604,3	11,58	100	642,0	10,90
8	20 \sqrt	604,3	13,24	100	642,0	12,46
9	25	606,6	14,84	100	642,0	14,02
10	25	606,6	16,49	100	641,9	15,58
15	30	608,9	24,63	100	641,9	23,37
20	35	611,2	32,72	100	641,9	31,16
25	40	613,5	40,75	100	641,9	38,95
30	40	613,5	48,90	100	641,9	46,74
35	45	615,7	56,85	100	641,8	54,53
40	45	615,7	64,97	100	641,8	62,32
45	50	618,0	71,81	100	641,8	70,12
50	50	618,0	80,91	100	641,8	77,91
55	55	620,2	88,68	100	641,8	85,70
60	55	620,2	96,74	100	641,7	93,50
65	55	620,2	104,8	100	641,7	101,29





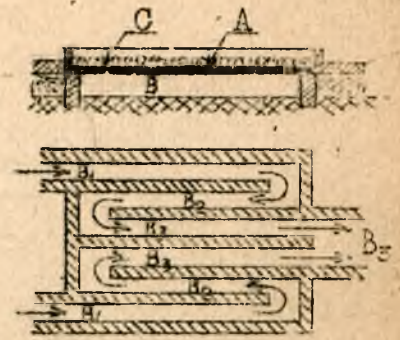
Rys. 1

Warstewka
nieruchoma



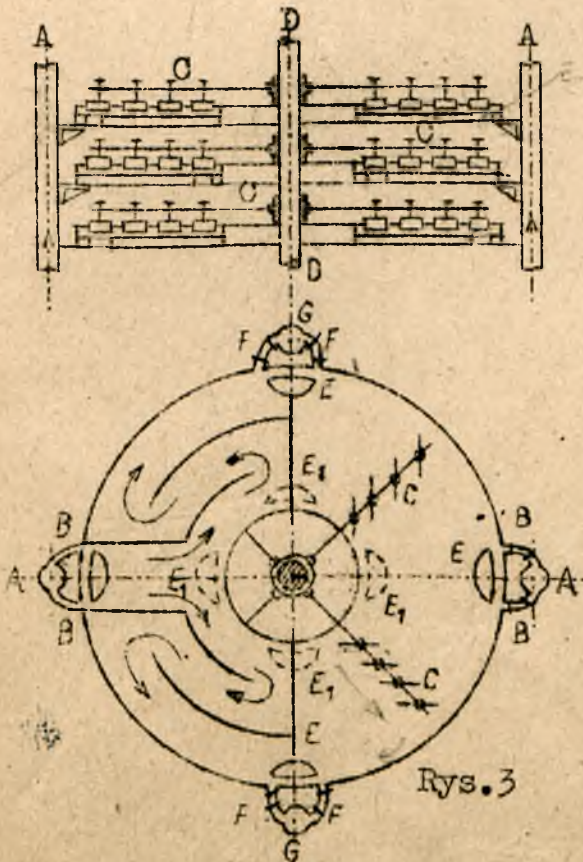
Rys. 1a

Wykres szybkości
suszenia



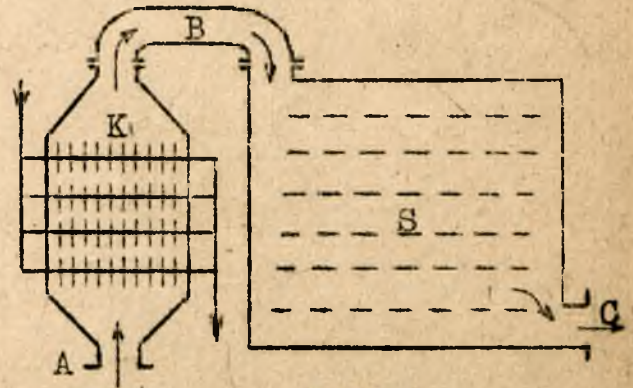
Rys. 2

Schemat suszarni
ogrzewanej spalinami



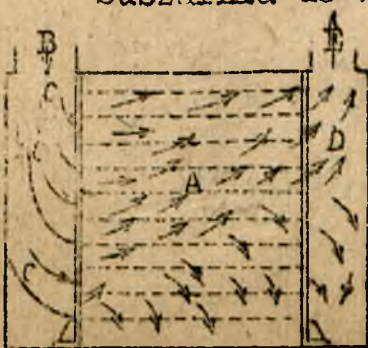
Rys. 3

Suszarnia do węgla



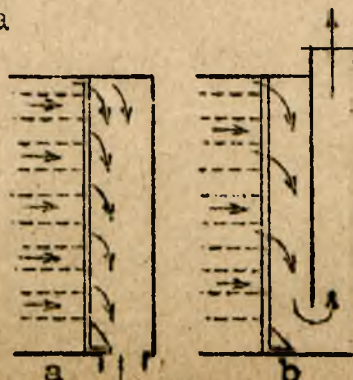
Rys. 4

Schemat suszarni powietrznej

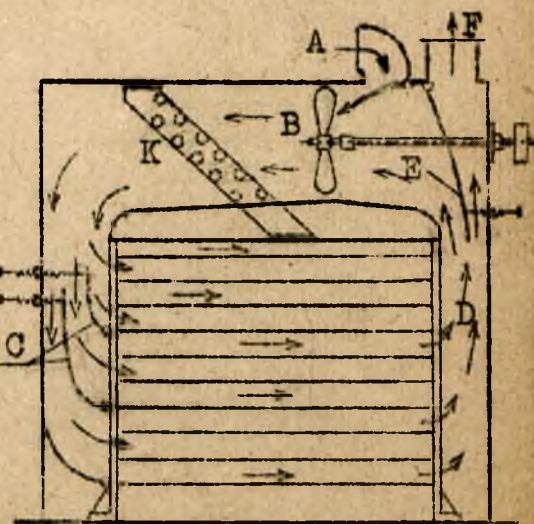


Rys. 5

Suszarnia o nienaturaln.
prądzie powietrza

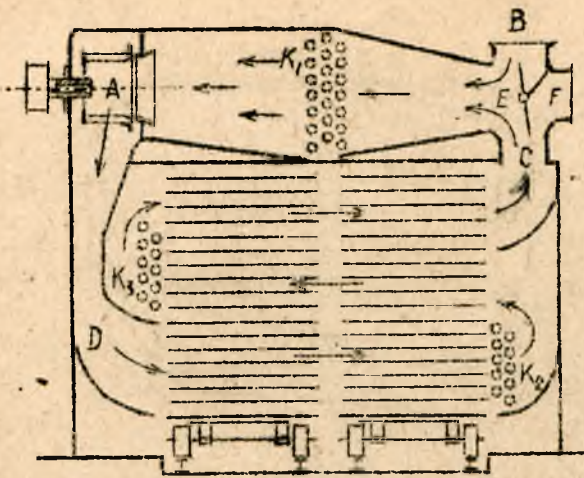


Rys. 6



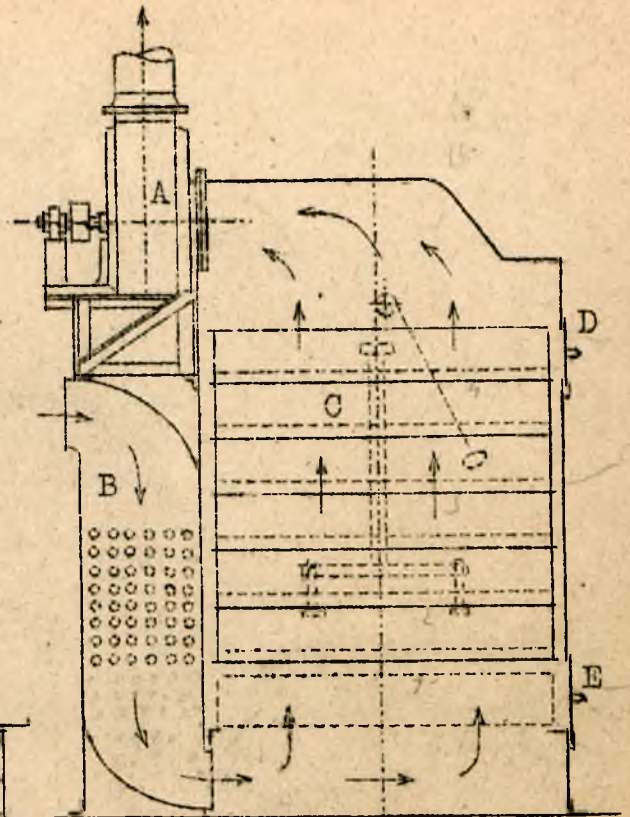
Rys. 7

Suszarnia systemu
Schilde



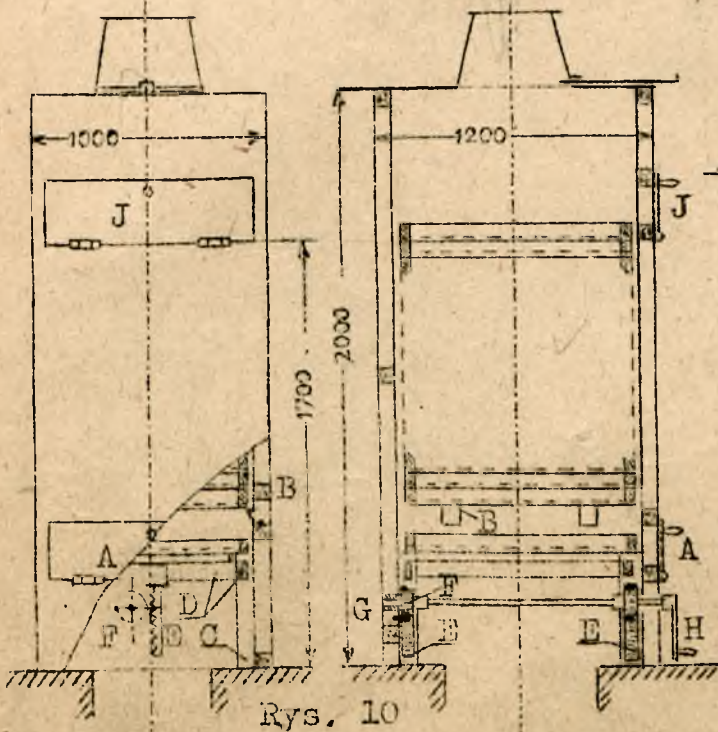
Rys. 8

Suszarnia syst. Gordona



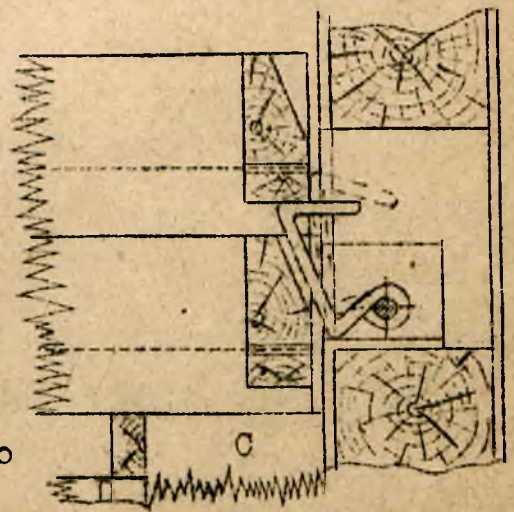
Rys. 9

Suszarnia syst. T.A.G.



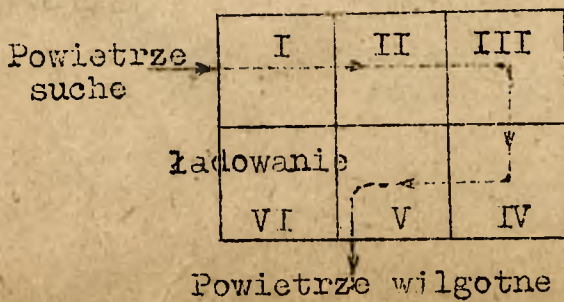
Rys. 10

Suszarnia syst. Prof. W. Iwanowskiego



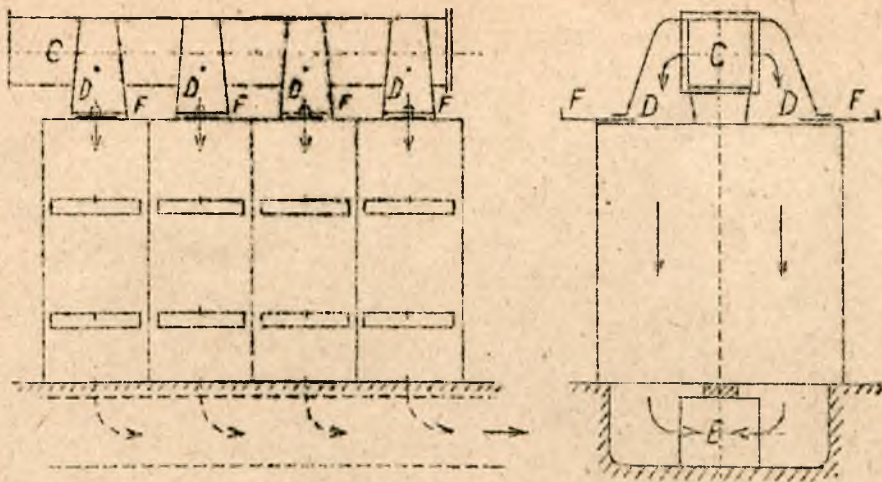
Rys. 11

Zapadka.



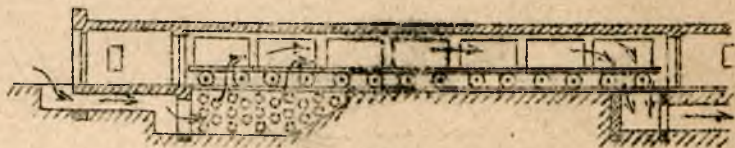
Rys. 12

Bateria szeregowo



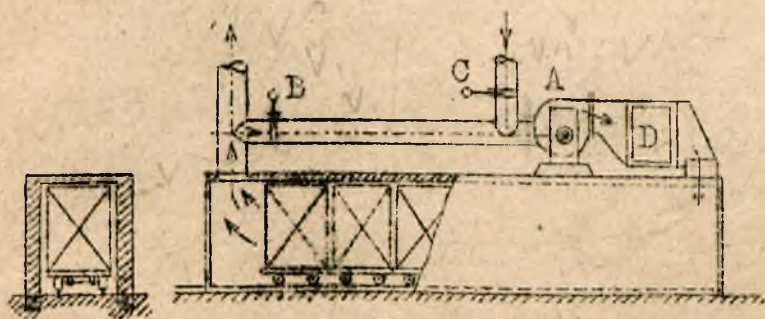
Rys. 13

Bateria równoległa



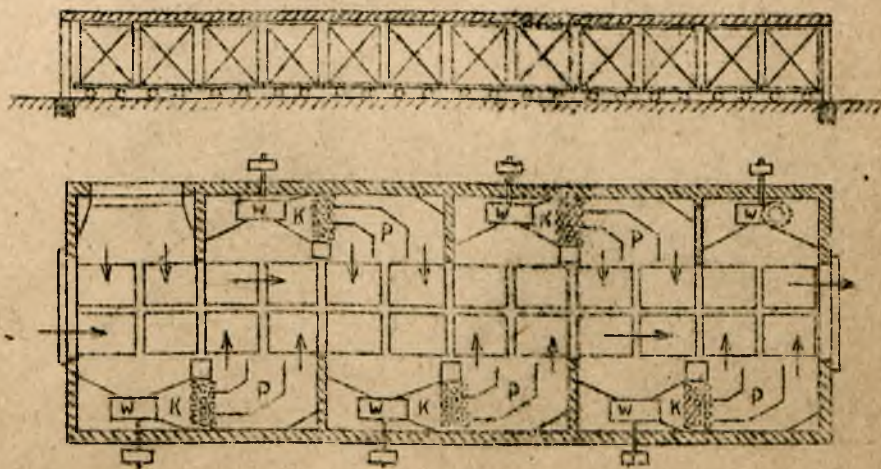
Rys. 14

Suszarnia tunelowa



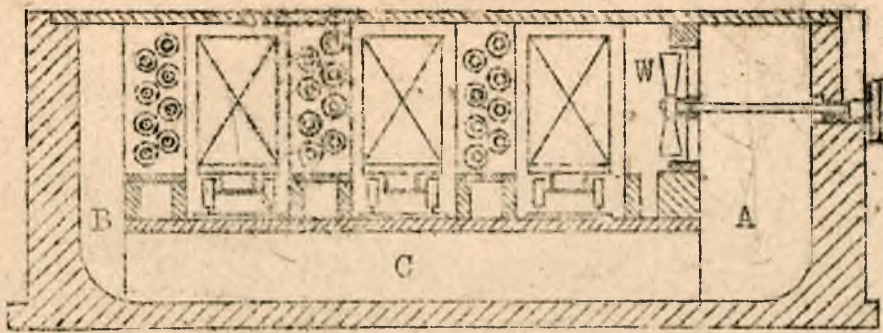
Rys. 15

Suszarnia tunelowa z cyrkulacją powietrza



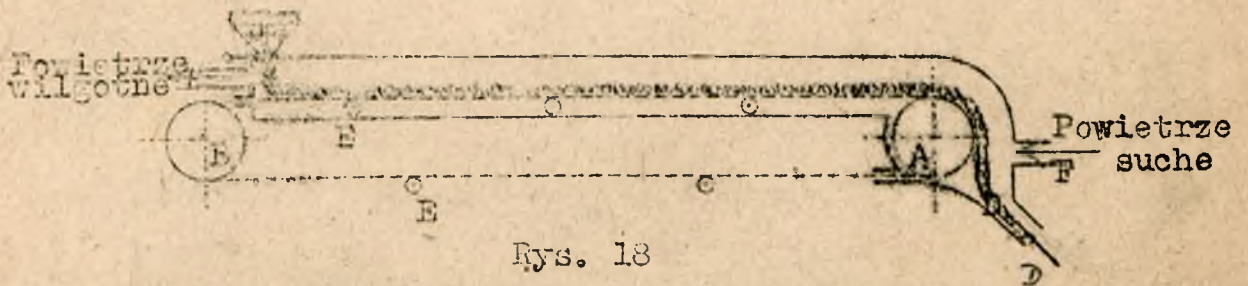
Rys. 16

Suszarnia tunelowa z cyrkulacją powietrza



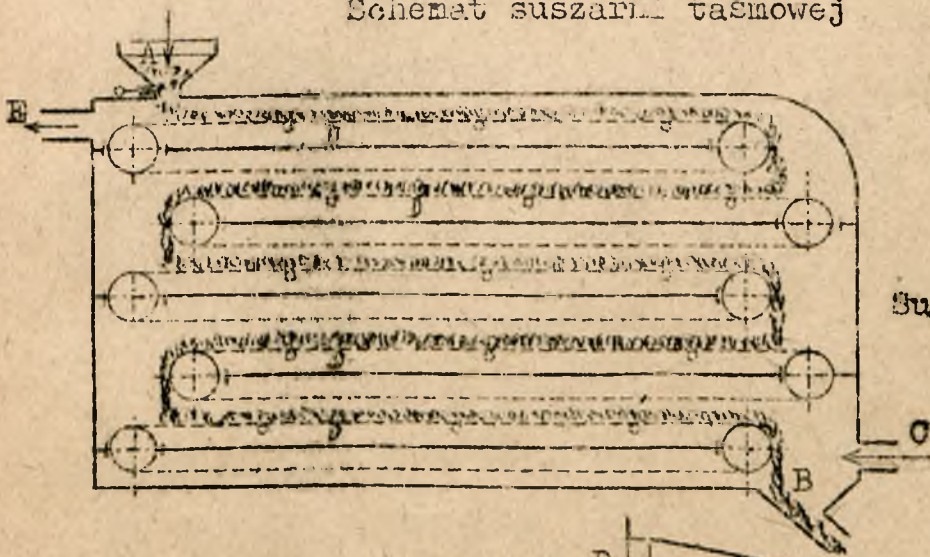
Kaloryfer z rur
żeberkowych

Rys. 17



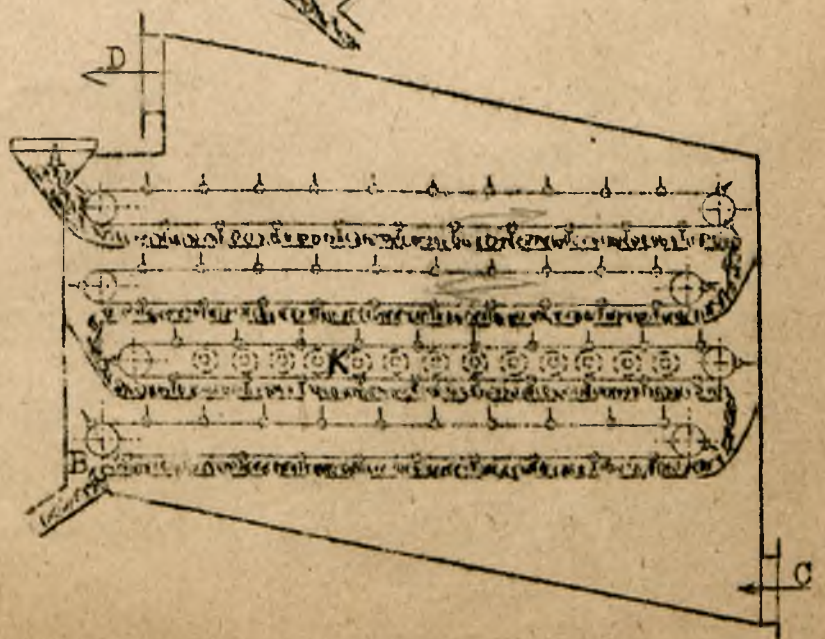
Rys. 18

Schemat suszarni taśmowej



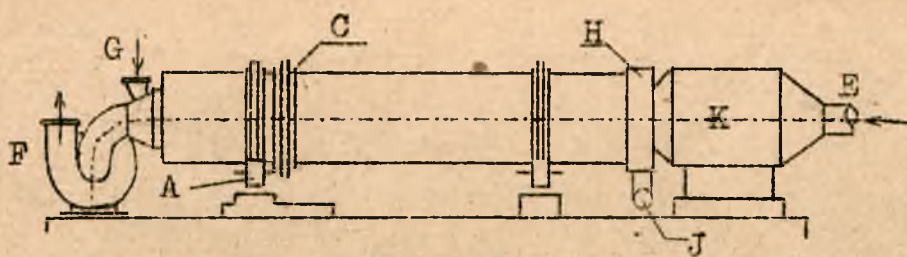
Rys. 19

Suszarnia
wielotaśmowa



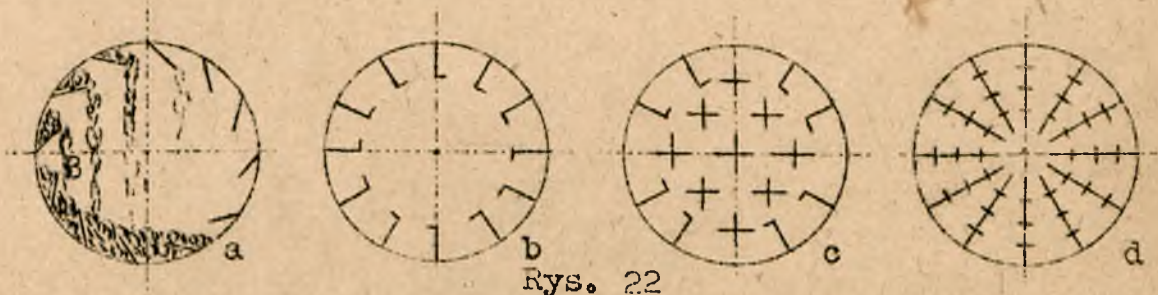
Rys. 20

Suszarnia grabkowa



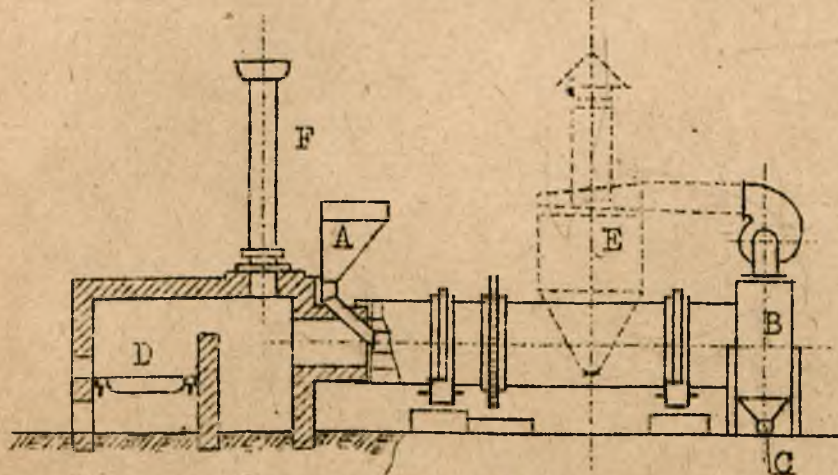
Rys. 21

Powietrzna suszarnia bębnowa



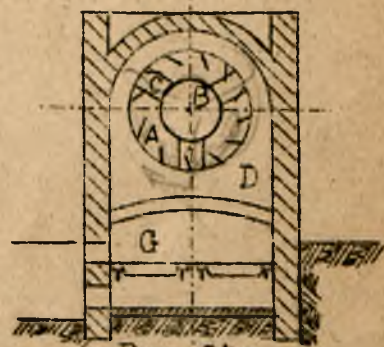
Rys. 22

Półki w suszarniach bębnowych

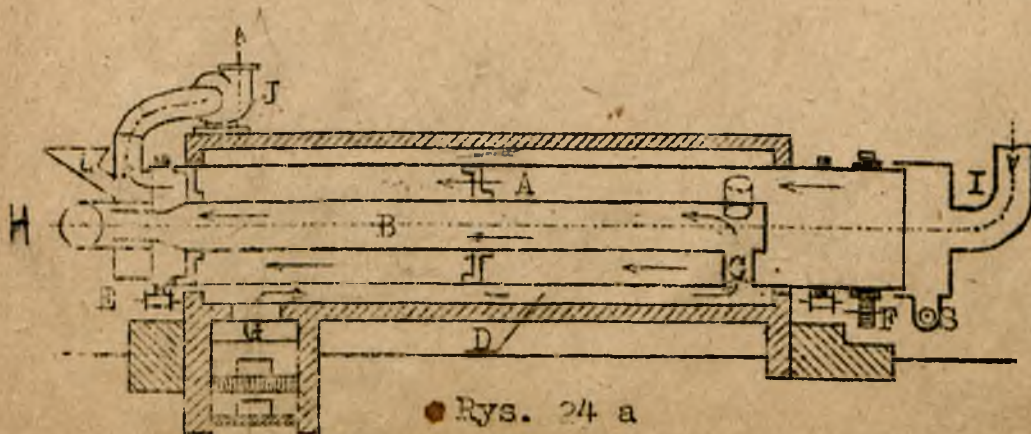


Rys. 23

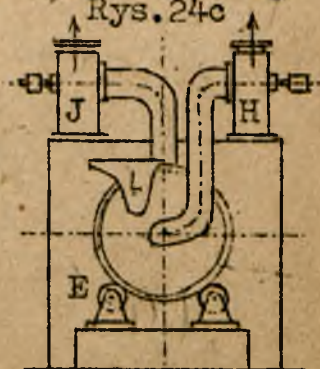
Suszarnia bębnowa na gazy spalinowe



Rys. 24c

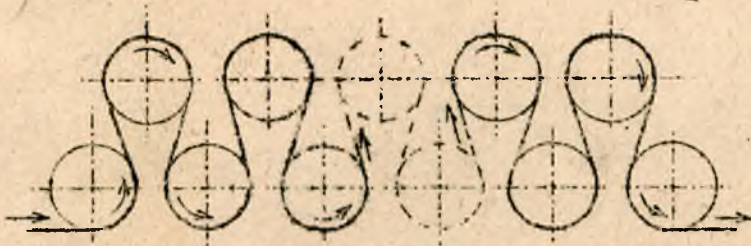


Rys. 24 a



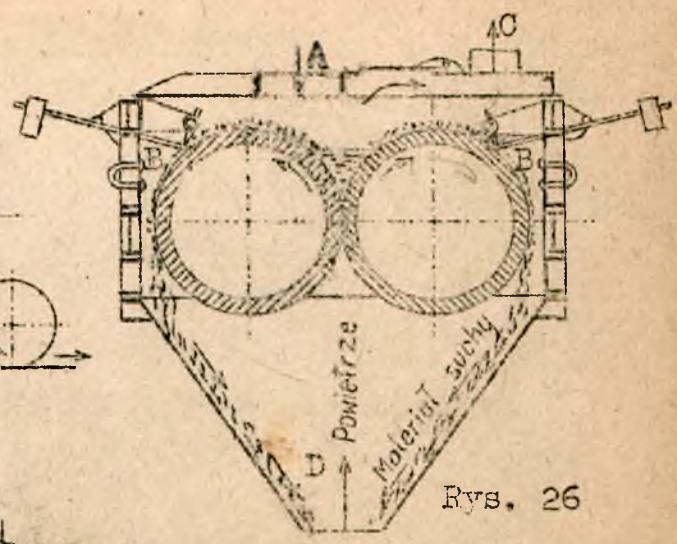
Rys. 24 b

Suszarnia bębnowa z ogrzewaniem przeponowym

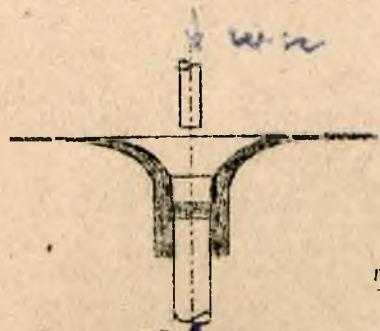


Rys. 25

Suszarnia walcowa

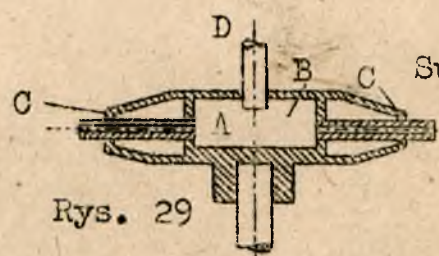


Rys. 26



Rys. 28

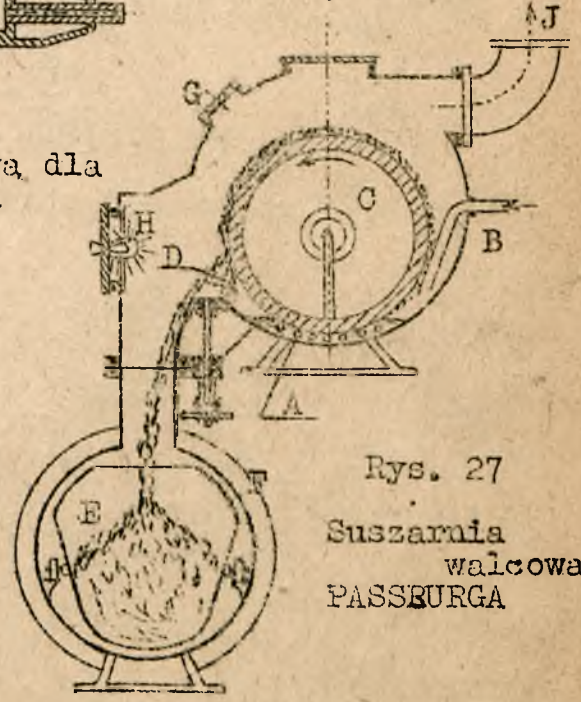
Tarcza rozpryskowa dla cieczy lepkich



Rys. 29

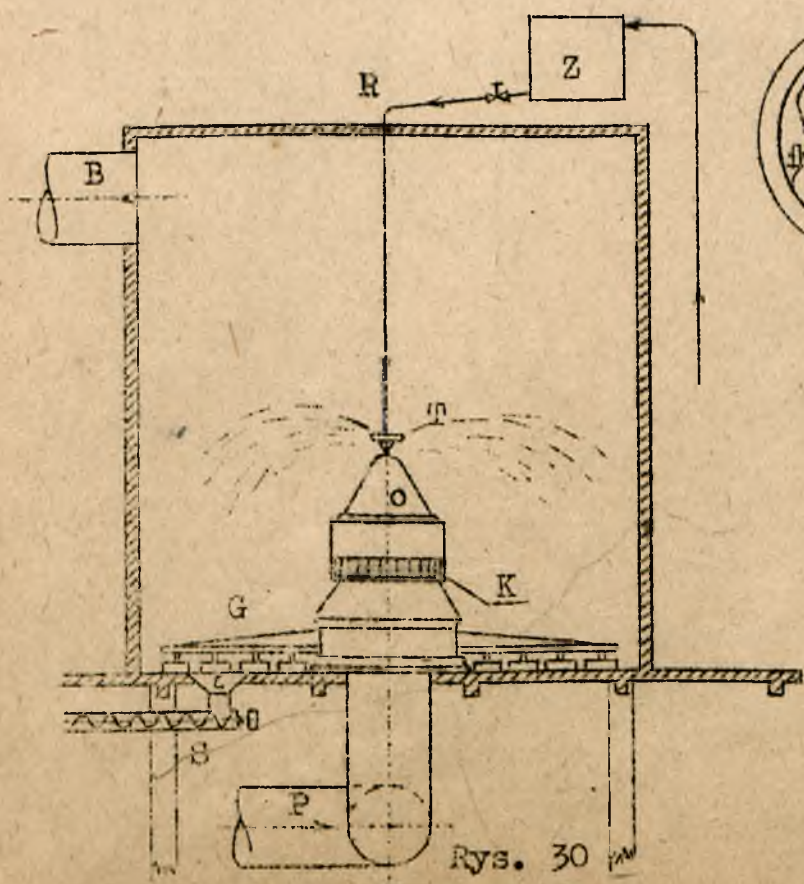
Suszarnia walcowa firmy VIENULETH

Tarcza rozpryskowa dla cieczy rzadkich



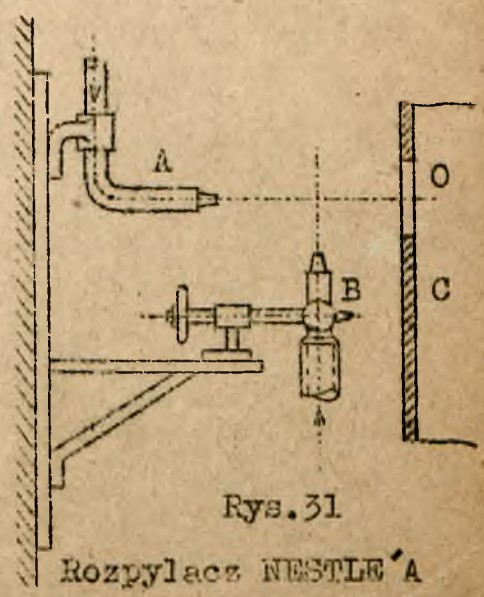
Rys. 27

Suszarnia walcowa PASSBURGA



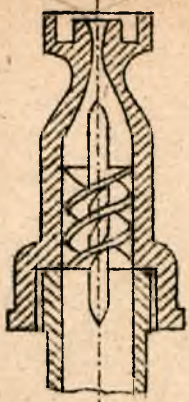
Rys. 30

Suszarnia rozpryskowa KRAUSE



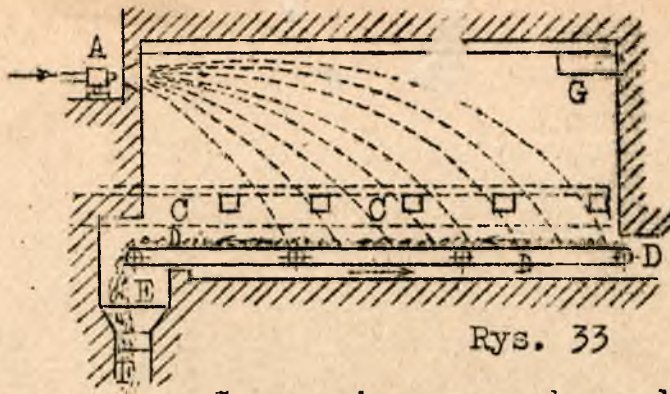
Rys. 31

Rozpylacz NESTLÉ



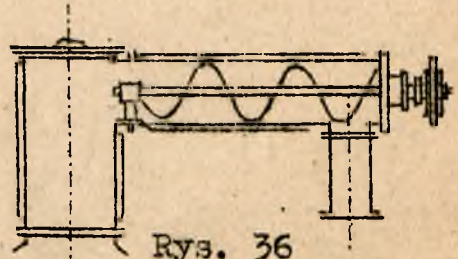
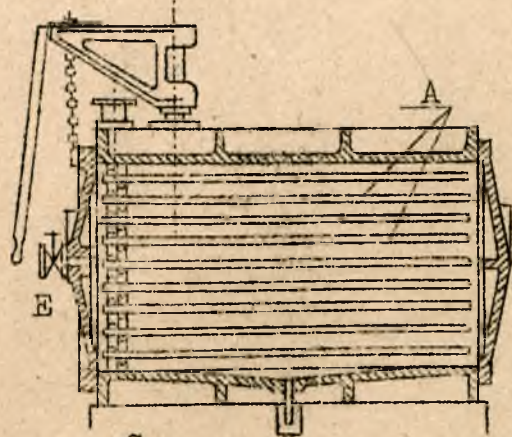
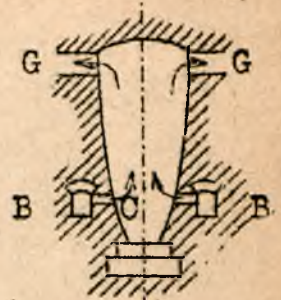
Rys. 32

Dysza SCHLICKA



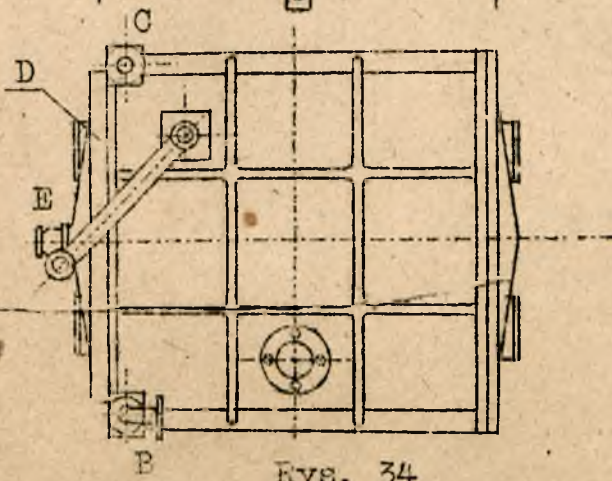
Rys. 33

Suszarnia rozpryskowa do suszenia spalinami



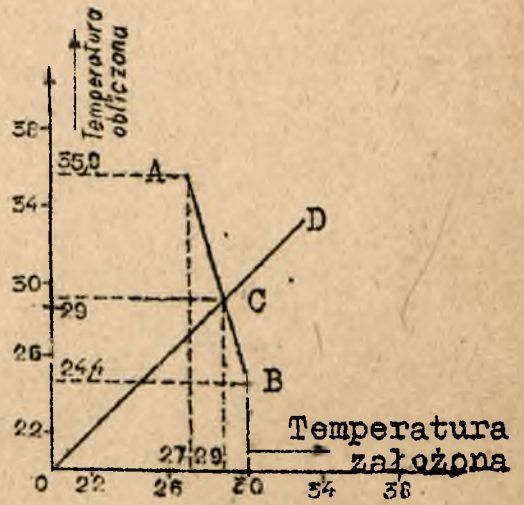
Rys. 36

Slimak do zawracania pyłu



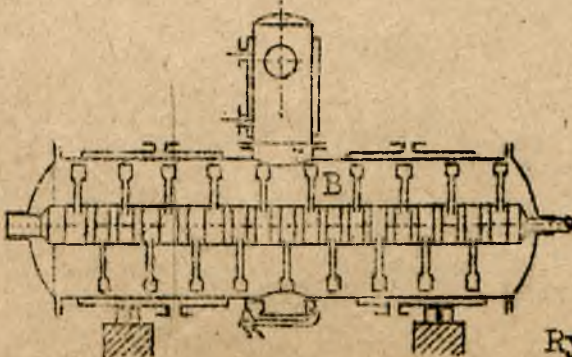
Rys. 34

Szafka suszarnia próżniowa



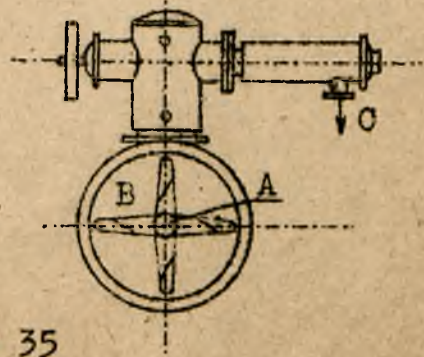
Rys. 37

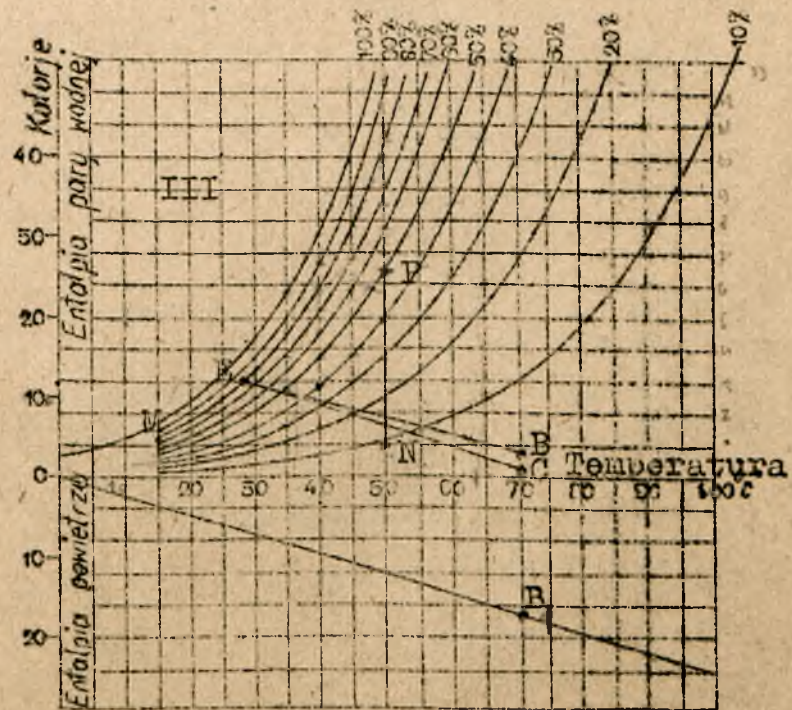
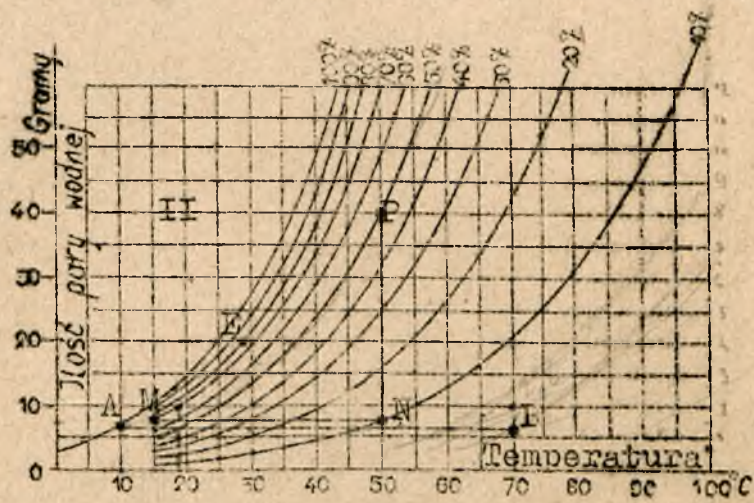
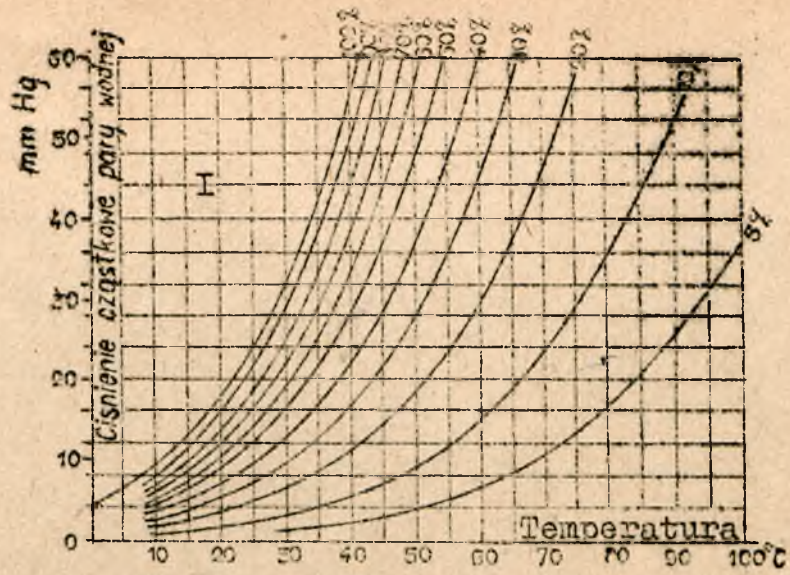
Wykres pomocniczy



Rys. 35

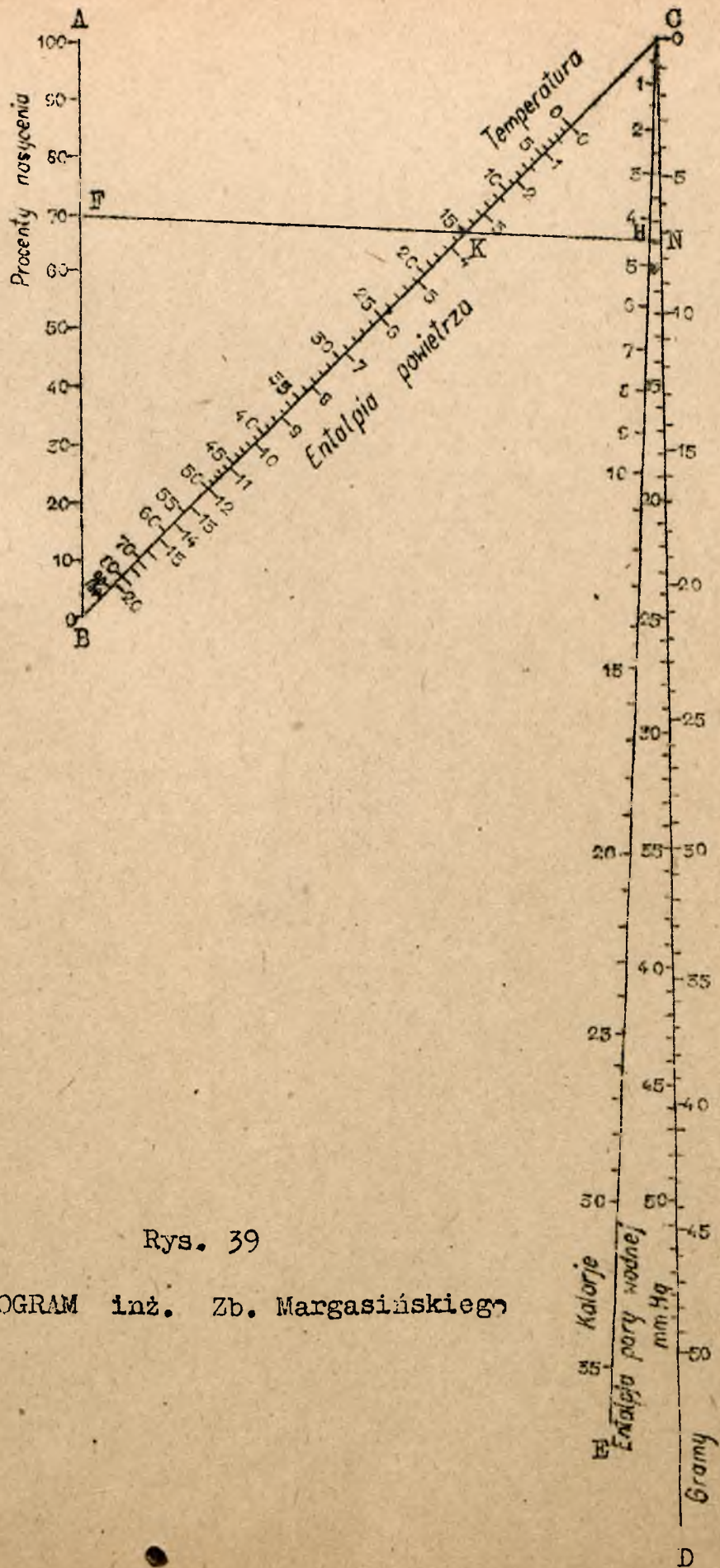
Bełnowa suszarnia próżniowa syst. VENULETH





Rys. 38

Wykresy suszarnicze.



Rys. 39

NOMOGRAM inż. Zb. Margasińskiego



965

2022