

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPIYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPIYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

69

WARSZAWA-POZNAŃ 1975
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN,
80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1975

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 380 + 90 egz.	Oddano do składania 7 III 1975 r.
Ark. wyd. 14,75 Ark. druk. 11,5	Podpisano do druku 2 XII 1975 r.
Papier druk sat. kl. V, 62 g 70 × 100 cm.	Druk ukończono w grudniu 1975 r.
Nr zam. 259/91.	R - 15/876. Cena zł 45, —

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

ALEKSANDER ZYK

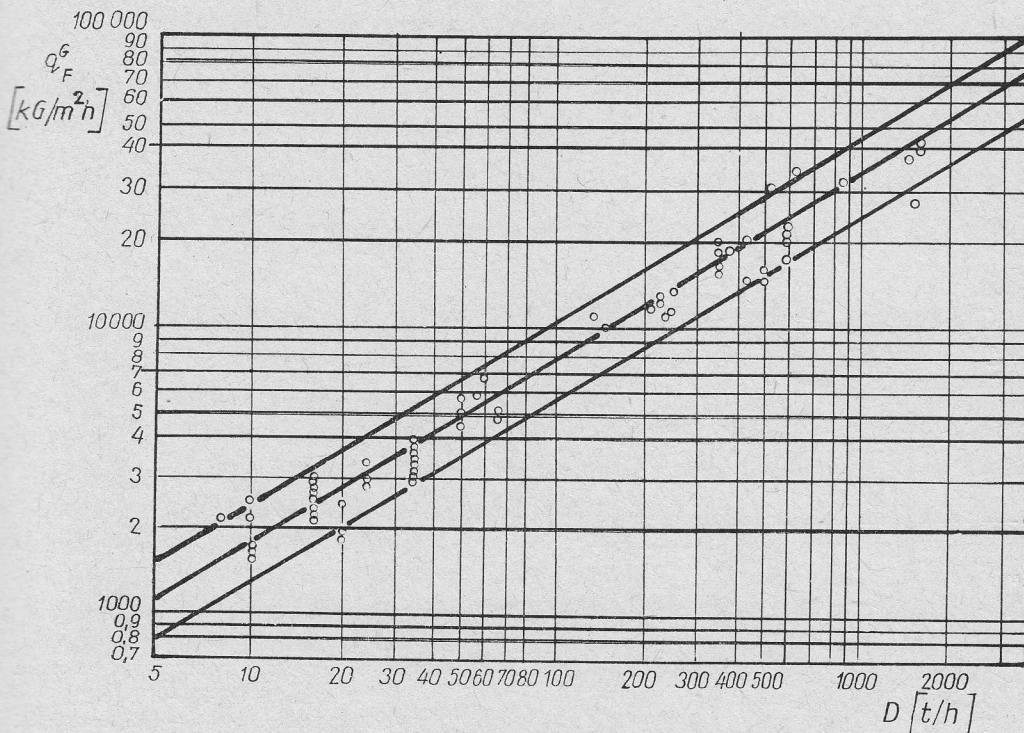
Tarnowskie Góry

Badania poziomych siatkowych separatorów pary przeznaczonych dla urządzeń energetycznych

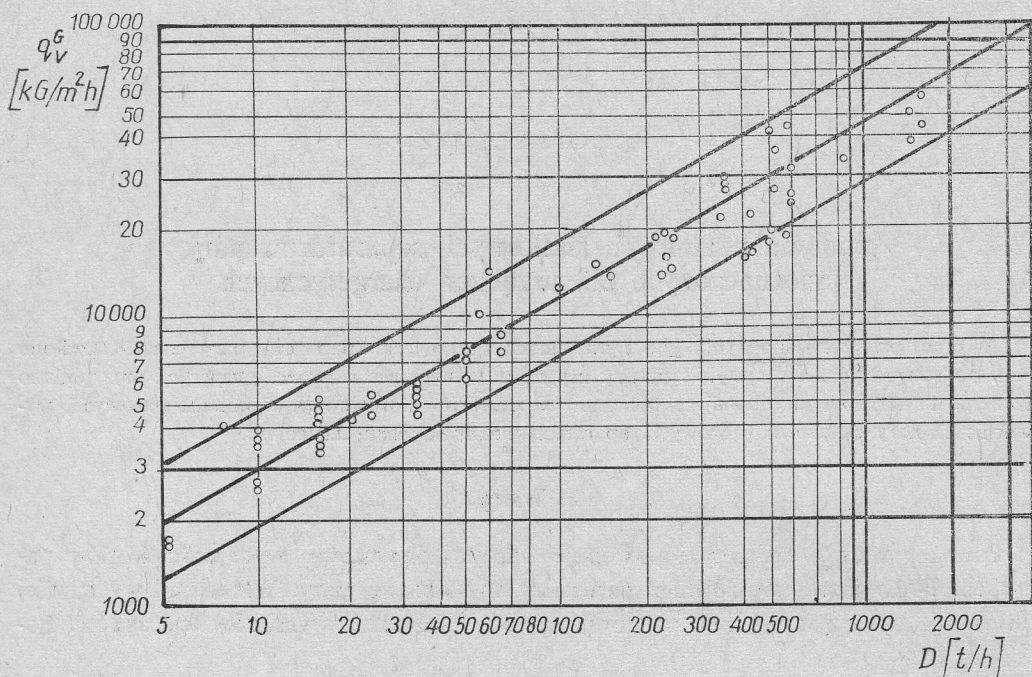
W pracy przedstawiono wyniki badań poziomych, siatkowych separatorów pary (gazu). Określono m.in. podstawowe charakterystyki i punkty krytyczne występujące w procesie separacji oraz podano równanie kryterialne, umożliwiające obliczanie separatorów stosowanych w kotłach parowych, wytwornicach pary elektrowni jądrowych, aparatach przemysłu chemicznego itp.

1. Wstęp

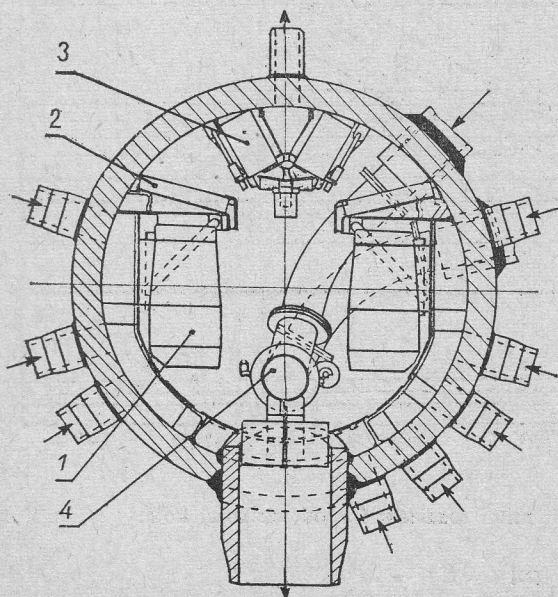
Poważny rozwój energetyki powoduje wzrost jednostkowej wydajności kotłów parowych. Podwyższają się również parametry wytwarzanej pary. Wzrostowi wydajności kotłów nie towarzyszy jednak proporcjonalne powiększenie wymiarów walczków. Po-



Rys. 1. Zależność obciążenia powierzchni rozdziału faz od wielkości kotła

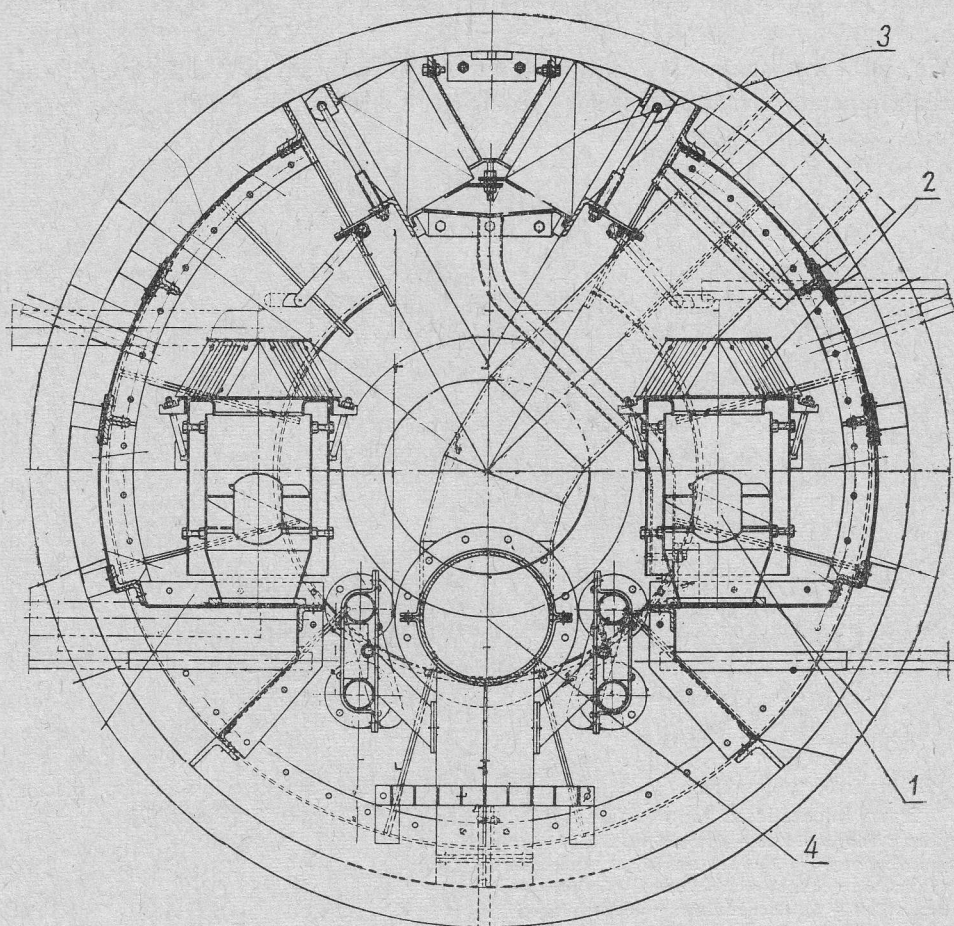


Rys. 2. Zależność obciążenia przestrzeni parowej walczaków od wielkości kotła



Rys. 3. Przekrój poprzeczny walczaka kotła OP-380-010 [6]

1 – cyklon z bocznym wlotem – I stopień separacji,
 2 – poziome żaluzje nad cyklonem – II stopień separacji,
 3 – żaluzje typu pionowego – końcowy stopień separacji,
 4 – kolektor rozdzielczy wody zasilającej



Rys. 4. Przekrój poprzeczny walczaka kotła OP-650-010

1 – cyklon z dolnym wlotem – I stopień separacji, 2 – żaluzje typu pionowego na cyklonie – II stopień separacji, 3 – żaluzje typu pionowego – końcowy stopień separacji, 4 – kolektor rozdzielczy wody zasilającej

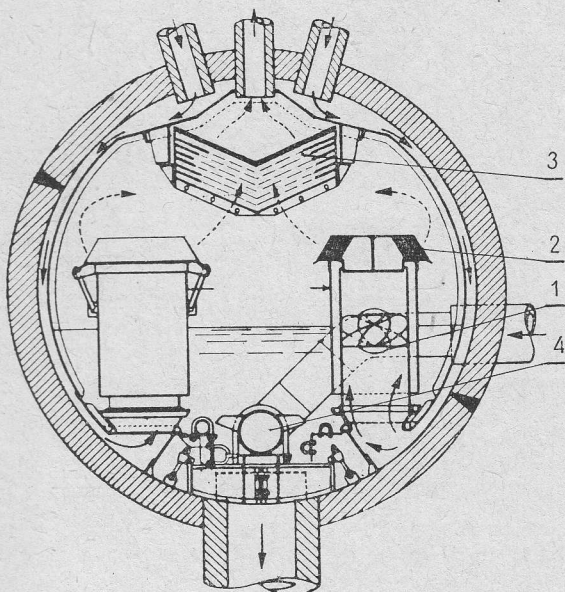
większają się jednostkowe obciążenia zarówno przestrzeni parowej jak i powierzchni rozdziału faz. Potwierdzają to dane dotyczące wykonanych kotłów krajowych i zagranicznych, przedstawione na rys. 1 i 2 [4].

Towarzyszący wzrostowi ciśnień roboczych spadek różnicy ciężarów wody i pary, jak również napięcia powierzchniowego cieczy powodują, że naturalne warunki separacji są już niewystarczające. W celu zapewnienia wymaganej jakości pary należy sięgać do pomocy separacji wymuszonej. Zapewniają ją w produkowanych kotłach wielostopniowe układy separacji, z których najczęściej stosowane pokazano na rys. 3 - 5.

Jak można się przekonać z przedstawionych rysunków, pierwszy stopień separacji stanowią różnej konstrukcji cyklony, drugi i trzeci – głównie separatory żaluzjowe. Urządzenia te są jednak ciężkie, zajmują dużo przestrzeni wewnątrz walczaka, a w przypadku konieczności dokonania kontroli stanu powierzchni wewnętrznych walczaka,

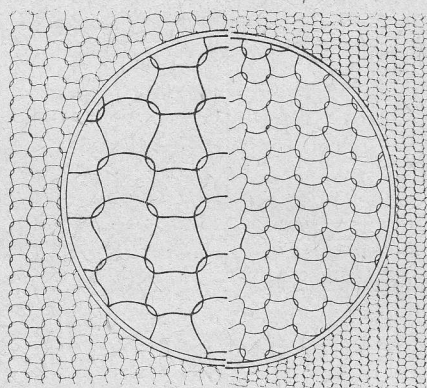
niezbędne jest ich wyjmowanie, co jest pracochłonne i związane z długim postojem kotła.

Wiele zalet w stosunku do wymienionych wyżej, a stosowanych w kotłach separatorów, posiadają separatory siatkowe z siatek dzianych – plecionych. Próbką siatki plecionej pokazana jest na rys. 6.



Rys. 5. Przekrój poprzeczny walczaka kotła firmy International Combustion [8]

1 – cyklon z dolnym wlotem – I stopień separacji, 2 – żaluzje typu pionowego – II stopień separacji, 3 – separator siatkowy (z siatek o oczkach prostokątnych) – końcowy stopień separacji, 4 – kolektor rozdzielczy wody zasilającej



Rys. 6. Powiększenie siatki typu plecionego (fragment) [7]

2. Charakterystyka konstrukcji

Separatory siatkowe typu plecionego, w odróżnieniu od separatorów składających się z siatek tkanych, stanowią układy wielowarstwowe ze specjalnie wykonanych dwupłatowych elementów. Każda warstwa separatora posiada dwa płaty siatek, powstałe ze spłaszczenia elementu cylindrycznego, stanowiące produkt wyjściowy. Spłaszczone elementy poddawane są zazwyczaj określonemu karbowaniu. Ułożenie poszczególnych warstw dokonane jest w taki sposób, aby karby jednej warstwy krzyżowały się z karbami następnej. Powstaje w ten sposób sieć bezładnie ukształtowanych kanalików, przez które przepływają separowane czynniki. Przy większych rozmiarach, separatory układane są na specjalnej, lekkiej konstrukcji wsporczej. Utworzony w ten sposób separator charakteryzuje się:

- dużą powierzchnią czynną, zabudowaną w jednostce objętości,
- małym ciężarem,
- jednakową gęstością w całym obszarze separatora,

- niesymetrycznie i nierównomiernie ustawionymi otworami,
- obszernymi wolnymi przestrzeniami dla przepływu separowanych czynników,
- łatwym i szybkim montażem.

Z punktu widzenia konstrukcji separator siatkowy charakteryzują następujące elementy:

- grubość drutu – δ
- wielkość oczka siatki – d_o
- wysokość karbu – h_k
- podziałka karbu – t_k

Łączy je zależność funkcyjna zwana wskaźnikiem gęstości separatora, a określona wzorem:

$$N = \frac{F}{V} = 8\pi \frac{C_d}{C_f} \frac{\delta}{d_o} \frac{1}{h_k} \sqrt{4 \left(\frac{h_k}{t_k} \right)^2 + 1}, \quad (1)$$

gdzie C_d , C_f – stałe współczynniki dla danej siatki [5]. Na rys. 12a-d widoczne są poszczególne warstwy separatora oraz jego karbowanie.

3. Zasada działania

Para, zawierająca porwaną wilgoć w formie polidispersyjnej mieszaniny cząsteczek, jaką stanowią kropelki wody, przepływając przez separator zmuszona jest do ciągłej i nieuporządkowanej zmiany kierunku. Napotyka również na swej drodze przeszkody, jakie stanowią elementy siatki. Kropelki wody pod wpływem bezpośredniego zderzenia oraz występujących sił odśrodkowych osiadają na powierzchni siatki. Para uwolniona od cieczy przepływa do sąsiedniej przestrzeni separatora, a wytrącona woda spływa w postaci cienkiej warstewki po drutach siatki. Przepływ ten odbywa się w sposób niezakłócony do najbliższego węzła, tj. do miejsca, gdzie łączą się ze sobą sąsiednie ogniwa siatki. W węźle spotykają się strugi cieczy z sąsiednich elementów, dzięki czemu ilość cieczy powiększa się i rośnie grubość warstewki. W ten sposób ciecz spływa do krawędzi separatora. Na krawędzi stale powiększające się ilości spływającej wody powodują powstawanie kropelek. Na utworzoną w ten sposób kroplę działają siły, które w stanie równowagi określa równanie:

$$\zeta \frac{\pi d^2}{4} \frac{w''^2}{2g} \gamma'' + \pi \alpha d \sigma = \frac{\pi d^3}{6} (\gamma' - \gamma''), \quad (2)$$

gdzie ζ , α – współczynniki, d – średnica kropli, g – przyspieszenie ziemskie, γ' , γ'' – ciężar właściwy odpowiednio cieczy i pary, σ – napięcie powierzchniowe cieczy, w'' – prędkość pary.

Siłami tymi są

- dynamiczne oddziaływanie strumienia pary lub gazu,
- siła napięcia powierzchniowego utrzymująca kroplę na określonym elemencie separatora,
- siła ciężkości mająca tendencję oderwania kropelki od krawędzi separatora.

Przy poziomo usytuowanym separatorze pierwsze dwie siły przeciwdziałają trzeciej, to jest sile ciężkości. Kropla cieczy może oddzielić się od separatora tylko w takim przy-

padku, gdy równowaga wyżej podanych sił zostanie zakłócona, tj. gdy kropla cieczy osiągnie takie rozmiary, że siła ciężkości zrównoważy działanie siły napięcia powierzchniowego i oddziaływanie strumienia. Gdy oddziaływanie strumienia będzie większe — krople nie będą miały możliwości oderwania się od krawędzi siatki. Stan taki określa się jako odpowiadający pierwszemu punktowi krytycznemu.

Swobodnemu spływaniu cieczy po elementach separatora może przeciwdziałać strumień pary. Przy wzrastającej prędkości pary, tj. przy powiększającym się obciążeniu separatora, następuje zmniejszenie odpływu cieczy, a przy dalszym wzroście zmiana kierunku przepływu. Pod wpływem oddziaływania strumienia pary ciecz zacznie przesuwac się po elementach separatora w górę. Następuje początkowo zalanie (zatopienie) dolnych części. Obszar ten rozprzestrzenia się w kierunku zgodnym z przepływem pary aż do momentu, gdy pierwsze krople zostaną utworzone na górnej krawędzi separatora. Na powstałe krople działają, podobnie jak i na dolnej krawędzi, trzy wyżej opisane siły. Oderwanie kropli możliwe jest jednak tylko wtedy, gdy oddziaływanie strumienia pary będzie większe od sumy sił napięcia powierzchniowego i ciężkości.

Opisany wyżej proces ma miejsce po przekroczeniu tzw. drugiego punktu krytycznego dla separatora i nie może występować przy normalnej i właściwej jego pracy.

4. Ogólne równanie kryterialne

Proces separacji pary i wody w obrębie separatora siatkowego, w ustalonych warunkach ruchowych, rozdzielić można na następujące etapy:

- wlot zawilgoconej pary wodnej do jednego z licznych i krętych kanalików utworzonych między drutami siatki oraz rozdział wskutek bezpośredniego zetknięcia się z elementami siatki i pod działaniem występujących sił odśrodkowych kropelek wody od strug pary,
- przepływ uwolnionych od cząsteczek wody strug pary w kierunku wylotu,
- swobodny przepływ cienkich warstewek wody po elementach separatora o stale zwiększającej się grubości warstwy w kierunku przeciwnym, aż do krawędzi separatora, gdzie następuje tworzenie się kropelek wody.

Wyżej przytoczony podział został celowo uproszczony i podany w pewnym schemacie. W rzeczywistości zjawiska są bardziej skomplikowane i przenikające się ze sobą, skutkiem czego proces taki nie daje się opisać w sposób ogólny za pomocą równań różniczkowych. Trudności te wzrastają dodatkowo w punktach krytycznych i powyżej nich. Zachodzą przy tym nie dające się określić zmiany składu dyspersyjnego kropelek wilgoci. Jedynie możliwa droga wyjaśnienia zjawisk prowadzi poprzez eksperyment i określone równanie podobieństwa. Dla ustalenia kryteriów podobieństwa, w stosunku do rozdzielonych przepływów wymienionych wyżej faz, mogą być zastosowane równania Naviera-Stokesa oraz równanie ciągłości cieczy ściśliwej.

Pierwsze z nich, przy zastosowaniu oznaczeń przyjętych w analizie wektorowej, ma postać:

$$\rho \vec{g} - \text{grad } p + \eta (\nabla^2 \vec{w} + \frac{1}{3} \text{grad div } \vec{w}) = \frac{D\vec{w}}{dt} \cdot \rho, \quad (3)$$

a drugie

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{w}) = 0. \quad (4)$$

Zastosowanie tych równań może budzić pewne wątpliwości. Wynikać one mogą z faktu wykorzystania przy ich wyprowadzeniu elementarnego prawa tarcia wewnętrznego Newtona oraz oparcia na podstawowych pojęciach teorii sprężystości. Poza tym równania te ważne są dla ruchu laminarnego cieczy rzeczywistych. Natomiast do przepływów par i gazów zarówno praca tarcia Newtona jak i pojęcie naprężenia stycznego, modułu sprężystości, współczynnika przewężenia (liczby Poissona) tracą swój fizyczny sens, schodząc do roli pojęć pomocniczych. Jak stwierdza Troskoleński: „W odniesieniu do przepływów laminarnych cieczy lepkich są to oczywiście usterki formalne, ponieważ równania Stokesa prowadzą do wyników zgodnych z doświadczeniem. Ale jak wykazał prof. Broszko, nawet i te usterki można usunąć posiłkując się pojęciami i metodami rachunkowymi, wprowadzonymi do hydrodynamiki przez Osborne Reynoldsa przy teoretycznych rozważaniach nad mechanizmem ruchu burzliwego” [3].

Jeszcze bardziej rozwiewają te wątpliwości Styrikowicz i Kutateladze [2], którzy twierdzą że „nawet bardzo małe kropelki cieczy i pęcherzyki pary, wchodzące w skład określonego czynnika dwufazowego zawierają tak dużą liczbę cząstek, że można do nich w pełni zastosować takie statyczne pojęcia jak ciśnienie, temperatura, lepkość itd.” Dla poparcia tego twierdzenia podają, że „w pęcherzyku gazu o średnicy 1 mikrona przy $p = 1$ ata i $t = 0^\circ\text{C}$ znajduje się $1,4 \cdot 10^7$ cząsteczek. W pęcherzyku gazu o średnicy 1 mm w normalnych warunkach znajduje się 10^{16} cząsteczek. Na tej podstawie można przyjmować, że praktycznie w określonym miejscu układu dwufazowego, ruch czynnika określony jest ogólnymi równaniami hydrodynamiki, a w szczególności równaniami ruchu i warunkami ciągłości”.

Ponieważ w obrębie separatora mamy do czynienia z zakrzywioną powierzchnią rozdziału faz, należy w ogólnym przypadku uwzględnić występującą między tymi fazami różnicę ciśnień. Określa ją równanie Laplace’a w postaci:

$$p'_{\text{gr}} - p''_{\text{gr}} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (5)$$

Na podstawie równań (3) do (5) otrzymamy układ wielkości fizycznych określających hydrodynamiczny i izotermiczny ruch czynnika dwufazowego, tj.

$$w', w'', \gamma', \gamma'', \eta', \eta'', \sigma, g, \Delta p, l. \quad (6)$$

Powyższy układ zawiera jedną wielkość konstrukcyjną, którą w naszym wypadku będzie wysokość separatora, tj. $l = h$. Na proces separacji mają również wpływ: wysokości karbów, ich podziałka oraz grubość drutu i wielkość oczka siatki. Wielkości te łączy wspólnie zależność funkcyjna określona równaniem (1). O tę wielkość uzupełniamy układ wielkości (6). Wskutek tego można założyć istnienie funkcji:

$$f(w', w'', \gamma', \gamma'', \eta', \eta'', \sigma, g, \Delta p, h, N) = 0. \quad (7)$$

Ponieważ wymiary rozpatrywanych wielkości zawierają $m=3$ wielkości podstawowe, tj. m, kG, s, to zgodnie z twierdzeniem Buckingham'a, funkcję (7) można doprowadzić do postaci:

$$f(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8)=0. \quad (8)$$

Na podstawie rachunku analizy wymiarowej, bezwymiarowe współczynniki K_1-K_8 otrzymują konkretną postać liczb kryterialnych, a równanie (8) postać:

$$f\left[K\left(\frac{1-x}{x}\right)_p, We, Ga, Nh, Eu, \frac{v'}{g^{\frac{1}{3}}h^{\frac{1}{3}}}\frac{v'}{v''}\right]=0, \quad (9)$$

gdzie

$$K = \frac{w'' \sqrt{\gamma''}}{\sqrt[4]{g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')}} ,$$

a We – kryterium Webera, Ga – kryterium Galileusza, Eu – kryterium Eulera.

Jak wykazały dotychczasowe badania krajowe i zagraniczne, decydująca w przepływie czynników dwufazowych jest współzależność prędkości czynnika gazowego (pary) i cieczy. Po osiągnięciu określonej prędkości gazu zwanej pierwszą prędkością krytyczną, zanika trwałość rozdziału faz, cząsteczki cieczy zostają porywane przez strumień gazu, wskutek czego powiększa się ilość cieczy unoszonej przez gaz. Działają tu nakładające się siły tarcia, bezwładności, ciężkości i napięcia powierzchniowego związane z przepływem o określonej prędkości. Prędkość gazu jest zatem czynnikiem wyrażającym, określającym zjawisko i od niej uzależniać będziemy pozostałe wielkości. Ponieważ różnica ciśnień na granicy podziału faz jest wielkością wynikową i zmieniającą się w małym stopniu, wobec czego kryterium Eu możemy uznać jako kryterium nieokreślające i jako takie pominąć.

Ograniczając dodatkowo stosowalność równania do przepływów czynników o niskiej lepkości, a za takie można uważać wodę i parę, nawet przy wysokim ciśnieniu, równanie (9) uprości się do postaci:

$$K=f\left[\left(\frac{1-x}{x}\right)_p, Nh, We\right]=0 \quad (10)$$

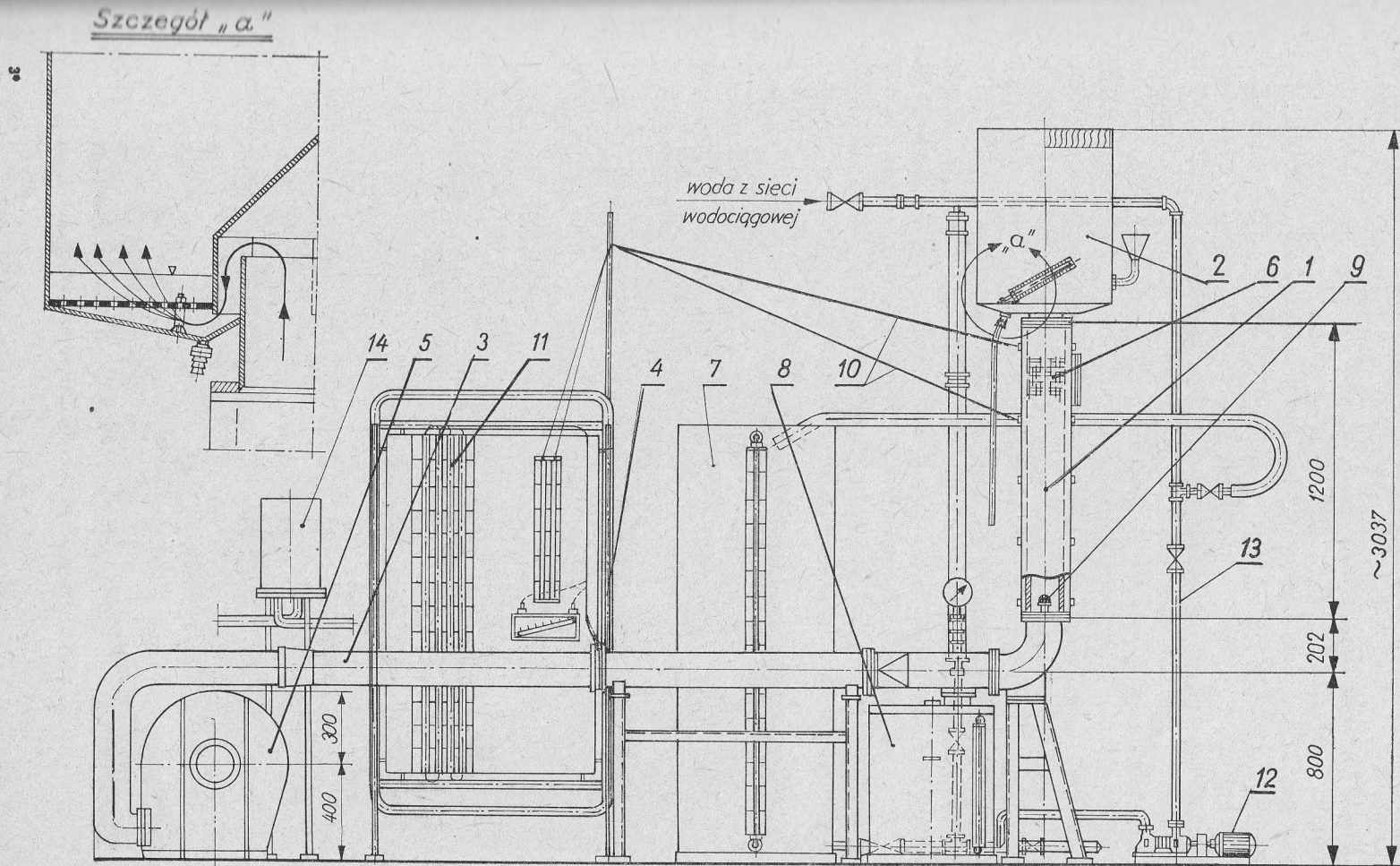
lub w postaci bezwymiarowych iloczynów:

$$K=C\left(\frac{1-x}{x}\right)_p^a (Nh)^h We^c. \quad (11)$$

5. Stoisko badawcze

Stoisko badawcze składa się z kilku podstawowych części przedstawionych na rys. 7. Są to:

- kanał aerodynamiczny,
- kanał mierniczy,
- wentylator powietrza,



Rys. 7. Stoisko pomiarowo-badawcze

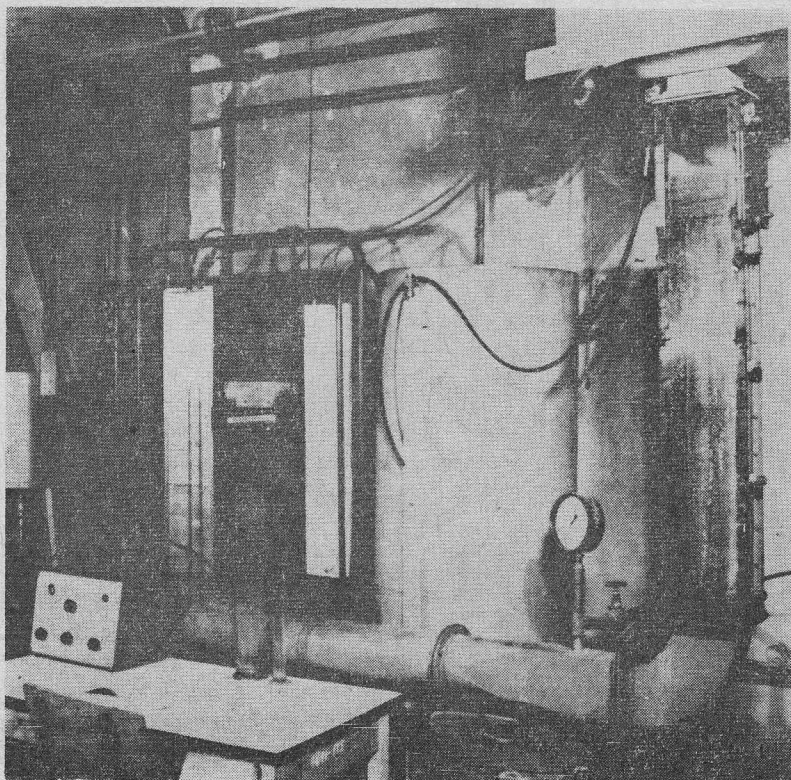
1 – kanał aerodynamiczny, 2 – koncentrator, 3 – kanał mierniczy, 4 – zwężka pomiarowa powietrza, 5 – wentylator, 6 – badany separator, 7 – zbiornik cieczy rozpylanej, 8 – zbiornik cieczy wtrąconej, 9 – rozpylacz cieczy, 10 – przewody impulsowe do pomiaru oporu separatora, 11 – tablica z manometrami ciecowymi, 12 – pompa wodna, 13 – rurociagi, 14 – ochładzacz destylatu

- koncentrator,
- instalacja wodna ze zbiornikami,
- aparatura pomiarowa.

Główny fragment stoiska pokazano na rys. 8. Kanał aerodynamiczny posiada wymiary poprzeczne: 100×150 mm i długość 1300 mm. Jego dwie boczne ściany wykonane są ze szkła, dzięki czemu możliwa jest obserwacja przepływów i rozpylania. W górnej części tego kanału przewidziano przestrzeń, w której usytuowany jest badany model separatora. Końce kanału zakończone są kołnierzami, umożliwiającymi połączenie z koncentratorem od góry i z kanałem powietrznym mierniczym od dołu.

Kanał mierniczy stanowi cylindryczny przewód o średnicy wewnętrznej 150 mm i długości całkowitej 2500 mm. Końce tego przewodu stanowią elementy przejściowe, umożliwiające połączenie z jednej strony z promieniowym wentylatorem powietrza, a z drugiej — z kanałem aerodynamicznym. W określonej odległości od jednego z końców usytuowana jest zwężka do pomiaru ilości przepływającego powietrza.

Koncentrator stanowi specjalne naczynie ustawione nad kanałem aerodynamicznym. Jego wewnętrzne wyposażenie, składające się z elementów kierujących i zanurzonego sita, umożliwia równomierny przepływ powietrza przez warstwę znajdującego się tam kondensatu. W górnej części tego urządzenia znajduje się końcowy separator oddzielający szczątkowe zawartości wilgoci z uchodzącego powietrza.



Rys. 8. Główny fragment stoiska pomiarowo-badawczego

W skład instalacji wodnej wchodzi: pompa zasilająca, rurociągi rozdzielające wodę i doprowadzające roztwór nawilżający do dysz rozpylających. Stoisko wyposażone jest w zbiorniki wody rozpylającej oraz wody wytrąconej przed badanym modelem separatora.

Do przeprowadzenia pomiarów ilości przepływających czynników, spadków ciśnień, temperatury itp. w obrębie stoiska na specjalnej tablicy rozmieszczona jest aparatura pomiarowa, połączona z miejscem pomiaru odpowiednimi przewodami impulsowymi. Powietrze przepływające przez badany separator tłoczone jest przez wentylator do przewodu mierniczego, skąd poprzez kanał aerodynamiczny i model separatora dostaje się do koncentratora, który opuszcza w górnej jego części po przebyciu końcowego separatora żaluzjowego. Regulację ilości powietrza przeprowadza się za pomocą klap umieszczonych po stronie ssącej wentylatora. Ilość przepływającego powietrza, mierzona przez zwężkę pomiarową, określana jest na manometrze różnicowym, odpowiednio wcześniej wyskalowanym.

Nawilżanie powietrza zapewnia pompa, która tłoczy roztwór o określonej koncentracji do dysz rozpylających. Konieczny stopień nawilżania uzyskuje się przez zmianę ilości dysz rozpylających i ciśnienia regulowanego zaworem na przewodzie tłoczącym. Wymienne rozpylacze montowane były w taki sposób, aby strumień wypływającej wody bez przepływu powietrza nie oddziaływał na zainstalowany model separatora. Ciecz wytrącona w kanale, przewodach i separatorze, odpływa do szczelnie zamkniętego zbiornika.

Nawilżone powietrze po przejściu przez badany separator przepływa do koncentratora, gdzie zawarte w powietrzu kropelki roztworu zostają rozpuszczone w objętości znajdującego się tam kondensatu.

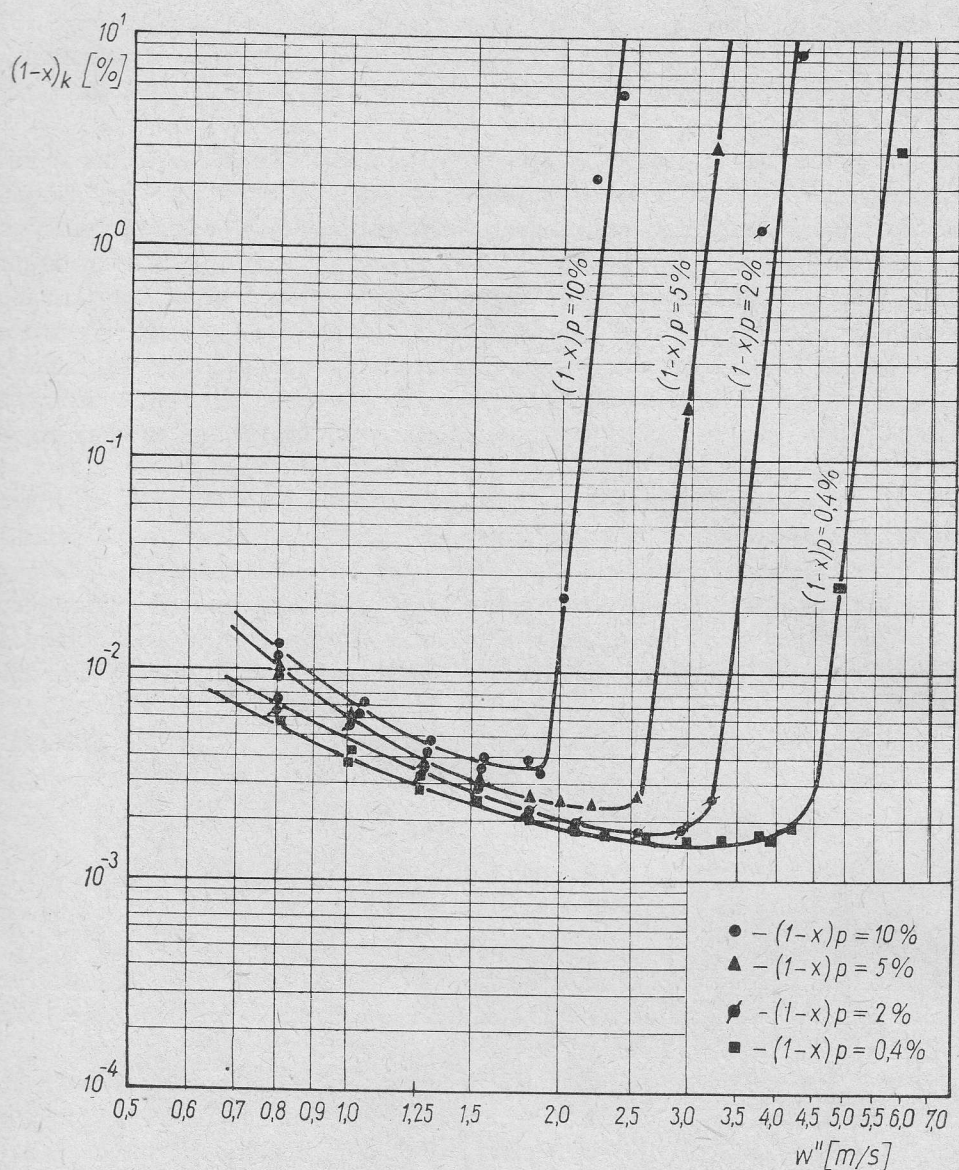
6. Wyniki badań

Wyniki badań uporządkowano w formie charakterystyk separacji i charakterystyk oporów. Przykładowo, charakterystyki takie dla separatora o wysokości $h=100$ mm i wskaźniku gęstości $N=360 \text{ m}^2/\text{m}^3$ pokazane są na rys. 9.

Jak widać z rys. 9, wilgotność czynnika za separatorem maleje ze wzrostem prędkości początkowej osiągając minimum wartości, a następnie gwałtownie rośnie. Punkt w którym funkcja $(1-x)_k=f(w'')$ przy $(1-x)_p=\text{const}$ osiąga minimum jest pierwszym punktem krytycznym, tzn. po przekroczeniu tego punktu wilgotność powietrza wzrasta, początkowo wolno, a przy dalszym powiększaniu prędkości gwałtownie.

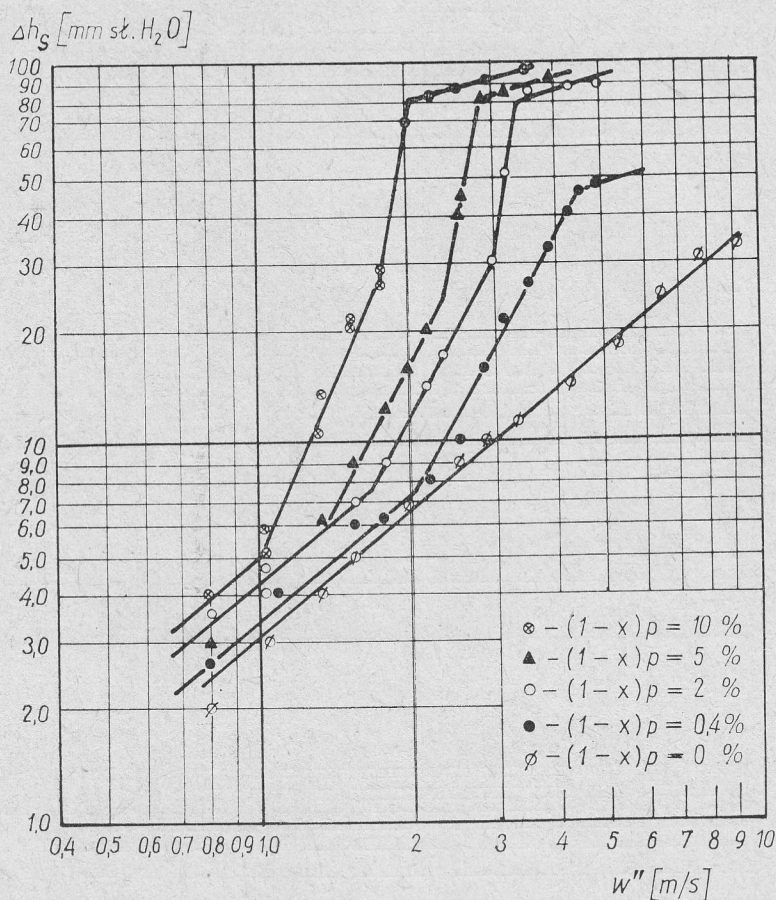
Oporo separatorów $\Delta h_s=f(w'', (1-x)_p)$ w podanym układzie można w pewnych przedziałach prędkości aproksymować odcinkami linii prostej (rys. 10). W przedziale najmniejszych prędkości linie na przytoczonym wykresie są równoległe do linii oporów suchego separatora. Przy wzroście prędkości nachylenie prostych staje się bardziej strome, tzn. wzrasta liczba oporów. Po przekroczeniu drugiego punktu krytycznego następuje nagle zmniejszenie kąta nachylenia prostych $\Delta h_s=f(w'')$.

Zarówno pierwszy jak i drugi krytyczny punkt można określić na podstawie zależności oporów od prędkości przedstawionych wykreślnie. Przykładowo przedstawia to



Rys. 9. Zależność wilgotności powietrza za separatorem od prędkości i wilgotności powietrza przed separatorem. Separator: $h=100$ mm, $N=360$ m²/m³

rys. 11, na którym naniesione zostały wyniki badań separatora o $h=100$ mm, $N=360$ m²/m³ przy $(1-x)_p=5\%$. Z rysunku tego wynika, że minimum wilgotności $(1-x)_k$ na krzywej charakterystycznej separatora, odpowiada początek odcinka prostej o najbardziej stromym nachyleniu. Odpowiada to wartości prędkości w pierwszym punkcie krytycznym, podczas gdy koniec tego odcinka odpowiada wartości prędkości w drugim punkcie krytycznym. Przebieg procesu separacji przedstawiają w czterech kolejnych fazach rysunki

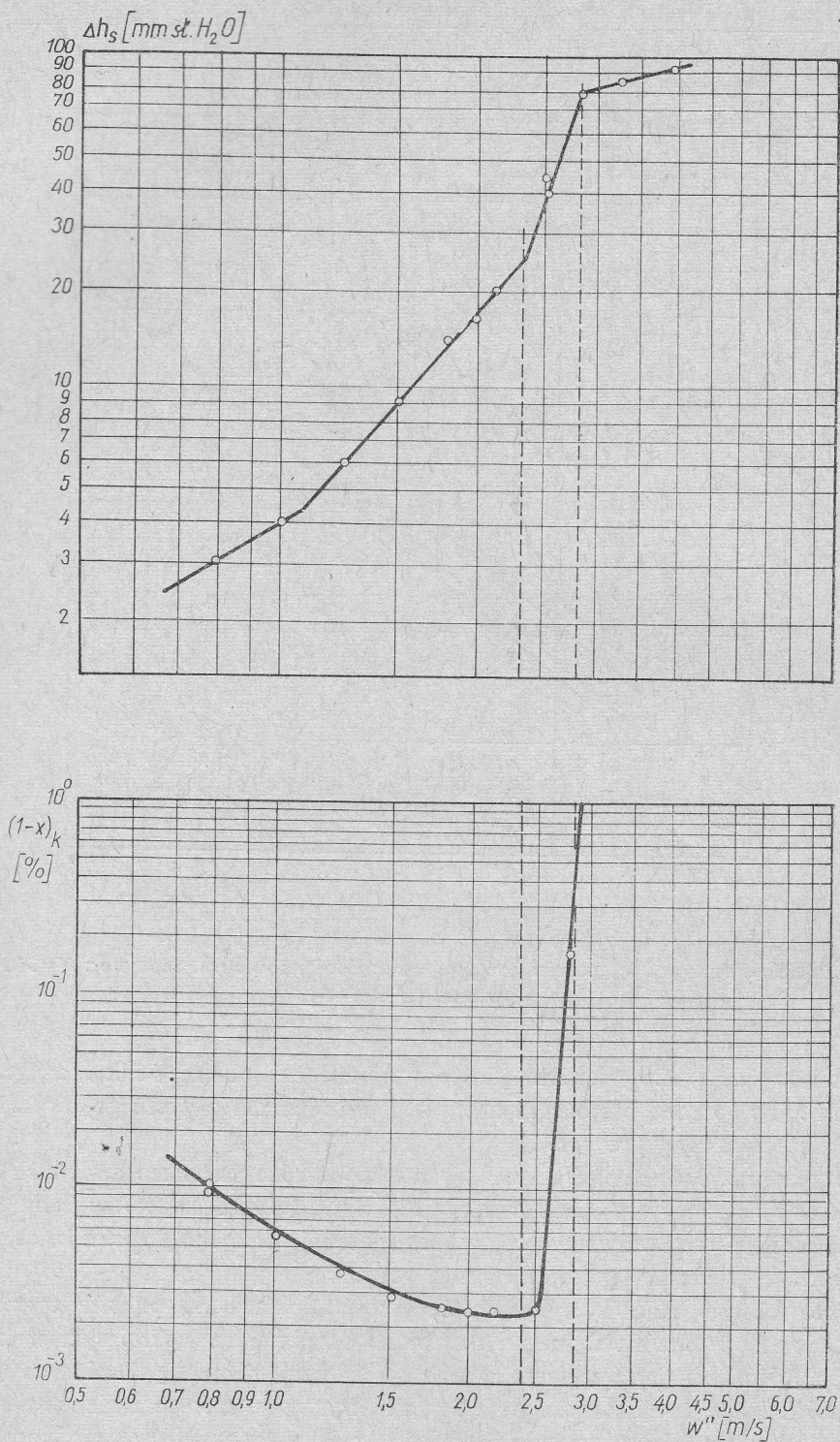


Rys. 10. Zależność oporów i wilgotności końcowej od prędkości powietrza. Separator: $N=360 \text{ m}^2/\text{m}^3$
 $h=100 \text{ mm}$, $(1-x)_p=5\%$

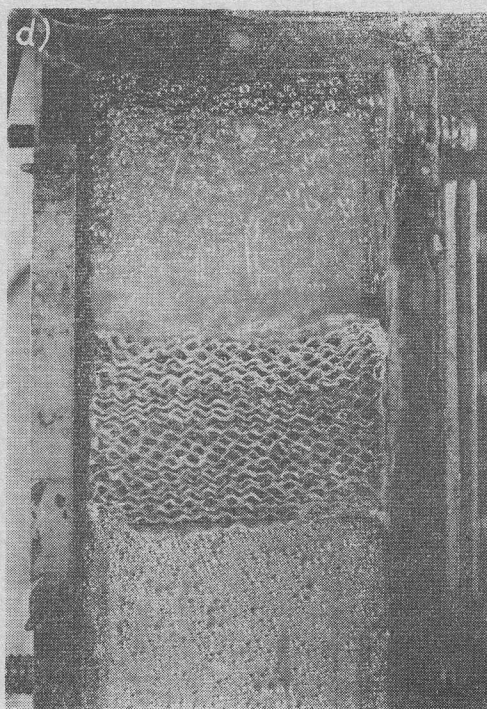
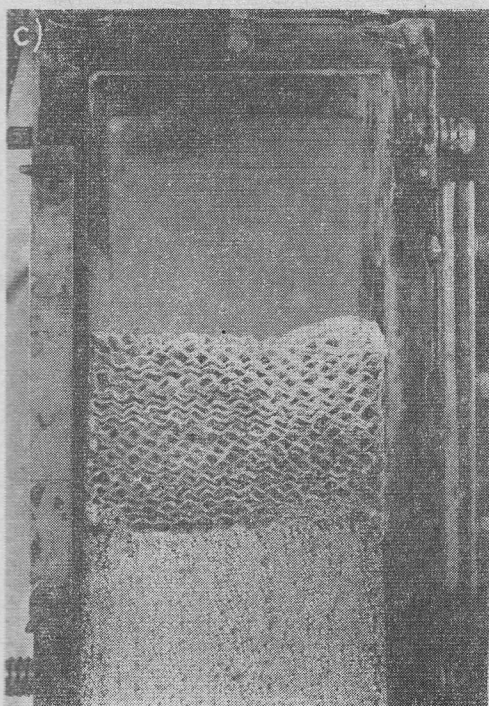
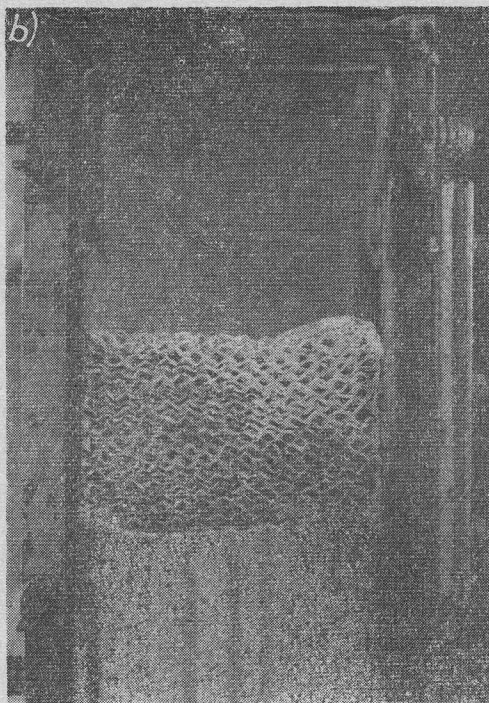
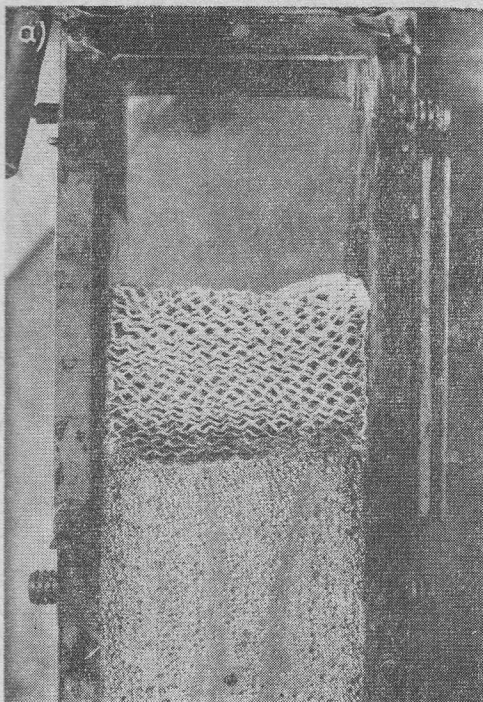
12a, b, c i d. Na rys. 12a pokazano stan separacji znacznie poniżej punktu krytycznego. Rysunki 12b i c obrazują przebieg separacji w pobliżu punktu krytycznego, a rys. 12d – stan w obszarze nadkrytycznym.

Należy zauważyć, że stopień zalania separatora jest różny na przedstawionych rysunkach. Całkowicie zalany jest separator na rys. 12d, a nad separatorem tworzy się określonej grubości burzliwa warstwa wody. Na rysunku występuje ona jako nieostra biała plama, powyżej której widoczne są krople i strugi wody.

Przeprowadzone badania wykazały, że jakość separacji do punktu krytycznego jest tak dobra, że spełnia wymagania stawiane urządzeniom separującym w kotłach parowych. Również opory przepływu są małe i nieznacznie różnią się dla różnych odmian separatorów. Jedynym ograniczeniem jest punkt krytyczny, którego umiejscowienie zależy od wilgotności początkowej i konstrukcyjnych parametrów separatora. Normalną pracę kotła utrzymuje się zwykle w granicach od 50 do 100% maksymalnego obciążenia trwałego. Dlatego konieczne jest posiadanie informacji o położeniu punktów



Rys. 11. Zależność oporów i wilgotności końcowej od prędkości powietrza. Separator: $N=360 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $h=100 \text{ mm}$, $(1-x)_p=5\%$



Rys. 12. Przebieg procesu separacji. Separator: $N=360 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $h=100 \text{ mm}$; a) $(1-x)_p=2\%$, $w''=0,8 \text{ m/s}$ przed punktem krytycznym, b) $(1-x)_p=2\%$, $w''=2,7 \text{ m/s}$ przed punktem krytycznym, c) $(1-x)_p=2\%$, $w''=2,8 \text{ m/s}$ w punkcie krytycznym, d) $(1-x)_p=2\%$, $w''=4,25 \text{ m/s}$ po przekroczeniu punktu krytycznego

krytycznych. Zgodnie z tym, równanie końcowe ustalono dla warunków odpowiadających krytycznej prędkości.

Dla separatora o wysokości $h=100$ mm i wskaźniku gęstości $N=360 \text{ m}^2/\text{m}^3$ oraz wilgotności początkowej $(1-x)_p=1\%$ ma ono postać w ujęciu kryterialnym:

$$\frac{w'' \sqrt{\gamma''}}{\sqrt[4]{g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')}} = 0,675, \quad (12)$$

a po rozwinięciu względem prędkości krytycznej

$$w_{kr}'' = 2,22 \left[\frac{\sigma (\gamma' - \gamma'')}{\gamma''^2} \right]^{0,25}. \quad (13)$$

Równanie (13) pozwala na określenie prędkości pary (gazu) na wlocie do separatora o wysokości $h=100$ mm i wskaźniku gęstości $N=360 \text{ m}^2/\text{m}^3$ przy dowolnym ciśnieniu czynnika roboczego oraz dla wilgotności początkowej $(1-x)_p=1\%$. Wpływ zmian ciśnienia i właściwości fizycznych pary (gazu) uwzględnia czynnik stojący w klamrach. Zależność tego parametru od ciśnienia podano dla pary wodnej w tabeli 1.

Tabela 1

Zależność parametru $f(p) = \sqrt[4]{\frac{\sigma (\gamma' - \gamma'')}{\gamma''^2}}$ od ciśnienia dla pary wodnej

p	ata	1	10	20	50	75	100	140	180
$f(p)$	$\text{m}^{1/2}$	2,035	0,622	0,417	0,232	0,169	0,128	0,085	0,052

7. Wnioski końcowe

1. Przeprowadzone badania nad skutecznością działania siatkowych separatorów wilgoci wykazały, że mogą one mieć zastosowanie w kotłach parowych jako separatory trzeciego stopnia w układach trzystopniowych lub jako separatory końcowe w układzie jednostopniowej separacji.

2. Zarówno jakość separacji jak i dopuszczalna prędkość czynnika na wlocie zależą od wysokości separatora. Badania wykazały, że dobrą skuteczność separacji uzyskano przy wysokości separatora równej $h=100$ mm. Separator o takiej wysokości uznano jako wielkość podstawową. Wilgotność powietrza za separatorem wynosiła mniej niż $3 \cdot 10^{-5}$. Powiększenie wysokości separatora do 150 mm wpływa nieznacznie na jakość separacji i pozwala na powiększenie prędkości wlotowych o ok. 10%. Powiększanie wysokości separatora powyżej 150 mm jest nieuzasadnione wynikami badań, ponieważ nie zauważono korzyści ani w zakresie prędkości krytycznej, ani jakości separacji. Separatory o wysokości mniejszej od 100 mm mogą mieć również zastosowanie w przypadkach, gdy nie są stawiane duże wymagania odnośnie do jakości pary.

3. Wpływ wilgotności początkowej badano w obszarze od $(1-x)_p = 0,4 - 10\%$. Badania wykazały, że w badanym zakresie wilgotność początkowa nie ma wpływu na jakość separacji w zakresie obciążenia odpowiadającego normalnym warunkom pracy kotła.

4. Wilgotność początkowa ma jednak wpływ na dopuszczalną prędkość czynnika na wlocie. Również gęstość separatora określona parametrem Nh ma wpływ na prędkość czynnika. Stwierdzono, że przy gęstszych separatorach wcześniej występuje punkt krytyczny oraz szybciej następuje zalanie separatora. Badania przeprowadzono przy zmianie wskaźnika gęstości $N = 180 - 720 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

5. Zarówno zamiana parametrów konstrukcyjnych separatora (wysokość, gęstość) jak i czynników ruchowych (prędkość, wilgotność początkowa) wpływają na zmianę oporów. Opory separatora w zakresie normalnych warunków ruchowych kotła są małe (ok. 20 - 40 mm sł. wody) i nie mają decydującego znaczenia przy wyborze separatora. Przy powiększaniu prędkości czynnika do nadkrytycznego zakresu prędkości, opory przepływowe rosną istotnie i osiągają dla separatora gęstego ($N = 720 \text{ m}^2/\text{m}^3$) i dużej wilgotności początkowej wartości przekraczające 100 mm sł. wody.

6. Poziome separatory siatkowe są skuteczniejszymi urządzeniami dla separacji wilgoci w kotłach parowych w porównaniu z podobnie usytuowanymi żaluzjami. Dotyczy to zarówno jakości separacji, jak i prędkości pary na wlocie.

Praca wpłynęła do Redakcji w grudniu 1973 r.

Literatura

- [1] R. F. Davis, *The development of the large assisted-circulation boiler in England*. Publication Number WP 633A. International Combustion Ltd. Vol. 177, No 20, 1963, s. 544.
- [2] S. S. Kutateladze, M. A. Styrikowicz, *Gidrawlika gazożidkostnych sistem*. Gosenergoizdat, 1958, s. 18.
- [3] A. T. Troskolański, *Hydromechanika techniczna, T1. Hydromechanika racjonalna*. PWT, 1951, s. 257.
- [4] A. Zyk, *Wskaźniki obciążenia powierzchni lustra wody i przestrzeni parowej walczaków kotłów parowych*. Komunikaty informacyjne CBKK nr 6 i 7, 1968, s. 59.
- [5] A. Zyk, *Wpływ podstawowych parametrów konstrukcyjnych i ruchowych na skuteczność siatkowych separatorów wilgoci w kotłach parowych. Cz. I. Badanie separatorów siatkowych w układzie poziomym*. CBKK, 1970.
- [6] *Post-War Developments in British Water-Tube Boiler Design - V''*. The Steam Engineer, July 1961.
- [7] Katalog *Becoil Demisters*, Glasgow S. E.
- [8] W. H. Armacost, *The Controlled Circulation Boiler Combustion*, January 1954

Исследования горизонтальных сеточных паросепараторов, предназначенных для энергетических установок

Резюме

Основные проблемы сепарации представлены на примере случаев, имеющих в паровых котлах (рис. 1 - 2).

Чаще всего применяемые в этих установках сепарирующие системы представлены на рис. 3 - 5. Рядом достоинств, по отношению к актуально применяемым сепарирующим системам, обладают

сепараторы, конструкционная характеристика которых и принцип действия обсуждаются в дальнейшей части статьи. На основе общих аналитических зависимостей (формулы (3) - (5)) устанавливается общее критериальное уравнение (11). Конкретные значения коэффициентов определялись экспериментально на специальном измерительно-исследовательском стенде (рис. 7 и 8). Ход сепарационного процесса в докритическом, околокритическом и сверхкритическом режимах работы представлены на рисунках (напр. 12а до 12d). Результаты исследований представлены в виде зависимостей качества сепарации от скорости (рис. 9) и сопротивления течения через сепаратор от скорости (рис. 10).

Для конкретного сепаратора и определенной влажности приводятся критериальные уравнения (12) и (13), позволяющие рассчитывать критическую скорость.

В результате проведенных исследований формулируются более общие выводы об этих сепараторах. Доказывается также, что сеточные сепараторы являются более эффективными сепарирующими устройствами, обеспечивающими очень хорошее качество сепарации и характеризующимися малыми сопротивлениями течения. Могут они найти применение не только в паровых котлах, но также в парогенераторах атомных электростанций, в качестве внешних турбинных сепараторов и в ряду аппаратов для химической промышленности.

Investigations of Horizontal Gauze Steam Separators Designed for Power Plants

Summary

Basic problems of the separation are presented for exemplified steam boilers (Figs. 1, 2).

Separating systems most widely used in these devices are presented in Figs 3 - 5. Separators, their design and principle of operation being described beneath, have many advantages over the separating systems used at present. A general criterion equation (11) was derived from the general analytic relations (formulas (3) - (5)). Actual values of the coefficients were obtained from investigations carried out in a special experimental rig (Figs 7 and 8). Separation in the sub- and supercritical regions and near the critical point is illustrated in figures enclosed (for instance Figs 12a through 12d). The results of the investigations are presented in diagrams showing the separation quality versus the velocity (Fig. 9) and the separator flow resistance versus the velocity (Fig. 10).

A criterion equation (12) and (13), given for a definite separator and a fixed humidity value, allows calculating the critical velocity.

The investigations carried out made it possible to formulate some general conclusions regarding the separators under consideration. They proved the gauze separators to be more efficient separating devices, of low flow resistance and providing very high separation quality. Apart from steam boilers, they can be used in various power assemblies, for instance in steam generators for nuclear power plants, external turbine separators as well as in a number of devices in the chemical industry.