

JERZY ZIELIŃSKI

ZASTOSOWANIE TECHNICZNE MODELOWANIA PROCESÓW
NA PODSTAWIE ANALOGII WYMIANY CIEPŁA I MASY

Praca wykonana
w Zakładzie Fizykochemicznych
Podstaw Technologii
Instytutu Chemii Fizycznej
Polskiej Akademii Nauk

Promotorzy: prof. dr Stanisław Bretsznajder

doc. dr Ryszard Marcinkowski

Biblioteka Instytutu Chemii Fizycznej PAN

F-B.65/69



Warszawa 1968



B 65/1969

Pragnę niniejszym wyrazić swą wdzięczność
dla Profesora Stanisława Bretsznajdera,
który był inicjatorem tych badań.

Jednocześnie składam podziękowanie
Panu doc. dr Ryszardowi Marcinkowskiemu
za podjęcie się kierownictwa tej pracy
i nadanie jej ostatecznego charakteru.

<u>Spis rozdziałów</u>	str
Wprowadzenie	1
Wykaz oznaczeń	3
Wartości stosowanych w obliczeniach stałych fizykochemicznych	6
1. Część teoretyczna	7
1.1. Analogia zjawisk	7
1.2. Analogia między zjawiskami wymiany pędu, ciepła i masy	7
1.3. Analogia między zjawiskami wymiany pędu, ciepła i masy przy przepływie burzliwym	10
1.4. Empiryczne ujęcie analogii między zjawiskami wymiany ciepła i masy	13
1.6. Kryteria wyboru reakcji modelowej	21
1.7. Charakterystyka reakcji jodu ze skrobią	22
2. Część doświadczalna	29
2.1. Poszukiwania reakcji modelowej	29
2.2. Opis aparatury	38
2.3. Badanie zależności stężenia par jodu w po- wietrzu od natężenia przepływu powietrza przez kolumnę z jodem	44
2.4. Sposób przygotowania absorbentu	47
2.5. Wstępne badania reakcji modelowej	48
2.6. Badania ilościowe reakcji modelowej	51
2.6.1. Sposób prowadzenia doświadczeń	51
2.6.2. Badanie trwałości zdjęć jodoskrobiowych ..	53
2.6.3. Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od składu roztworu użytego do nasycania bibuły	56

2.6.4.	Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od czasu nasycania bibuły roztworem skrobi i jodku kadmowego.....	60
2.6.5.	Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od czasu przechowywania roztworu skrobi i jodku kadmowego użytego do nasycania bibuły	63
2.6.6.	Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od czasu przechowywania zdjęć przed suszeniem	66
2.6.7.	Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od wilgotności absorbentu w czasie wykonywania doświadczenia.....	68
2.6.8.	Dyskusja wyników	75
2.7.	Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu....	76
2.7.1.	Określenie ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu za pomocą empirycznego równania opisującego wymianę masy.....	76
2.7.2.	Oznaczanie ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu za pomocą izotopu promieniotwórczego ^{131}J	84
2.7.3.	Dyskusja wyników	89
2.8.	Badanie wymiany masy przy pomocy opracowanej metody oznaczania współczynników wnikania masy	90
2.8.1.	Sposób prowadzenia pomiarów	90

	str
2.8.2. Analiza błędu pomiaru współczynnika wnikania masy	91
2.8.3. Badanie wymiany masy przy przepływie płynu między równoległymi płytami	95
2.8.4. Badanie wymiany masy na odcinku stabilizacji stężeniowej przy przepływie płynu przez rurę...	101
2.8.5. Badanie wymiany masy przy opływie walca	108
2.8.6. Badanie wymiany masy przy opływie pęczka rur...	113
2.8.7. Badanie wymiany masy przy przepływie płynu przez wypełnienie ziarniste	124
2.8.8. Badanie wymiany masy za siatką umieszczoną w rurze	130
3. Omówienie wyników i wnioski	137
Opis przyrządu do badania wymiany masy	142
Wykaz cytowanej literatury	145

Wprowadzenie

Lokalne współczynniki wnikania ciepła i masy dokładnie charakteryzują procesy wymiany, ponieważ pozwalają określać lokalne gęstości strumieni ciepła i masy na badanej powierzchni.

W najprostszycch przypadkach przy przepływie laminarnym, współczynniki wnikania ciepła i masy można określić analitycznie znając własności fizykochemiczne płynu. Obliczenia takie są niemożliwe dla przepływu burzliwego ze względu na niedostateczną znajomość zjawiska przepływu turbulentnego.

Dla niektórych układów, zarówno dla przepływu laminarnego jak i burzliwego, współczynniki wnikania ciepła i masy można określić za pomocą równań empirycznych. Dla układów dotychczas nie badanych wielkości te oznacza się na drodze doświadczalnej. O ile jednak wyznaczenie średnich współczynników wnikania ciepła i masy jest stosunkowo proste, to pomiary współczynników lokalnych nastroczą duże trudności.

Za pomocą różnego rodzaju mikrosond można zmierzyć lokalne współczynniki wnikania ciepła w kilku punktach badanej powierzchni, ale na ogół nie można uzyskać tym sposobem szczegółowego rozkładu wartości współczynnika wnikania ciepła.

Lokalne współczynniki wnikania masy oznacza się najczęściej na podstawie pomiarów szybkości sublimacji lub rozpuszczania ciał stałych. Metoda ta jest pracochłonna i nie daje wystarczająco dokładnych wyników.

Celem podjętych badań było opracowanie prostej i dostatecznie dokładnej metody doświadczalnej oznaczania lokalnych współczynników wnikania masy. Analogia między zjawiskami wymiany

ciepła i masy pozwala na wykorzystanie takiej metody do określania lokalnych współczynników wnikania ciepła.

Za najdogodniejszą do oznaczania lokalnych współczynników wnikania masy uznano metodę, w której czynnik wprowadzony do strumienia płynu reaguje z absorbentem umieszczonym na powierzchni badanego modelu dając barwny produkt. Dotychczasowe próby opracowania takiej metody nie dały w pełni zadowalających wyników.

W wyniku systematycznych poszukiwań wybrano reakcję modelową do badania procesów wnikania masy. Jest to reakcja par jodu z absorbentem będącym bibułą nasyconą wodnym roztworem skrobi i jodku kadmowego. Stwierdzono doświadczalnie, że na powierzchni absorbentu powstają wyraźne i trwałe obrazy nadające się do oznaczeń ilościowych.

Na podstawie wyników doświadczeń przeprowadzonych w rurach, dla których potrafimy obliczać lokalne współczynniki wnikania masy, oraz na podstawie pomiarów wykonanych z pomocą izotopu promieniotwórczego ^{131}J określono zależność współczynnika odbicia światła dla otrzymywanych zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu. Zależność tę wykorzystano do zbadania procesów wymiany masy w różnych układach geometrycznych.

W aneksie dołączonym do niniejszej pracy opisano przyrząd, który może być stosowany w laboratoriach badawczych i biurach projektowych do badania procesów wymiany masy.

Wykaz oznaczeń

a	- współczynnik przewodzenia temperatury	$\frac{m^2}{s}$
b	- ciśnienie barometryczne	$\frac{N}{m^2}$
b	- szerokość	m
c	- stężenie molowe	$\frac{kmol}{m^3}$
c'	- stężenie molowe na powierzchni międzyfazowej	$\frac{kmol}{m^3}$
c _n	- stężenie molowe pary nasyconej	$\frac{kmol}{m^3}$
c _o	- stężenie molowe początkowe	$\frac{kmol}{m^3}$
d	- średnica	m
d _h	- średnica zastępcza /hydrauliczna/	m
D	- współczynnik dyfuzji	$\frac{m^2}{s}$
g	- przyspieszenie ziemskie	$\frac{m}{s^2}$
h	- wysokość	m
H	- entalpia molowa	$\frac{J}{kmol}$
K	- stała równowagi	-
k _c	- współczynnik wnikania masy	$\frac{m}{s}$
l	- długość	m
l	- wymiar liniowy	m
L _s	- molowe ciepło sublimacji	$\frac{J}{kmol}$
m	- masa	kg
m _p	- masa liczona na jednostkę powierzchni	$\frac{kg}{m^2}$
M	- masa molowa	$\frac{kg}{kmol}$
n	- stopień polimeryzacji	bezwym.
n	- ilość substancji	kmol
n _p	- ilość substancji liczona na jednostkę powierzchni.	$\frac{kmol}{m^2}$

p	- ciśnienie	$\frac{N}{m^2}$
R	- stała gazowa	$\frac{J}{kmol \cdot deg}$
R	- współczynnik odbicia światła	%
t	- czas	s
T	- temperatura	$^{\circ}K$
u	- prędkość liniowa	$\frac{m}{s}$
U	- średnia prędkość liniowa przepływu	$\frac{m}{s}$
V_t	- natężenie przepływu objętościowe	$\frac{m^3}{s}$
X	- stosunek masowy składników roztworu	$\frac{kg}{kg}$
α	- stopień absorpcji	%
α	- współczynnik wnikania ciepła	$\frac{W}{m^2 \cdot deg}$
β	- wilgotność względna powietrza	%
ε	- współczynnik lepkości kinematycznej burzliwej	$\frac{m^2}{s}$
ε_H	- współczynnik burzliwego przewodzenia temperatury	$\frac{m^2}{s}$
ε_M	- współczynnik dyfuzji burzliwej	$\frac{m^2}{s}$
η	- współczynnik lepkości dynamicznej	$\frac{N \cdot s}{m^2}$
α	- współczynnik ekstynkcji	$\frac{1}{m}$
λ	- długość fali	m
λ	- współczynnik przewodzenia ciepła	$\frac{W}{m \cdot deg}$
ν	- współczynnik lepkości kinematycznej	$\frac{m^2}{s}$
ρ	- gęstość	$\frac{kg}{m^3}$
θ	- kąt płaski	rad

Liczby kryterialne

$$Fo = \frac{a \cdot t}{l^2} \text{ liczba Fouriera}$$

$$Fo_{\text{dyf}} = \frac{D \cdot t}{l^2} - \text{dyfuzyjna liczba Fouriera}$$

$$j_H = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} \cdot Pr^{\frac{2}{3}} - \text{współczynnik Colburna we wzorach opisujących wymianę ciepła}$$

$$j_M = \frac{Sh}{Re \cdot Sc} \cdot Sc^{\frac{2}{3}} - \text{współczynnik Colburna we wzorach opisujących wymianę masy}$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} - \text{liczba Nusselta}$$

$$Pe = \frac{l \cdot u}{a} - \text{liczba Pecleta}$$

$$Pe_{\text{dyf}} = \frac{l \cdot u}{D} - \text{dyfuzyjna liczba Pecleta}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} - \text{liczba Prandtla}$$

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} - \text{liczba Reynoldsa}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} - \text{liczba Schmidta}$$

$$Sh = \frac{k_c \cdot d}{D} - \text{liczba Sherwooda}$$

Wartości stosowanych w obliczeniach stałych fizykochemicznych

Własności fizykochemiczne powietrza w temperaturze 293,2^oK,
pod ciśnieniem $101,3 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ i o wilgotności względnej 95% :

$$\rho = 1,195 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad 1/$$

$$\eta = 18,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \quad 2/$$

$$\nu = 15,31 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} .$$

Własności fizykochemiczne jodu w temperaturze 293,2^oK 2/ :

$$M = 253,82 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} ,$$

$$\rho = 4,93 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} ,$$

$$L_s = 62,3 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kmol}} ,$$

$$D_{\text{J}_2/\text{pow.}} = 8,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} .$$

1. CZĘŚĆ TEORETYCZNA

1.1. Analogia zjawisk

Jakościowe różne zjawiska są analogiczne, jeżeli wielkości charakteryzujące je w odpowiadających sobie punktach i momentach są do siebie proporcjonalne. Analogia między zjawiskami może wystąpić wtedy, gdy zjawiska te opisane są układami równań izomorficznych. Równania te przedstawiane w postaci bezwymiarowej są identyczne. Jeżeli bezwymiarowe warunki brzegowe /początkowe i graniczne/ są jednakowe, to bezwymiarowe rozwiązania tych równań są również identyczne.

Korzystając z analogii można zbudować model, w którym realizuje się przebieg zjawiska analogicznego, dogodniejszego do badania niż interesujące nas zjawisko. Na podstawie praw analogii wnioski z obserwacji poczynionych na modelu można przenieść na interesujący nas układ, uzyskując w ten sposób żądane informacje łatwiejszą drogą.

Przy rozwiązywaniu zagadnień z zakresu inżynierii i technologii chemicznej bardzo pomocne są analogie między zjawiskami wymiany pędu, ciepła i masy.

1.2. Analogia między zjawiskami wymiany pędu, ciepła i masy

Zjawiska wymiany pędu, ciepła i masy można opisać za pomocą następujących zależności:

1. wymianę pędu równaniem Naviera - Stokesa:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = \nu \nabla^2 u - \frac{\nabla p}{\rho} + g ,$$

2. wymianę ciepła równaniem Fouriera - Kirchhofa:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = a \nabla^2 T,$$

3. wymianę masy następującym równaniem:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \nabla c = D \nabla^2 c.$$

Znaczenie symboli wyjaśniono w spisie.

Powyżej podane równania są słuszne przy następujących założeniach upraszczających:

- własności fizykochemiczne płynu są jednakowe w każdym punkcie,
- wymiana pędu, ciepła i masy zachodzi tylko przez dyfuzję molekularną,
- jedynym źródłem pędu są różnice ciśnień i siły grawitacji, natomiast nie ma w płynie źródeł ciepła oraz nie zachodzą reakcje chemiczne,
- szybkości procesów wymiany są niewielkie.

Podobieństwo między powyżej podanymi równaniami wskazuje na możliwość wystąpienia analogii między zjawiskami wymiany pędu, ciepła i masy. Istnieją jednak ograniczenia sprawiające, że nie jest to analogia pełna.

Obecność w pierwszym równaniu dodatkowego członu $-\frac{\nabla p}{\rho} + g$ ogranicza zakres analogii do przypadków, gdy wyraz ten można pominąć w porównaniu z pozostałymi.

Przyczyną istotnych różnic między równaniem pierwszym i dwoma pozostałymi jest fakt, że prędkość jest wielkością wektorową, natomiast temperatura i stężenie są wielkościami skalarnymi.^{5/}

Dla płynu nieruchomego równania 2. i 3. opisują odpowiednio nieustalony przepływ ciepła i nieustaloną dyfuzję masy, natomiast równanie 1. wyraża równowagę mechaniczną w polu sił ciężkości.

Równania 2. i 3. można rozwiązać, jeżeli znane jest pole prędkości, które wynika z równania 1., natomiast, przy poczynionych na wstępie założeniach upraszczających, pola temperatury i stężenia nie są potrzebne do rozwiązania równania pierwszego.

Z powyższego wynika, że analogia między zjawiskami wymiany ciepła i masy powinna być pełniejsza niż analogia wymiany pędu i ciepła lub analogia wymiany pędu i masy.

Z przedstawionych w postaci bezwymiarowej równań opisujących wymianę ciepła i masy można określić warunki, które muszą być spełnione, aby zachodziła analogia między tymi zjawiskami. Równania te mają następującą postać:

$$\frac{l_0^2}{a \cdot t_0} \cdot \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{t}} + \frac{u_0 \cdot l_0}{a} \hat{u} \cdot \hat{\nabla} \hat{T} = \hat{\nabla}^2 \hat{T},$$

$$\frac{l_0^2}{D \cdot t_0} \cdot \frac{\partial \hat{c}}{\partial \hat{t}} + \frac{u_0 \cdot l_0}{D} \hat{u} \cdot \hat{\nabla} \hat{c} = \hat{\nabla}^2 \hat{c}.$$

Wielkości bezwymiarowe oznaczono daszkiem, a wartości odniesienia poszczególnych wielkości indeksem "0". Współczynnik przewodzenia temperatury a i współczynnik dyfuzji D , jako stałe dla danego układu, nie potrzebują wartości odniesienia.

Wyrażenia złożone z wielkości odniesienia są liczbami bezwymiarowymi, charakteryzującymi omawiane zjawiska:

$$\frac{at_0}{l_0^2} = Fo \quad - \text{liczba Fouriera,}$$

$$\frac{Dt_0}{l_0^2} = Fo_{\text{dyf.}} \quad - \text{dyfuzyjna liczba Fouriera,}$$

$\frac{u_0 l_0}{a}$ - Pe - liczba Pecleta,

$\frac{u_0 l_0}{D}$ - $Pe_{dyf.}$ - dyfuzyjna liczba Pecleta

Między zjawiskami wymiany ciepła i masy zachodzi analogia, jeżeli są spełnione następujące warunki:

1. Prędkości bezwymiarowe w odpowiadających sobie punktach i momentach są równe czyli zachodzi podobieństwo pól prędkości.
2. Liczba Fouriera dla zjawiska wymiany ciepła jest równa dyfuzyjnej liczbie Fouriera dla zjawiska wymiany masy.
3. Liczba Pecleta dla procesu wymiany ciepła jest równa dyfuzyjnej liczbie Pecleta dla procesu wymiany masy.
4. Bezwymiarowe warunki brzegowe /początkowe i graniczne/ są jednakowe dla obu układów.

1.3. Analogia między zjawiskami wymiany pędu ciepła i masy przy przepływie burzliwym

W technice spotykamy się najczęściej ze zjawiskami wymiany pędu, ciepła i masy przy przepływie burzliwym. Przepływ burzliwy charakteryzuje się nieregularnymi, nieuporządkowanymi zmianami prędkości w czasie w każdym punkcie strumienia. Prędkości cząstek oscylują dookoła pewnych wartości średnich. Wielkości tych zmian na ogół są dość znaczne w porównaniu z wartościami średnimi prędkości. Tory cząstek w strumieniu burzliwym są nadzwyczaj złożone. Wymiana pędu, ciepła i masy przy przepływie burzliwym jest złożonym zjawiskiem, zachodzącym przy udziale dyfuzji molekularnej i konwekcji.

W praktyce w przypadku przepływu burzliwego stosuje się tylko średnie wartości prędkości, ciśnienia, temperatury i stężeń.

Poprzednio podane równania procesów wymiany są słuszne także dla przepływu burzliwego po zastąpieniu wartości chwilowych wartościami średnimi, jeżeli uwzględni się, że procesy wymiany pędu, ciepła i masy zachodzą równocześnie na drodze dyfuzji molekularnej i przez konwekcję.

Poniżej podano równania opisujące wymianę pędu, ciepła i masy przy przepływie burzliwym. Symbole, które poprzednio oznaczały wartości chwilowe, tu oznaczają wartości średnie w pewnym, niewielkim przedziale czasu.

$$1. \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = \nabla \cdot [(\nu + \epsilon)(\nabla u + \nabla^T u)] - \frac{\nabla p}{\rho} + g,$$

$$2. \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = \nabla \cdot [(\alpha + \epsilon_H) \nabla T],$$

$$3. \frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \nabla c = \nabla \cdot [(D + \epsilon_M) \nabla c].$$

Powyżej podane równania można uważać za definicje współczynnika lepkości kinematycznej burzliwej ϵ , współczynnika burzliwego przewodzenia temperatury ϵ_H i współczynnika dyfuzji burzliwej ϵ_M . Współczynniki te nie mają charakteru własności fizycznych układu w odróżnieniu od współczynnika lepkości kinematycznej ν , współczynnika przewodzenia temperatury α i współczynnika dyfuzji D . Wartości współczynników ϵ , ϵ_H , ϵ_M zależą od charakteru przepływu, współrzędnych punktu i kierunku.

W centralnej części strumienia współczynniki ϵ , ϵ_H , ϵ_M , osiągają bardzo duże wartości, znacznie przewyższające wartości współczynników ν , α , D . Procesy dyfuzji molekularnej właściwie nie odgrywają tu roli. Gradienty prędkości temperatury i stężenia są bardzo małe, całkowite zmiany tych wielkości w burzliwej części strumienia są również niewielkie.

W pobliżu ścianki, w warstewce laminarnej wartości współczynników ϵ , ϵ_H , ϵ_M są prawie równe zero. Wymiana pędu, ciepła i masy zachodzi głównie przez dyfuzję molekularną. Gradienty prędkości, temperatury i stężenia osiągają tu stosunkowo duże wartości. Chociaż warstewka ta zwykle jest bardzo cienka, głównie w niej zachodzi spadek prędkości, temperatury i stężenia od wartości wewnątrz strumienia do wartości przy powierzchni ścianki.

W warstewce przejściowej wartości współczynników ϵ , ϵ_H , ϵ_M są porównywalne z wartościami współczynników ν , a , D .

Wyznaczanie współczynników ϵ , ϵ_H , ϵ_M jest bardzo kłopotliwe. Odbywa się na drodze obliczeniowej w oparciu o doświadczalnie zmierzone rozkłady prędkości, temperatury i stężenia. Jeżeli procesy wymiany pędu, ciepła i masy zachodzą w tym samym strumieniu płynu, to wartości współczynników ϵ , ϵ_H , ϵ_M są bardzo zbliżone. W pracach poświęconych analogii zjawisk wymiany pędu, ciepła i masy przyjmuje się na ogół, że wartości tych współczynników są jednakowe.

Rozpatrzmy teraz możliwości wystąpienia analogii między ustalonymi procesami wymiany ciepła i masy przy przepływie burzliwym. Bezwymiarowe równania opisujące te procesy mają następującą postać:

$$\frac{u_0 \cdot l_0}{a} \hat{u} \cdot \hat{\nabla} \hat{T} = \hat{\nabla} \cdot \left[\left(1 + \frac{\epsilon_H}{a} \right) \hat{\nabla} \hat{T} \right],$$

$$\frac{u_0 \cdot l_0}{D} \hat{u} \cdot \hat{\nabla} \hat{c} = \hat{\nabla} \cdot \left[\left(1 + \frac{\epsilon_M}{D} \right) \hat{\nabla} \hat{c} \right].$$

Znaczenie symboli jest takie same jak w poprzednim rozdziale. Wyrażenia złożone z wielkości odniesienia są liczbami bezwymiarowymi charakteryzującymi omawiane zjawiska:

$$\frac{u_0 \cdot l_0}{a} = Pe \quad - \quad \text{liczba Pecleta,}$$

$$\frac{u_0 \cdot l_0}{D} = Pe_{\text{dyf.}} \quad - \quad \text{dyfuzyjna liczba Pecleta.}$$

Między ustalonymi procesami wymiany ciepła i masy zachodzi analogia, jeżeli są spełnione następujące warunki:

1. Prędkości bezwymiarowe w odpowiadających sobie punktach są równe czyli zachodzi podobieństwo pól prędkości.
2. Liczba Pecleta w procesie wymiany ciepła jest równa dyfuzyjnej liczbie Pecleta w procesie wymiany masy.
3. W każdym punkcie strumienia spełniona jest zależność:

$$\frac{\delta_H}{a} = \frac{\delta_M}{D} .$$

4. Bezwymiarowe warunki graniczne są jednakowe dla obu układów.

W ogólnym przypadku podane wyżej warunki nie są spełnione. Na ogół nie potrafimy zatem przeprowadzić procesów wymiany ciepła i masy w taki sposób, aby zachodziła między nimi pełna analogia. Przypadek całkowitej analogii ma miejsce wtedy, gdy zjawiska wymiany ciepła i masy zachodzą w tym samym strumieniu płynu oraz współczynnik przewodzenia temperatury jest równy współczynnikowi dyfuzji molekularnej. Przypadek taki zachodzi jednak bardzo rzadko.

1.4. Empiryczne ujęcie analogii między zjawiskami wymiany ciepła i masy

W praktyce analogię między procesami wymiany ciepła i masy określamy jako podobieństwo mechanizmów tych zjawisk we wnętrzu strumienia i w pobliżu ścianki, oraz podobieństwo empirycznych równań bezwymiarowych opisujących te procesy.

Procesy wymiany ciepła i masy przy przepływie wymuszonym płynu opisywane są przeważnie za pomocą równań o następujących postaciach:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= A + B \text{Re}^C \text{Pr}^D, \\ \text{Sh} &= A' + B' \text{Re}^{C'} \text{Sc}^{D'}. \end{aligned}$$

Współczynniki A , B , C , D oraz A' , B' , C' , D' są dla danego układu geometrycznego stałe w pewnym zakresie liczb kryterialnych.

Intensywność procesów wymiany ciepła i masy jest jednak funkcją nie tylko parametrów uwzględnianych w powyżej podanych równaniach, ale zależy również w pewnym stopniu od stanu powierzchni ścianek aparatu, intensywności i skali burzliwości strumienia płynu oraz innych czynników, które przeważnie nie są mierzone w doświadczeniach i nie są uwzględniane w równaniach empirycznych. Wskutek tego obliczone na podstawie wyników różnych doświadczeń wartości współczynników A , B , C , D i A' , B' , C' , D' , na ogół różnią się nieznacznie między sobą. Jeżeli procesy wymiany ciepła i masy zachodzą w takich samych warunkach, to praktycznie są spełnione następujące zależności:

$$\begin{aligned} A &= A', \\ B &= B', \\ C &= C', \\ D &= D'. \end{aligned}$$

Dla przykładu wymianę ciepła i masy przy przepływie burzliwym w okrągłej rurze, w znacznej odległości od wlotu można opisać za pomocą następujących zależności^{6/}:

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}, \\ \text{Sh} &= 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Sc}^{\frac{1}{3}}. \end{aligned}$$

Dla przepływu laminarnego w pobliżu wlotu do rury równania te mają następujące postaci 7/:

$$\text{Nu} = 1,62 \text{ Re}^{\frac{1}{3}} \text{ Pr}^{\frac{1}{3}} \left[\frac{l}{d} \right]^{-\frac{1}{3}},$$
$$\text{Sh} = 1,62 \text{ Re}^{\frac{1}{3}} \text{ Sc}^{\frac{1}{3}} \left[\frac{l}{d} \right]^{-\frac{1}{3}},$$

gdzie:

d - średnica rury,

l - długość rury.

Wymianę ciepła i masy przy opływie kuli można opisać za pomocą następujących zależności 8/:

$$\text{Nu} = 2 + 0,60 \text{ Re}^{\frac{1}{2}} \text{ Pr}^{\frac{1}{3}},$$
$$\text{Sh} = 2 + 0,60 \text{ Re}^{\frac{1}{2}} \text{ Sc}^{\frac{1}{3}},$$

Równania opisujące wymianę ciepła i masy przy przepływie laminarnym przez wypełnienie ziarniste mają następujące postaci 8/:

$$\text{Nu} = 0,91 \text{ Re}^{0,49} \text{ Pr}^{\frac{1}{3}} \psi,$$
$$\text{Sh} = 0,91 \text{ Re}^{0,49} \text{ Sc}^{\frac{1}{3}} \psi,$$

gdzie ψ jest współczynnikiem zależnym od kształtu elementów wypełnienia.

W przypadku przepływu burzliwego przez wypełnienie ziarniste wymianę ciepła i masy można opisać za pomocą następujących zależności 8/:

$$\text{Nu} = 0,61 \text{ Re}^{0,59} \text{ Pr}^{\frac{1}{3}} \psi,$$
$$\text{Sh} = 0,61 \text{ Re}^{0,59} \text{ Sc}^{\frac{1}{3}} \psi.$$

Jeżeli wymiana ciepła i masy zachodzi w tym samym strumieniu płynu, to, po podzieleniu przez siebie równań opisujących omawiane procesy, otrzymujemy następującą zależność:

$$\frac{Nu - A}{Sh - A} = \left[\frac{Pr}{Sc} \right]^C .$$

Dla większości zbadanych układów $C = \frac{1}{3}$, a współczynnik A najczęściej równa się zero, względnie jest mały w porównaniu z innymi wyrazami. Biorąc to pod uwagę, powyżej podane równanie przyjmuje następującą postać:

$$\frac{Nu}{Sh} = \left[\frac{Pr}{Sc} \right]^{\frac{1}{3}} .$$

Uzyskana zależność została podana po raz pierwszy przez Chiltona i Colburna w następującej postaci ^{6/}:

$$j_H = j_M ,$$

w której:

$$j_H = \frac{Nu}{Re Pr} Pr^{\frac{2}{3}} ,$$

$$j_M = \frac{Sh}{Re Sc} Sc^{\frac{2}{3}} .$$

Zależność Chiltona-Colburna jest słuszna przy przepływie wymuszonym w różnych układach geometrycznych, jeżeli są spełnione założenia poczynione przy wyprowadzaniu poprzednio podanych równań różniczkowych opisujących procesy wymiany ^{8, 10, 11/}. Zależność ta pozwala określać współczynniki wnikania ciepła, jeżeli są znane współczynniki wnikania masy i odwrotnie.

Zależność Chiltona-Colburna jest słuszna nie tylko dla średnich wartości współczynników wnikania ciepła i masy, które występowały we wszystkich powyżej podanych wzorach, ale jest spełniona również dla wartości lokalnych ^{8/}.

1.5. Przegląd metod oznaczania współczynników wnikania masy

W literaturze opisano szereg metod oznaczania współczynników wnikania masy, spośród których tylko niektóre są przydatne do określania wartości lokalnych.

Jedną z bardzo często stosowanych metod oznaczania współczynników wnikania masy opiera się na pomiarach szybkości parowania cieczy z powierzchni nasyconego nią porowatego modelu ^{12+27/}. Nasycanie prowadzono periodycznie lub w sposób ciągły. W niektórych pracach stosowano spływ cieczy po ściankach modelu ^{28/}. Badano także szybkość parowania cieczy z powierzchni kropeł, mierzono współczynniki wnikania masy w zraszanych kolumnach z wypełnieniem, bełkotkach i innych geometrycznie złożonych układach ^{29+37/}. Stosowano różne ciecze, między innymi wodę, anilinę, benzen, nitrobenzen, chloroform, czterochlorek węgla.

Z pomiarów szybkości parowania cieczy określane są przeważnie tylko średnie wartości współczynników wnikania masy, chociaż metoda ta może być również stosowana do oznaczania wartości lokalnych. Wyniki uzyskiwane tym sposobem mogą być obarczone stosunkowo dużym błędem na skutek znacznego wpływu temperatury na prężność pary nasyconej nad powierzchnią cieczy.

Analogiczną metodę oznaczania współczynników wnikania masy stanowią sposoby oparte na pomiarach szybkości sublimacji lub

rozpuszczania ciał stałych. Badano szybkość sublimacji naftalenu lub kamfory z powierzchni brył modelowych do strumienia powietrza 30,38+46/ oraz określano szybkość rozpuszczania w strumieniu wody kształtek wykonanych z kwasu benzoowego lub adypinowego 47,48/.

Pomiary zmian wymiarów liniowych modelu w czasie doświadczenia pozwalają na oznaczenie lokalnych współczynników wnikania masy. Współczynniki średnie znajduje się najprościej przez pomiar ubytku masy badanego modelu. Aby oznaczane omawianą metodą współczynniki wnikania masy odnosiły się do ściśle określonych kształtów i możliwie niezmiennej powierzchni, zmiany wymiarów modelu podczas doświadczenia powinny być niewielkie. Wtedy jednak pomiary tych zmian nastroczą pewne trudności. Znaczny wpływ temperatury na szybkości procesów sublimacji i rozpuszczania ciał stałych obniża dokładność pomiaru współczynników wnikania masy omawianą metodą.

Na uwagę zasługuje metoda oznaczania współczynników wnikania masy oparta na pomiarach gęstości prądu granicznego na powierzchni modelu umieszczonego w strumieniu elektrolitu i włączonego w obwód prądu 49,50/. Metoda ta jest stosowana do pomiaru średnich i lokalnych współczynników wnikania masy przy opływie modeli. Istotną niedogodnością omawianej metody, jest konieczność stosowania elektrolitu jako płynu modelowego.

Rozległą i chyba niedostatecznie wykorzystaną grupę metod oznaczania współczynników wnikania masy stanowią metody, w których czynnik wprowadzony do strumienia płynu reaguje z absorbentem umieszczonym na powierzchni badanego modelu. Niektóre z tych metod można wykorzystać do określania lokalnych współczynników wnikania masy.

Thoma^{51/} wyznaczał współczynniki wnikania amoniaku od strumienia powietrza do powierzchni modelu pokrytego bibułą nasyconą mianowanym roztworem kwasu ortofosforowego. Mościcka^{52/} zastąpiła kwas ortofosforowy kwasem siarkowym. Współczynniki wnikania masy określano z pomiaru ilości zobojętnionego kwasu. W obliczeniach przyjmowano, że stężenie amoniaku przy powierzchni absorbentu w czasie doświadczenia jest równe zeru. Założenie to jest prawdopodobnie słuszne przy niezbyt dużych współczynnikach wnikania masy i przy małych stopniach zobojętnienia kwasu w czasie doświadczenia. Wtedy jednak pomiary ilości zaabsorbowanego amoniaku są obarczone stosunkowo dużym błędem. Omawiana metoda jest przydatna do określania jedynie średnich wartości współczynników wnikania masy.

Ladenburg^{53/} opisał metodę badania opływu, w której badany model pokrywa się bielą ołowianą i umieszcza w strumieniu mieszaniny powietrza i chloru. Na powierzchni modelu powstaje obraz opływu, z którego można wnioskować o przejściu laminarnej warstewki przyściennej w burzliwą.

Talbiert^{54/} nasycał porowate modele wodnym roztworem octanu ołowianego i umieszczał je w strumieniu powietrza zawierającego siarkowodór. Na powierzchni modeli powstawały obrazy opływu, z których wnioskowano o intensywności wymiany masy. Przy wysokich liczbach Reynoldsa obrazy opływu były "rozmyte". Doświadczeń ilościowych nie prowadzono.

Interesującą metodę badania opływu modeli opisał Martynow^{55/}. Badany model pokrywa się mieszaniną skrobi, jodku potasowego, podsiarczynu sodowego i wody. Po wysuszeniu powłoki model umieszcza się w strumieniu powietrza zawierającego chlor. Na powierzchni powstaje wyraźny obraz opływu, z którego można wnioskować o przejściu laminarnej warstewki przyściennej w burzliwą.

Bardzo podobną metodę badania opływu podał Zaks ^{56/}. Model pokryty mieszaniną skrobi, jodku potasowego i wody umieszcza się w strumieniu mieszaniny powietrza i chloru. Na powierzchni modelu powstaje bardzo wyraźny obraz opływu.

Djurdjewic ^{57 + 62/} opracował ciekawą metodę badania przepływu cieczy i określania lokalnych współczynników wnikania masy. Badane modele pokrywał zawiesiną żelu kwasu krzemowego w acetonowym roztworze nitrocelulozy i umieszczał w strumieniu wodnego roztworu błękitu metylowego. Na powierzchni modeli powstawały zabarwienia adsorpcyjne. Z pomiaru intensywności zaciemnień autor określał ilości zaabsorbowanego barwnika i lokalne współczynniki wnikania masy. Współczynniki wnikania ciepła obliczone w oparciu o analogię Chiltona - Colburna nie zgadzały się z wynikami pomiarów bezpośrednich.

Mościcka opracowała dwie metody badania przepływu płynu i określania lokalnych współczynników wnikania masy. W pierwszej metodzie ^{63/} przepuszczała mieszaninę powietrza i amoniaku przez model, którego ścianki były pokryte papierem ozalidowym. Amoniak dyfundował do powierzchni absorbentu i reagował ze związkami dwuazowymi zawartymi w światłoczułej emulsji, dając po naświetleniu obrazy przepływu. Otrzymywane zdjęcia próbowała autorka wykorzystać do określania lokalnych współczynników wnikania masy. Dokładność oznaczeń była bardzo mała na skutek niedostatecznej szybkości wybranej reakcji modelowej oraz wskutek dużej niejednorodności papieru ozalidowego.

W drugiej metodzie oznaczania współczynników wnikania masy Mościcka zastąpiła papier ozalidowy bibułą nasyconą wodnym roztworem siarczanu miedziowego ^{65/}. Amoniak przenikał ze strumienia powietrza do powierzchni absorbentu i reagował z siarczanem miedziowym dając obrazy przepływu. Oznaczone przez autorkę

lokalne współczynniki wnikania masy miały wartości zbliżone do wyników uzyskanych przez innych badaczy. Istotną niedogodnością omawianej metody była niedostateczna trwałość uzyskiwanych zdjęć, co utrudniało prowadzenie pomiarów.

Z dokonanego przeglądu wynika, że dotychczas nie opracowano prostej i dostatecznie dokładnej metody oznaczania lokalnych współczynników wnikania masy. Najdogodniejszą do tego celu powinna okazać się metoda, w której czynnik wprowadzony do strumienia płynu reaguje z absorbentem umieszczonym na powierzchni badanego modelu dając barwny produkt. Dotychczasowe próby opracowania takiej metody nie dały w pełni zadowalających wyników na skutek trudności trafnego wyboru reakcji modelowej.

1.6. Kryteria wyboru reakcji modelowej

W pracy podjęto próbę opracowania prostej, doświadczalnej metody oznaczania lokalnych współczynników wnikania masy między strumieniem płynu i ścianką modelu. Wybrano metodę, w której czynnik A wprowadzony do strumienia płynu reaguje z substancją B zawartą w absorbencie umieszczonym na badanej powierzchni, dając w wyniku reakcji barwny produkt AB. Współczynnik odbicia światła otrzymanego w ten sposób zdjęcia powinien umożliwić określenie lokalnego współczynnika wnikania masy. Aby to było możliwe, reakcja modelowa musi spełniać szereg warunków:

1. Reagenty A, B i AB muszą być dostatecznie trwałe w normalnych warunkach laboratoryjnych.

2. Produkt reakcji czynnika A z substancją B powinien wywoływać wyraźną zmianę współczynnika odbicia światła dla absorbentu.

3. Przy określonym sposobie prowadzenia doświadczeń zależność między współczynnikiem odbicia światła otrzymywanych zdjęć i ilością czynnika A zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu musi być wzajemnie jednoznaczna.

4. Reakcja modelowa powinna być szybka, aby stężenie czynnika A przy powierzchni absorbentu w czasie doświadczeń było niewielkie w porównaniu ze stężeniem we wnętrzu strumienia. Jeżeli szybkość reakcji modelowej będzie bardzo duża, stężenie to osiągnie pomijalnie małą wartość i znacznie zwiększą się możliwości wykorzystania metody.

Do powyżej wymienionych warunków, które musi spełnić reakcja modelowa, dochodzą jeszcze pewne ograniczenia wynikające z kosztu odczynników, toksyczności reagentów i łatwości realizacji reakcji w praktyce. Biorąc pod uwagę ostatni warunek jako płyn modelowy wybrano powietrze, jako absorbent - bibułę nasyconą wodnym roztworem substancji B.

1.7. Charakterystyka reakcji jodu ze skrobią

W oparciu o doświadczenia opisane w punkcie 2.1. wybrano reakcję modelową do określania lokalnych współczynników wnikania masy. Jest to reakcja par jodu z absorbentem będącym bibułą nasyconą wodnym roztworem skrobi i jodku kadmowego.

Mechanizm reakcji jodu z polisacharydami, szeroko stosowane, i badanej od wielu lat, w zasadzie został wyjaśniony dopiero w ostatnich latach. Podczas reakcji zachodzą dwa zjawiska ^{66,67/}.

1. tworzenie związku kompleksowego,
2. adsorpcja.

Łańcuchy poliglikozydowe owijają spiralnie cząsteczki jodu, które układają się wzdłuż osi spirali. Na każdą cząsteczkę jodu

przypada około sześciu reszt glikozy. Po zakończeniu reakcji tworzenia kompleksu jeszcze niewielka ilość jodu może ulec związaniu wskutek adsorpcji. Podany mechanizm został potwierdzony przez analizę rentgenowską i potencjometryczną 68 ÷ 72/.

Zabarwienie kompleksu jodu z polisacharydem zależy od budowy polisacharydu tzn. stopnia rozgałęzienia i długości łańcuchów peryferyjnych. Poniżej podano zależności współczynnika ekstynkcji ϵ i długości fali odpowiadającej maksimum absorpcji światła λ od stopnia polimeryzacji amylozy n dla wodnych roztworów jodu, amylozy i jodku potasowego 73/.

n	330	120	61	41	28	21	16
λ $\left[10^{-9} \text{m} \right]$	630	620	600	580	540	510	480
ϵ $\left[\frac{1}{\text{m}} \right]$	87	84	80	75	61	20	7

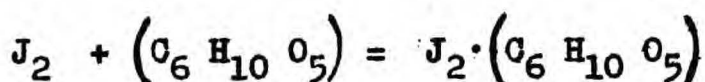
Z przytoczonych danych wynika, że przy dużych stopniach polimeryzacji zabarwienie powstającego kompleksu jest prawie niezależne od długości łańcuchów amylozy.

Dotychczas nie zostało w pełni wyjaśnione w jakiej postaci jod wchodzi w połączenia z polisacharydami. Obecnie przeważa pogląd, że wewnątrz spiralnie zwiniętego łańcucha amylozy powstaje polijon $J^- \left[J_2 \right]_n J^-$. Wielkość polijonów zależy od stężenia jonów jodkowych w roztworze. Przy małym stężeniu jonów jodkowych można przyjąć, że amyloza absorbuje jod, przy stężeniu dużym - jony J_3^- 67,74 ÷ 80/.

Pomiary entalpii tworzenia kompleksu jodu z amylozą dały dla warunków normalnych wartości zbliżone do $\Delta H = -80 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kmol}_{J_2}}$.

Duży efekt energetyczny tworzenia kompleksu pozwala przypuszczać, że zachodzi tu raczej reakcja chemiczna niż tworzenie kompleksu. Ponieważ budowa połączeń jodu z polisacharydami nie jest dokładnie znana i ściśle określona, termin "kompleks" będzie używany w dalszym ciągu w niniejszej pracy.

Obliczone wartości stałych równowagi chemicznej K_c dla reakcji



wynoszą 78/:

T [°K]	291,5	300,0	309,2
K_c	2280	610	220

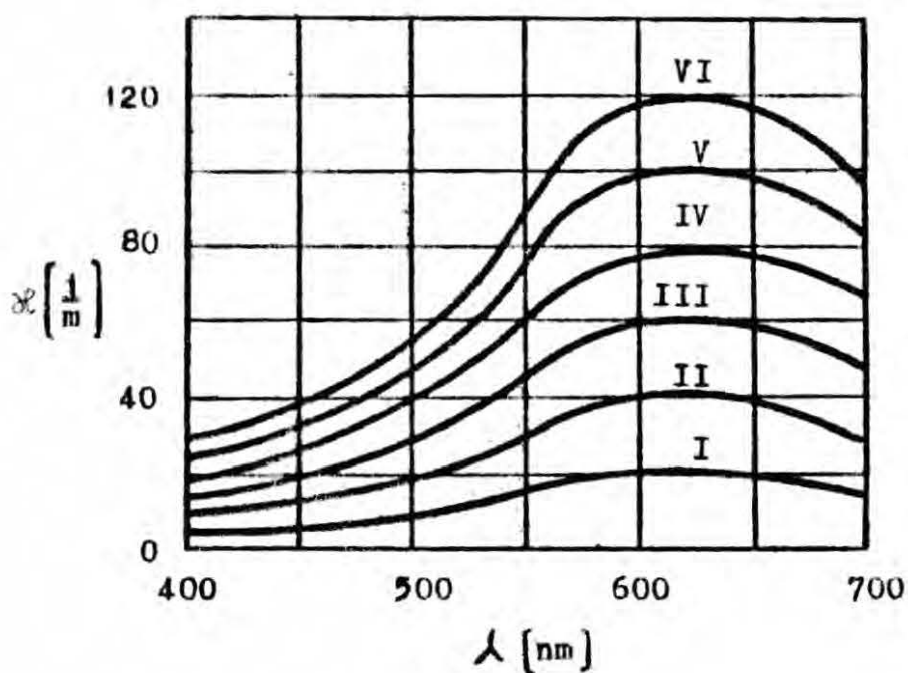
Z przytoczonych danych wynika, że reakcję jodu ze skrobią, zwłaszcza w niskich temperaturach, można uważać za nieodwracalną.

Lambert ze współpracownikami 81 + 86/ przeprowadził szereg badań dotyczących powstawania kompleksu w układzie złożonym z jodu, skrobi, jodku kadmowego i wody. Doświadczenia przeprowadzone ze specjalnie oczyszczoną amylozą dały takie same wyniki jak z handlową skrobią rozpuszczalną, która zawiera głównie amylozę.

Na rysunkach 1. i 2. przedstawiono uzyskane przez Lamberta zależności współczynnika ekstynkcji roztworów jodu, skrobi i jodku kadmowego od długości fali świetlnej oraz od stężenia jodu w roztworze. Prosta na rysunku 2. nie przechodzi przez początek układu współrzędnych, ponieważ skrobia posiada szczątkowe własności redukujące, wynikające z obecności wolnych grup aldehydowych 66,86/.

Rys. 1. Zależność współczynnika ekstynkcyjnego roztworu jodu, skrobi i jodku kadmowego od długości fali świetlnej

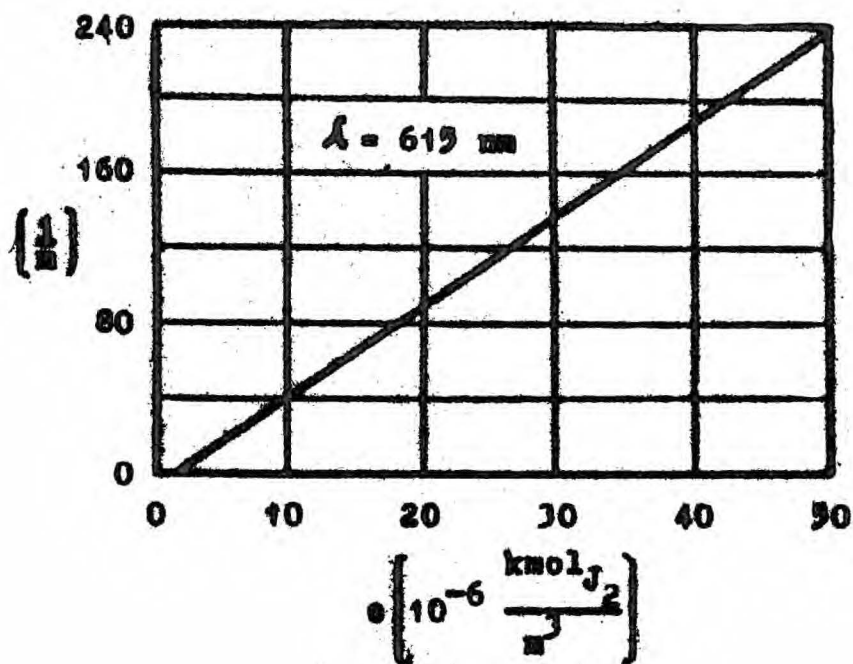
Jack L. Lambert, Anal. Chem., 23, 1247 /1951/.



stężenie jodu w roztworze $\left[10^{-6} \frac{\text{kmol}_{J_2}}{\text{m}^3} \right]$

I	-	6
II	-	12
III	-	18
IV	-	24
V	-	30
VI	-	36

Rys. 2. Zależność współczynnika ekstynkcji roztworu jodu, skrobi i jodku kadmowego od stężenia jodu w roztworze. J.L. Lambert, Anal. Chem., 35, 405 /1963/.



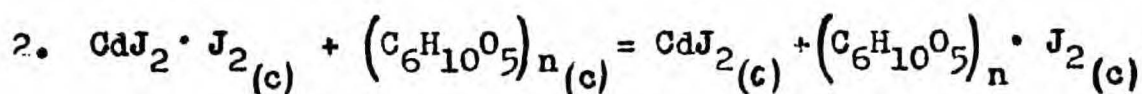
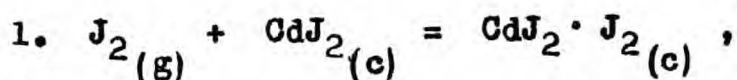
Świeży roztwór skrobi i jodku kadmowego jest bezbarwny i prawie przezroczysty. Po pewnym czasie mętnieje na skutek retrogradacji skrobi. Cząsteczki amylozy łączą się poprzez wiązania wodorowe, tworząc formy krystaliczne, które następnie wypadają z roztworu 66,87%.

Wykonane przez Lamberta pomiary współczynnika ekstynkcji przy użyciu 4-miesięcznego roztworu skrobi i jodku kadmowego dały takie same wyniki jak z roztworem świeżym. Rezultaty uzyskane przy użyciu roztworu 9-miesięcznego były wyższe o 2 procent od wyników uzyskanych z roztworem świeżym.

Stosunkowo dużą trwałość roztworów skrobi i jodku kadmowego przypisuje się obecności jonów: Cd^{2+} , CdJ^+ , CdJ_3^- , CdJ_4^{2-} , CdJ_5^{3-} , które posiadają silne własności toksyczne /np. jon Cd^{2+}

jest prawie tak toksyczny jak jon Hg^{2+} i zapobiegają wzrostowi mikroorganizmów w rozpuszczonej skrobi. Ponadto jony kompleksowe działają stabilizująco na roztwór hamując retrogradację skrobi 81 + 86/.

W literaturze nie znaleziono danych dotyczących mechanizmu i kinetyki reakcji tworzenia kompleksu jodoskrobiowego w rozpatrywanym układzie. Prawdopodobnie absorpcja par jodu na powierzchni absorbentu zachodzi według następującego schematu:



Wzór $CdJ_2 \cdot J_2$ symbolizuje ^{związki/} kompleksowe powstające przy rozpuszczaniu jodu w wodnym roztworze jodku kadmowego.

Jodek kadmowy katalizuje reakcję tworzenia kompleksu jodoskrobiowego.

Stężenie skrobi w roztworze stosowanym do nasycania bibuły było stosunkowo wysokie, tak że podczas doświadczenia na ogół nie przereagowywało więcej niż 3 procent skrobi zawartej na pasku absorbenta. Pozwala to nie uwzględniać zjawiska wyczerpywania się skrobi w czasie doświadczenia.

Pierwsze z powyżej podanych równań opisuje zjawisko rozpuszczania jodu w roztworze jodku kadmowego. Stała równowagi dla tego procesu jest wysoka 82 + 86/. Biorąc pod uwagę charakter zachodzącej reakcji można przypuszczać, że stała szybkość tej reakcji jest również wysoka. Wobec powyższego stężenia par jodu w fazie gazowej przy powierzchni absorbentu powin-

no być nieznaczne, jeżeli stężenie jodku kadmowego w roztworze użytym do nasycania bibuły jest dostatecznie wysokie. Stężenie par jodu przy powierzchni absorbentu w czasie doświadczenia powinno być niewielkie nawet gdyby stała szybkość reakcji drugiej nie była bardzo wysoka. Obserwacje uzyskiwanych zdjęć jodoskrobiowych wskazują, że reakcja druga jest również dość szybka. Wniosek ten wynika z faktu, że kompleks jodoskrobiowy powstaje na samej powierzchni absorbentu, a więc jod / w postaci kompleksu $CdJ_2 \cdot J_2$ / bardzo szybko reaguje ze skrobią znajdującą się na powierzchni bibuły i nie wnika w głąb absorbentu.

Ponieważ cząsteczki kompleksu jodoskrobiowego są bardzo duże, nie powinno wystąpić zjawisko dyfuzji kompleksu w głąb absorbentu. Jest to jeden z warunków uzyskania jednoznacznej zależności między współczynnikiem odbicia światła i ilością jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu.

2. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

2.1. Poszukiwania reakcji modelowej

Przydatność barwnej reakcji chemicznej do badania procesów wnikania masy można określić tylko na drodze doświadczalnej. W tym celu zbadano szereg reakcji zachodzących na paskach bibuły nasyconych wodnym roztworem reagentu. B i umieszczonych w strumieniu powietrza zawierającego czynnik A. W wyniku reakcji na powierzchni absorbentu powstawały obrazy przepływu. Obserwowano sposób powstawania zabarwień i rozkład zaciemnień w różnych punktach absorbentu oraz starano się ocenić trwałość uzyskiwanych zdjęć. Pozwalało to na wyciągnięcie wniosków o przebiegu reakcji na bibule i jej przydatności do określania lokalnych współczynników wnikania masy.

Poszukiwania reakcji modelowej przeprowadzono głównie wśród związków nieorganicznych, ponieważ wśród tych substancji, spodziewano się znaleźć reakcje o stosunkowo dużej szybkości.

Przeprowadzone badania miały charakter jakościowy, wyniki ich umieszczono w tablicy 1. W opisie tych doświadczeń podano równanie reakcji, określono jakość i trwałość otrzymywanych zdjęć oraz podano uwagi o przebiegu reakcji i możliwościach jej wykorzystania.

Tablica I.

Wyniki poszukiwań reakcji modelowej

Nr	Reagent w strumieniu powietrza	Reagent w roztworze nasycającym bibułę	Równanie reakcji chemicznej	Charakterystyka obrasu	Trwałość obrasu	U w a g i
1	H ₂ S	AgNO ₃	$H_2S + 2 AgNO_3 = Ag_2S + 2 HNO_3$	wyraźny	nietrwały	Absorbent ciemnieje pod działaniem czynników atmosferycznych. Podczas wymywania AgNO ₃ wodą wodociągową powstaje AgCl, który ciemnieje pod działaniem światła.
2	H ₂ S	Pb(CH ₃ COO) ₂	$H_2S + Pb(CH_3COO)_2 = PbS + 2 CH_3COOH$	wyraźny	bardzo trwały	Walbiert ^{54/} stwierdził, że przy wysokich liczbach Reynoldsa obrasy przepływu są "rozmyte". Pozwala to przypuszczać, że reakcja ta nie jest dostatecznie szybka do badania wnikania masy przy wyższych liczbach Reynoldsa.
3	H ₂ S	Cd(CH ₃ COO) ₂	$H_2S + Cd(CH_3COO)_2 = CdS + 2 CH_3COOH$	bardzo niewyraźny	trwały	
4	H ₂ S	CuSO ₄	$H_2S + CuSO_4 = CuS + H_2SO_4$	bardzo niewyraźny	trwały	
5	H ₂ S	SnCl ₂	$H_2S + SnCl_2 = SnS + 2 HCl$	bardzo niewyraźny	nietrwały	
6	H ₂ S	Fe(NO ₃) ₃	$3 H_2S + 2 Fe(NO_3)_3 = Fe_2S_3 + 6 HNO_3$	—	—	Reakcja nie zachodzi na bibule.

Nr	Reagent w strumieniu powietrza	Reagent w roztworze nasycającym bibułę	Równanie reakcji chemicznej	Charakterystyka obrazu	Trwałość obrazu	U w a g i
7	H ₂ S	Co(NO ₃) ₂	$H_2S + Co(NO_3)_2 = CoS + 2 HNO_3$	bardzo niewyraźny ziarnisty	trwały	Co(NO ₃) ₂ wymywano wodą.
8	H ₂ S	Ni(NO ₃) ₂	$H_2S + Ni(NO_3)_2 = NiS + 2 HNO_3$	—	—	Reakcja nie sędodzi na bibule
9	NH ₃	AgNO ₃	$2 NH_3 + 2 AgNO_3 + H_2O = Ag_2O + 2 NH_4NO_3$	—	—	Reakcja nie sędodzi na bibule. Absorbent ciemnieje pod działaniem czynników atmosferycznych.
10	NH ₃	CuSO ₄	$6 NH_3 + CuSO_4 + 2 H_2O =$ $= [Cu(NH_3)_4](OH)_2 + (NH_4)_2SO_4$	niewyraźny, ziarnisty	nietrwały	Reakcję tę wykorzystuje Kościcka ^{65/} do badania wnikania masy.
11	NH ₃	FeCl ₃	$3 NH_3 + FeCl_3 + 3 H_2O =$ $= Fe(OH)_3 + 3 NH_4Cl$	wyraźny	nietrwały	Pod działaniem czynników atmosferycznych FeCl ₃ ulega hydrolizie, co jest przyczyną stopniowego ciemnienia zdjęć. Po wyciągu FeCl ₃ wodą zdjęcia są bardzo trwałe. Podczas wymywania zdjęć sędodzi hydroliza FeCl ₃
12	NH ₃	Fe(NO ₃) ₂	$3 NH_3 + Fe(NO_3)_3 + 3 H_2O =$ $Fe(OH)_3 + 3 NH_4NO_3$	wyraźny	nietrwały	Pod działaniem czynników atmosferycznych Fe(NO ₃) ₃ ulega hydrolizie, co jest przyczyną stopniowego ciemnienia zdjęć. Po wyciągu Fe(NO ₃) ₃ wodą zdjęcia są bardzo trwałe. Hydroliza Fe(NO ₃) ₃ sędodzi w niewielkim stopniu podczas wymywania zdjęć.

Nr	Reagent w strumieniu powietrza	Reagent w roztworze nasycającym bibułę	Równanie reakcji chemicznej	Charakterystyka obrazu	Trwałość obrazu	U w a g i
13	NH ₃	MnSO ₄	$4 \text{NH}_3 + 2 \text{MnSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{MnO} \cdot \text{MnO}_2 + 2 (\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$	bardzo niewyraźny	trwały	
14	NH ₃	Cr ₂ (SO ₄) ₃	$6 \text{NH}_3 + \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 6 \text{H}_2\text{O} = 2 \text{Cr}(\text{OH})_3 + 3 (\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$	bardzo niewyraźny	nietrwały	
15	NH ₃	NiSO ₄	$2 \text{NH}_3 + 2 \text{NiSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} = (\text{NiOH})_2\text{SO}_4 + (\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$	bardzo niewyraźny	nietrwały	
16	NH ₃	K ₂ HgJ ₄ + KOH	$\text{NH}_3 + 2 \text{K}_2\text{HgJ}_4 + 3 \text{KOH} = (\text{NH}_2\text{HgO})\text{J} + 7 \text{KJ} + 2 \text{H}_2\text{O}$	bardzo niewyraźny	bardzo nietrwały	
17	NH ₃	CoSO ₄	$2 \text{NH}_3 + 2 \text{CoSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} = \text{Co}_2(\text{SO}_4)(\text{OH})_2 + (\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$	wyraźny, ziarnisty	bardzo trwały	Zdjęcia "wywoływano" przez wymywanie wodą soli kobaltowych. Rozpuszczenie się sąsiednich soli kobaltowych podczas "wywoływania" zdjęć jest bardzo niebezpieczne. Przy dużej wilgotności strumienia powietrza na zdjęciach powstają nieregularne plamy.
18	NH ₃	CoCl ₂	$\text{NH}_3 + \text{CoCl}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{CoClOH} + \text{NH}_4\text{Cl}$	wyraźny, ziarnisty	bardzo trwały	
19	NH ₃	Co(NO ₃) ₂	$\text{NH}_3 + \text{Co}(\text{NO}_3)_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Co}(\text{NO}_3)\text{OH} + \text{NH}_4\text{NO}_3$	wyraźny	bardzo trwały	

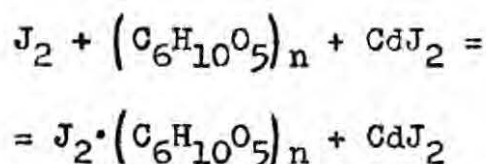
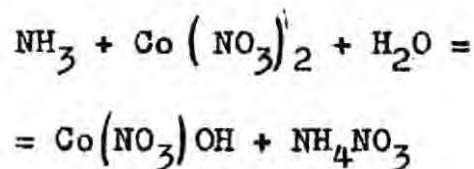
Nr	Reagent w strumieniu powietrza	Reagent w roztworze nasycającym bibulę	Równanie reakcji chemicznej	Charakterystyka obrazu	Trwałość obrazu	U w a g i
20	NH ₃	oczerwień metylowa	reakcja wskaźnikowa	niewyraźny, ziarnisty	bardzo nietrwały	
21	NH ₃	błękit bromotymolowy	reakcja wskaźnikowa	niewyraźny, ziarnisty	bardzo nietrwały	
22	NH ₃	oczerwień fenolowa	reakcja wskaźnikowa	niewyraźny, ziarnisty	bardzo nietrwały	
23	NH ₃	błękit bromofenolowy	reakcja wskaźnikowa	niewyraźny, ziarnisty	bardzo nietrwały	
24	NH ₃	błękit tymolowy	reakcja wskaźnikowa	niewyraźny, ziarnisty	bardzo nietrwały	
25	NH ₃	CH ₃ -C(NOH)- -C(NOH)-CH ₃	$2 \text{NH}_3 + 2 \text{CH}_3\text{-C(NOH)-C(NOH)-CH}_3 + \text{NiSO}_4 =$ $[\text{CH}_3\text{-C(NO)-C(NOH)-CH}_3]_2 \text{Ni} + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	bardzo niewyraźny	trwały	
26	CH ₃ -C(NOH)- -C(NOH)-CH ₃	NiSO ₄	$2 \text{CH}_3\text{-C(NOH)-C(NOH)-CH}_3 + \text{NiSO}_4 =$ $[\text{CH}_3\text{-C(NO)-C(NOH)-CH}_3]_2 \text{Ni} + \text{H}_2\text{SO}_4$	niewyraźny	trwały	Parę dwumetyloglicksywu kondensują na powierzchni wilgotnego absorbentu, nie reagując z NiSO ₄ .

Nr	Reagent w strumieniu powietrza	Reagent w roztworze nasycającym bibulę	Równanie reakcji chemicznej	Charakterystyka obrazu	Trwałość obrazu	U w a g i
27	SO ₂	KMnO ₄	$3 \text{SO}_2 + 2 \text{KMnO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} =$ $= 2 \text{MnO}_2 + \text{K}_2\text{SO}_4 + 2 \text{H}_2\text{SO}_4$	wyraźny	bardzo trwały	Doświadczenia przeprowadzone przy różnej zasadowości roztworu nasycającego. KMnO ₄ wmywano wodą. Zdjęcia były zaciemnione, ponieważ KMnO ₄ reaguje z bibulą.
28	SO ₂	K ₂ Cr ₂ O ₇ + + KOH	$3 \text{SO}_2 + 2 \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + 2 \text{KOH} =$ $= \text{Cr}(\text{OH})_3 + 3 \text{K}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	niewyraźny	trwały	Doświadczenia wykonano przy różnej zasadowości roztworu nasycającego. K ₂ Cr ₂ O ₇ wmywano wodą. Podczas wmywania rozpuszczał się również Cr(OH) ₃ .
29	SO ₂	NaVO ₃	$\text{SO}_2 + 2 \text{NaVO}_3 = \text{V}_2\text{O}_5 + \text{Na}_2\text{SO}_3$	—	—	Reakcja nie zachodzi na bibule.
30	SO ₂	K ₃ [Fe(CN) ₆] + KOH	$3 \text{SO}_2 + 14 \text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 12 \text{KOH} =$ $= 2 \text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3 + 3 \text{K}_2\text{SO}_4 + 48 \text{KCN} +$ $+ 6 \text{H}_2\text{O}$	—	—	Doświadczenia przeprowadzone przy różnej zasadowości roztworu nasycającego. Reakcja nie zachodzi na bibule.
31	SO ₂	K ₃ [Fe(CN) ₆] + KOH	$3 \text{SO}_2 + 10 \text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 12 \text{KOH} =$ $= 2 \text{Fe}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2 + 3 \text{K}_2\text{SO}_4 + 36 \text{KCN} +$ $+ 6 \text{H}_2\text{O}$	—	—	Doświadczenia przeprowadzone przy różnej zasadowości roztworu nasycającego. Reakcja nie zachodzi na bibule.

Nr	Reagent w strumieniu powietrza	Reagent w roztworze nasycającym bibułę	Równanie reakcji chemicznej	Charakterystyka obrazu	Trwałość obrazu	U w a g i
32	SO ₂	KJO ₃ + + (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	$3 \text{SO}_2 + 2 \text{KJO}_3 + (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n + \text{H}_2\text{O} =$ $= \text{J}_2 \cdot (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n + \text{K}_2\text{SO}_4 + 4 \text{H}_2\text{SO}_4$	bardzo niewyraźny, siarnisty	trwały	Wykonano szereg prób polepszenia jakości zdjęć przez dodatek różnych soli do roztworu używanego do nasycania bibuły. Próby te zakończyły się niepowodzeniem.
33	Cl ₂	NaPb(OH) ₃ + NaOH	$\text{Cl}_2 + \text{NaPb}(\text{OH})_3 + \text{NaOH} =$ $= \text{PbO}_2 + 2 \text{NaCl} + 2 \text{H}_2\text{O}$	bardzo niewyraźny	trwały	Bibuła kurczyła się pod działaniem roztworu nasycającego.
34	Cl ₂	KJ	$\text{Cl}_2 + 3 \text{KJ} = \text{KJ}_3 + 2 \text{KCl}$	bardzo wyraźny	nietrzymały	Doświadczenia wykonano z absorbentem wilgotnym oraz wysuszonym. Zdjęcia stopniowo ciemnieją, ponieważ KJ utlenia się pod działaniem tlenu z powietrza.
35	J ₂	KJ	$\text{J}_2 + \text{KJ} = \text{KJ}_3$			
36	Cl ₂	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + CdJ ₂	$\text{Cl}_2 + (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n + \text{CdJ}_2 =$ $= \text{J}_2 \cdot (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n + \text{CdCl}_2$	bardzo wyraźny	trwały	Zdjęcia są bardzo trwałe w atmosferze o umiarkowanej wilgotności. Zdjęcia ciemnieją przy bardzo dużej wilgotności powietrza i jednoczesnym naświetlaniu. Jeżeli absorbent jest suchy, kompleks jodo-skrobiowy nie powstaje.
37	J ₂	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + CdJ ₂	$\text{J}_2 + (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n + \text{CdJ}_2 =$ $= \text{J}_2 \cdot (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n + \text{CdJ}_2$			

Nr	Reagent w strumieniu powietrza	Reagent w roztworze nasycającym bibułę	Równanie reakcji chemicznej	Charakterystyka obrazu	Trwałość obrazu	U w a g i
38	J ₂	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + CdJ ₂ + KNO ₃	J ₂ + (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + CdJ ₂ + KNO ₃ = J ₂ ·(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + CdJ ₂ + KNO ₃ + KNO ₃	bardzo wyraźny	trwały	Wykonano próby zmniejszenia szybkości wysychania absorbentu w czasie doświadczenia przez dodatek różnych soli do roztworu używanego do nasycaenia bibuły. Stwierdzono, że dodatek KNO ₃ nie wpływa niekorzystnie na jakość zdjęć. Zdjęcia ciemnieją przy wyższych wilgotnościach powietrza i jednocześnie naswietleniu.
39	J ₂	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	J ₂ + (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n = J ₂ ·(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	bardzo ziarnisty, niewyraźny	trwały	
40	O ₃	CdJ ₂ + (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	O ₃ + CdJ ₂ + (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + H ₂ O = = J ₂ ·(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + Cd(OH) ₂ + O ₂	niewyraźny	trwały	
41	J ₂	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + ZnJ ₂	J ₂ + (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + ZnJ ₂ = = J ₂ ·(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + ZnJ ₂	bardzo wyraźny	nie trważy	
42	J ₂	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + CdCl ₂	J ₂ + (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + CdCl ₂ = = J ₂ ·(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + CdCl ₂	bardzo ziarnisty, niewyraźny	bardzo nie trważy	
43	J ₂	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + ZnCl ₂	J ₂ + (C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + ZnCl ₂ = J ₂ ·(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n + ZnCl ₂	bardzo ziarnisty, niewyraźny	bardzo nie trważy	

Na podstawie przeprowadzonych badań oceniono reakcje 19. i 37. jako najlepsze do badania procesów wnikania masy. Poniżej zestawiono charakterystyczne cechy tych reakcji.



Zdjęcia są bardzo trwałe.

Zdjęcia są trwałe przy umiarkowanej wilgotności powietrza. Zdjęcia ciemnieją przy bardzo dużej wilgotności powietrza i jednoczesnym naświetlaniu.

Zdjęcia należy "wywoływać" przez wymywanie wodą azotanu kobaltowego.

Zdjęcia nie wymagają "wywoływania".

Dobór tworzywa odpornego na działanie amoniaku nie następuje z trudności.

Z łatwo dostępnych tworzyw tylko szkło i twarde polichlorek winylu są odporne na działanie par jodu w wilgotnej atmosferze.

Ilość amoniaku, która wywołuje zaciemnienie absorbentu /bibuły nasyconej wodnym roztworem azotanu kobaltowego/ jest na tyle duża, że prowadzenie doświadczeń ilościowych nie powinno następczać trudności.

Bardzo mała ilość jodu wywołuje zaciemnienie absorbentu /bibuły nasyconej wodnym roztworem skrobi i jodku kadmowego/. Wobec dużej aktywności chemicznej jodu, prowadzenie doświadczeń ilościowych może być utrudnione.

	Nasywanie powietrza jodem jest bardzo dogodną metodą dozowania jodu.
Prężność pary wodnej nad stężonymi roztworami azotanu kobaltowego jest zbliżona do wilgotności powietrza atmosferycznego. Stosując jako płyn modelowy powietrze atmosferyczne wysychanie absorbentu podczas doświadczenia będzie nieznaczne.	Kompleks jodoskrobiowy nie powstaje, jeżeli absorbent jest suchy. Ponieważ prężność pary wodnej nawet nad stężonymi roztworami jodku kadmowego jest dość wysoka, należy wydatnie nawilżać powietrze, aby zapobiec wysychaniu absorbentu.
	Pomyślne próby wykorzystania reakcji jodu ze skrobią w ilościowej analizie chemicznej $81 \div 86$ wskazują, że nieślusny jest pogląd jakoby reakcja ta była niepewna.

Opierając się na przeprowadzonym porównaniu jako reakcję modelową do badania procesów wnikania masy wybraną reakcję par jodu z absorbentem będącym bibułą nasyconą wodnym roztworem skrobi i jodku kadmowego. O wyborze zdecydował fakt, że zdjęcia uzyskiwane z pomocą wybranej reakcji są bardziej wyraźne i kontrastowe, co pozwala sądzić, że reakcja ta jest szybsza.

2.2. Opis aparatury

Opisania niżej aparatura służyła do wytworzenia strumienia powietrza o założonej temperaturze i wilgotności oraz ściśle określonym stężeniu par jodu. Strumień powietrza z parami jodu

otrzymywano przez połączenie dwóch strumieni:

1. Głównego strumienia powietrza, który nie zawierał par jodu.

2. Boczego strumienia powietrza nasyconego jodem.

Schemat aparatury z opisem poszczególnych elementów przedstawiono na rysunku 3.

Strumień główny wytwarzano za pomocą sprężarki wirnikowej /3/. Powietrze zasysane z atmosfery przez zawór /1/ i filtr /2/ przepływało przez filtr /4/ i nawilżacz /5/ Rys.4.

Następnie powietrze przepływało przez rurę z twardego polichlorku winylu, w której była umieszczona siateczka wyrównawcza /9/, zwężka pomiarowa /10/ i mieszalnik /11/.

Natężenie przepływu i temperaturę głównego strumienia powietrza ustalano za pomocą zaworu /1/ i autotransformatora /21/.

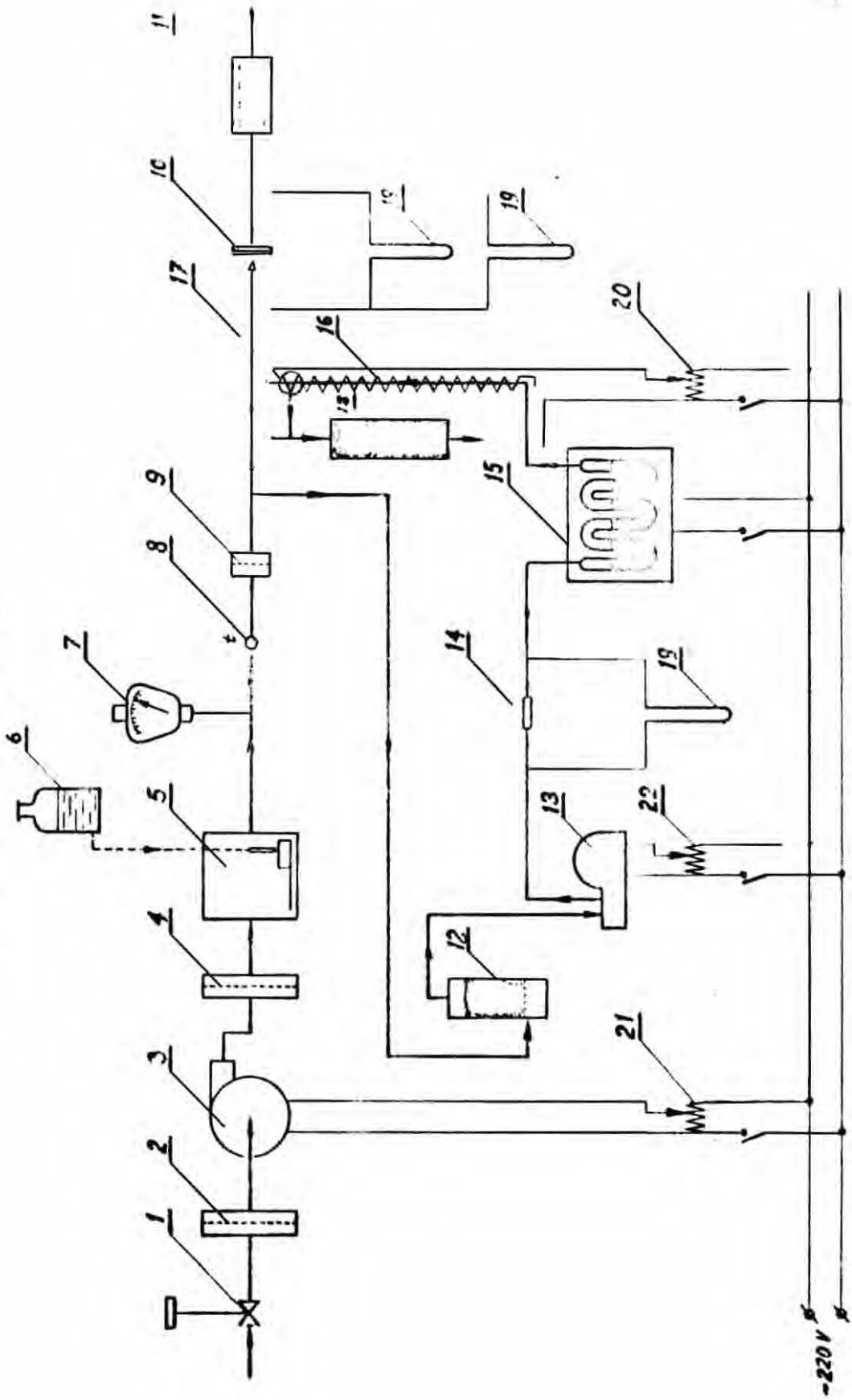
Za pomocą pompki membranowej /13/ pobierano ze strumienia głównego niewielką ilość powietrza - strumień boczny. Po przejściu przez absorber wypełniony chlorkiem wapniowym /12/ powietrze to przepływało przez kapilarę pomiarową /14/ i umieszczoną w ultratermostacie kolumnę z jodem /15/. Za pomocą kurka trójdrożnego /17/ powietrze nasycone jodem kierowano do strumienia głównego lub do absorbera par jodu /18/.

Ilość jodu wprowadzonego do strumienia głównego regulowano przez zmianę natężenia bocznego strumienia powietrza, temperatura kolumny z jodem była stała.

Do aparatury przyłączano badane modele. Opuszczające model powietrze z parami jodu kierowano do wyciągu lub do absorbera par jodu przedstawionego schematycznie na rysunku 5.

Elementy aparatury narażone na działanie jodu wykonano z twardego polichlorku winylu lub ze szkła. W niektórych miejscach dla uzyskania szczelności użyto gumę, jednak w taki sposób, aby dostęp par jodu do tych miejsc był utrudniony.

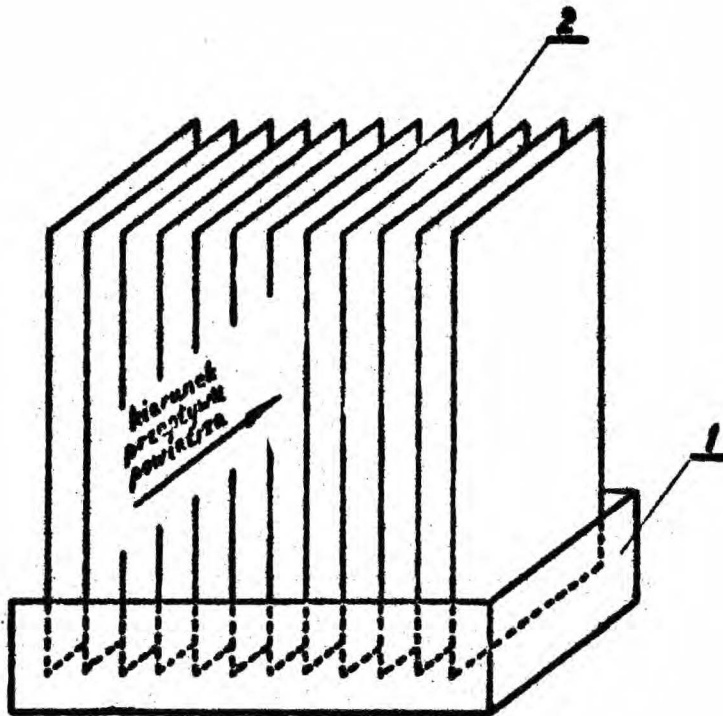
Rys. 3. Schemat aparatury



Objaśnienia do schematu aparatury

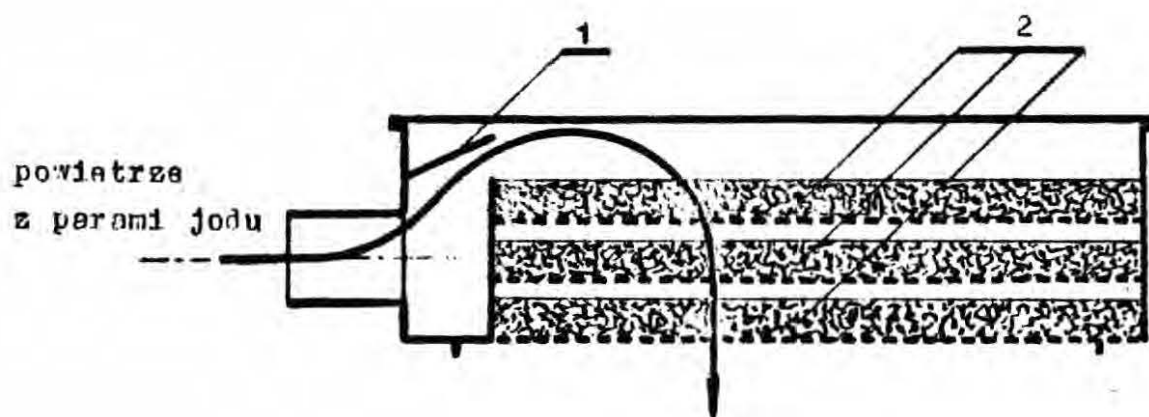
1. Regulator natężenia przepływu powietrza.
2. Filtr powietrza - płat gumy piankowej o grubości 10 mm.
3. Sprężarka wirnikowa; wydajność powietrza $20 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$,
maksymalne ciśnienie sprężania $9 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$.
4. Filtr powietrza - płat gumy piankowej o grubości 5 mm.
5. Nawilżacz powietrza. Schemat nawilżacza przedstawiono na rysunku 4.
6. Butla z wodą.
7. Higrometr włosowy.
8. Termometr kontrolny; dokładność - 0,5 deg.
9. Siateczka wyrównawcza.
10. Zwężka pomiarowa.
11. Mieszalnik.
12. Absorber pary wodnej; wypełnienie - chlorek wapniowy.
13. Pompka membranowa.
14. Kapilara pomiarowa.
15. Kolumna z jodem umieszczona w ultratermostacie.
16. Uzwojenie grzejne zapobiegające kondensacji par jodu.
17. Kurek trójdrożny.
18. Absorber par jodu; wypełnienie - guma piankowa.
19. Manometry cieczowe.
- 20 - 22. Autotransformatory.

Rys. 4. Schemat nawilzacza



- 1 - naczynie z wodą. Stały poziom wody utrzymywano za pomocą urządzenia regulacyjnego z pływakiem.
- 2 - elementy porowate, zwilżane wodą na zasadzie włoskowości - płyty płótna filtracyjnego dynel

Rys. 5. Absorber par jodu

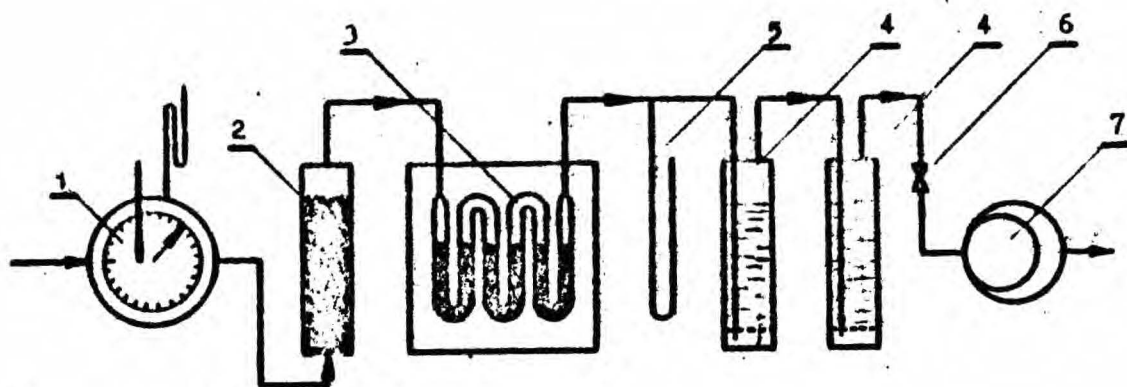


- 1 - zawór zwrotny - płytka umocowana na zawiasie, podnoszona do góry przez strumień powietrza
- 2 - wypełnienie absorbera - płyty gumy piankowej umieszczone na perforowanych płytach

2.3. Badanie zależności stężenia par jodu w powietrzu od natężenia przepływu powietrza przez kolumnę z jodem.

W opisaney wyżej aparaturze pary jodu dozowano przez nasycanie powietrza jodem. Schemat układu do pomiaru stężenia par jodu w powietrzu przepływającym przez kolumnę z jodem przedstawiono na rysunku 6. Kolumnę z jodem umieszczono w ultratermostacie o temperaturze 298,2 stopnia Kelvina. Całkowita wysokość warstwy jodu wynosiła około 500 milimetrów, a średnica 20 milimetrów. Pary jodu zawarte w strumieniu powietrza absorbowano w 10-procentowym wodnym roztworze jodku potasowego. Ilość zaabsorbowanego jodu określano przez miareczkowanie 0,1-normalnym roztworem tiosiarczanu sodowego.

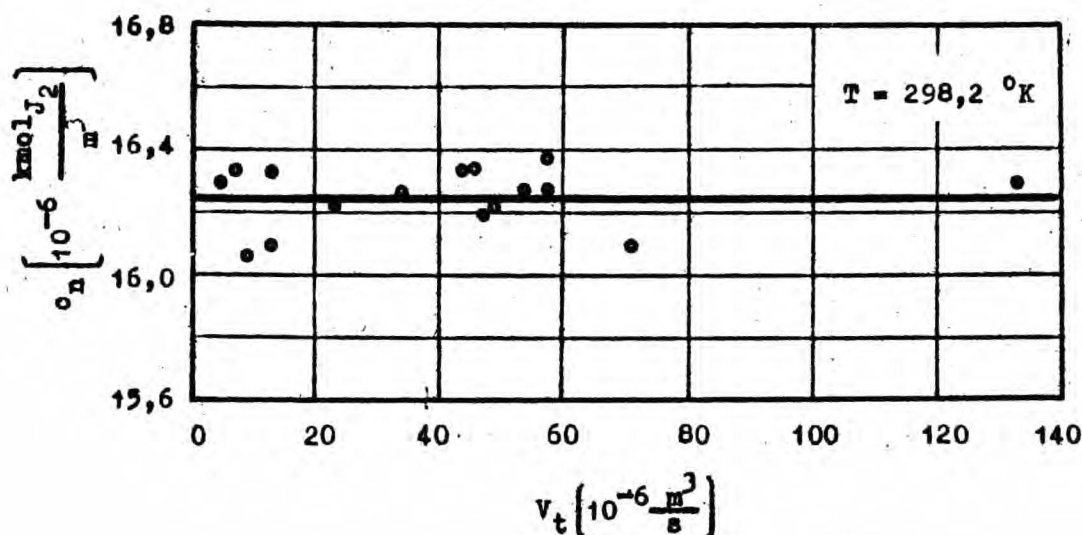
Rys. 6. Schemat aparatury do pomiaru stężenia par jodu w powietrzu przepływającym przez kolumnę z jodem.



- 1 - gazomierz
- 2 - absorber pary wodnej; wypełnienie-chlorek wapniowy
- 3 - kolumna z jodem umieszczona w ultratermostacie
- 4 - płuczki z 10-procentowym roztworem jodku potasowego
- 5 - manometr
- 6 - zawór iglicowy
- 7 - pompa rotacyjna olejowa

Zbadano zależność stężenia par jodu w powietrzu od natężenia przepływu powietrza przez kolumnę z jodem. Wyniki pomiarów zamieszczone w tablicy 2. oraz przedstawione na rysunku 7. wskazują, że w warunkach doświadczenia powietrze zostaje nasycone jodem. Uzyskana wartość stężenia par jodu w powietrzu jest zgodna z wynikami Garry'a ^{3/} w granicach błędu doświadczenia.

Rys. 7. Zależność stężenia par jodu w powietrzu od natężenia przepływu powietrza przez kolumnę z jodem.



W oparciu o równanie Clausiusa-Clapeyrona obliczono względną zmianę stężenia par jodu w powietrzu opuszczającym kolumnę z jodem przy zmianach temperatury kolumny i uzyskano:

$$\frac{1}{c_n} \frac{dc_n}{dT} = 0,084 \text{ deg}^{-1} .$$

Wykonane obliczenie wskazuje, że termostatowanie kolumny z jodem z dokładnością do 0,1 stopnia Kelvina, co można uzyskać za pomocą laboratoryjnych ultratermostatów, zapewnia wystarczającą stałość stężenia par jodu w strumieniu powietrza.

Tablica 2.

Zależność stężenia par jodu w powietrzu od natężenia przepływu powietrza przez kolumnę z jodem

Nr dośw.	$v_t \cdot 10^6$ $\frac{m^3}{s}$	$c_n \cdot 10^6$ $\frac{kmol}{m^3}$
1	4,8	16,30
2	6,8	16,33
3	9,0	16,06
4	10,2	16,23
5	12,6	16,09
6	13,2	16,33
7	23,0	16,22
8	34,4	16,26
9	45,1	16,24
10	45,1	16,24
11	45,9	16,34
12	47,2	16,19
13	48,7	16,21
14	53,6	16,27
15	57,2	16,37
16	57,2	16,27
17	71,0	16,09
18	106,4	16,25
19	133,0	16,29
śred.	-	16,24

2.4. Sposób przygotowania absorbentu

Przy wyższych stężeniach skrobi i jodku kadmowego w roztworze, którym nasycona jest bibuła, można spodziewać się, że stężenie par jodu przy powierzchni absorbentu w czasie doświadczenia będzie niewielkie.

Bibuła nasycona roztworem o bardzo dużym stężeniu jodku kadmowego żółkła po pewnym czasie. Przyczyną pojawiania się żółtego zabarwienia była prawdopodobnie rekrytalizacja jodku kadmowego przy udziale wilgoci z powietrza.

Roztwory o bardzo dużej zawartości skrobi tworzą galaretę i nie nadają się do nasycania bibuły.

W doświadczeniach wstępnych ustalono następujący skład roztworu skrobi i jodku kadmowego stosowanego do nasycania bibuły:

skrobia rozpuszczalna cz.d.a.	- 50 g ,
jodek kadmowy cz.d.a.	- 250 g ,
woda destylowana	- 1000 g .

Do wrzącego ^{roztworu/} jodku kadmowego dodawano mieszaninę skrobi i wody. Roztwór utrzymywano w stanie wrzenia około 60 sekund.

Roztwór skrobi i jodku kadmowego przechowywano w butli z ciemnego szkła.

Absorbent przygotowywano bezpośrednio przed doświadczeniem w następujący sposób:

Pasek bibuły chromatograficznej "Whatman 2" nasycono przez 10 sekund roztworem skrobi i jodku kadmowego. Następnie pasek osuszano przez 10 sekund między dwoma potrójnymi arkuszami bibuły filtracyjnej i potem jeszcze przez 5 sekund między drugą parą arkuszy bibuły. Otrzymany absorbent umieszczano na powierzchni badanego modelu.

2.5. Wstępne badania reakcji modelowej

Ilość jodu wywołująca wyraźne zaciemnienie absorbentu jest tak mała, że zmierzenie jej klasycznymi metodami analizy chemicznej jest praktycznie niemożliwe. Jest to przyczyną dużych trudności w badaniach wybranej reakcji modelowej. Część badań przeprowadzono w sposób jakościowy, niektóre pomiary wykonano z pomocą izotopu promieniotwórczego ^{131}J .

W następujący prosty sposób stwierdzono, że stężenie par jodu nad powierzchnią zdjęcia, nawet stosunkowo intensywnie zaciemnionego, jest znikomo małe w porównaniu, ze stężeniem stosowanym w strumieniu powietrza.

Na płytce szklanej umieszczono wilgotne zdjęcie jodoskrobiowe, na nim pierścień z twardego polichlorku winylu o wysokości 1 milimetra, arkusik absorbentu i drugą płytkę szklaną. Po 24 godzinach nie stwierdzono pojawienia się zaciemnienia na powierzchni absorbentu, co wskazuje, że nie nastąpiło zjawisko desorpcji jodu z powierzchni zdjęcia i absorpcji na powierzchni absorbentu. Uzyskany rezultat pozwala sądzić, że stężenie par jodu przy powierzchni wilgotnego zdjęcia jest praktycznie równe zeru. Wynik taki łatwo wyjaśnić biorąc pod uwagę fakt, że zdjęcia jodoskrobiowe są trwałe.

W badaniach wstępnych stwierdzono, że, przy założonym czasie doświadczenia równym 120 sekund, uzyskuje się zdjęcia o średnim stopniu zaciemnienia, jeżeli stężenie par jodu w strumieniu powietrza wynosi około $20 \cdot 10^{-9}$ kilomola na metr sześcienny. Zmierzenie tak małego stężenia w krótkim czasie jest praktycznie niewykonalne. Określenie stężenia par jodu w strumieniu powietrza w oparciu o pomiar ilości jodu wprowa-

dzanego do strumienia może być obarczone dużym błędem na skutek sorpcji i desorpcji par jodu na ściankach aparatury oraz wskutek reagowania jodu z zanieczyszczeniami zawartymi w powietrzu.

Błąd doświadczenia spowodowany procesami sorpcji i desorpcji jodu na ściankach aparatury można zmniejszyć przez zmniejszenie powierzchni ścian aparatury oraz przez właściwy dobór tworzywa konstrukcyjnego. Jod w obecności wilgoci powoduje korozję wszystkich łatwo dostępnych metali i stopów konstrukcyjnych oraz rozpuszcza się w wielu tworzywach sztucznych takich jak polimetakrylany, polistyren, polietylen, zmiękczone polichlorek winylu, bakelit, żywice epoksydowe, guma. Z łatwo dostępnych tworzyw tylko szkło i twardy polichlorek winylu są odporne na działanie par jodu w wilgotnej atmosferze.

W celu zbadania wpływu sorpcji i desorpcji jodu na przebieg doświadczenia wykonano odpowiednie pomiary dla rury szklanej o średnicy wewnętrznej 39,8 milimetra i długości 1420 milimetrów oraz dla rury z twardego polichloroku winylu o średnicy wewnętrznej 36,7 milimetra i długości 1310 milimetrów. Doświadczenia wykonano przy pomocy aparatury opisanej w punkcie 22. Objętościowe natężenie przepływu powietrza wynosiło w tych pomiarach $6,05 \cdot 10^{-3}$ metra sześciennego na sekundę, a stężenie par jodu w strumieniu powietrza $20 \cdot 10^{-9}$ kilomola na metr sześcienny.

Przed przystąpieniem do zasadniczej części doświadczenia w ciągu kilku godzin przepuszczano przez rurę powietrze zawierające pary jodu w celu nasycenia powierzchni rury jodem. Właściwa część doświadczenia polegała na 100-krotnym powtórzeniu poniższych czynności w następującej kolejności:

1. Przez 120 sekund przepuszczano przez rurę powietrze zawierające pary jodu - jod mógł sorbować się na ściankach rury.

2. W celu usunięcia z rury powietrza zawierającego pary jodu przez 10 sekund przepuszczano przez rurę powietrze, które nie zawierało par jodu. Następnie do badanej rury przyłączano krótką rurkę wyłożoną absorbentem i przez ten zestaw przepuszczano powietrze jeszcze przez 20 sekund - jod mógł desorbować z powierzchni badanej rury i absorbować się na powierzchni absorbentu.

Zarówno w przypadku rury szklanej jak i z twardego polichlorku winylu nie stwierdzono pojawiania się zaciemnienia na powierzchni absorbentu. Wynik taki wskazuje, że procesy sorpcji i desorpcji jodu na ściankach układu nie powinny wpływać na wynik doświadczenia.

Dalszym źródłem błędu doświadczenia może być reagowanie par jodu z zanieczyszczeniami zawartymi w powietrzu. Zanieczyszczenie powietrza zmienia się w bardzo szerokim zakresie zarówno co do ilości jak i składu. Usunięcie zanieczyszczeń stałych i ewentualnie ciekłych nie jest trudne, natomiast oczyszczenie powietrza od domieszek gazowych jest praktycznie niemożliwe.

Wpływ zanieczyszczenia powietrza na przebieg doświadczenia można zbadać przez wielokrotne powtórzenie pomiaru w takich samych warunkach. Jeżeli rezultaty będą zawsze jednakowe w granicach błędu pomiaru, będzie to dowodem, że zanieczyszczenie powietrza nie wpływa na wynik doświadczenia.

2.6. Badania ilościowe reakcji modelowej

2.6.1. Sposób prowadzenia doświadczeń

Przeprowadzone badania reakcji modelowej miały na celu określenie warunków, które muszą być spełnione, aby uzyskać wzajemnie jednoznaczną zależność między współczynnikiem odbicia światła otrzymywanych zdjęć jodoskrobiowych i ilością jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu. Zbadano wpływ różnych parametrów doświadczenia na wartość współczynnika odbicia światła uzyskiwanych dla zdjęć jodoskrobiowych. W poszczególnych seriach doświadczeń zmieniano jeden z parametrów charakteryzujących pomiar, inne pozostawały stałe.

Badania ilościowe reakcji modelowej przeprowadzono z pomocą aparatury opisanej w punkcie 2.2. Doświadczenia wykonano w rurze szklanej o średnicy wewnętrznej 29,2 milimetra i długości 1050 milimetrów. Pasek absorbentu o wymiarach 90 x 110 milimetra umieszczano w rurze w taki sposób, aby dokładnie przylegał do ścianki, a koniec paska znajdował się w odległości około 10 milimetrów od wylotu rury. W niektórych doświadczeniach pasek absorbentu przyklejano do ścianki za pomocą kolodium.

Po umieszczeniu w rurze absorbentu włączano przepływ głównego strumienia powietrza oraz przepływ powietrza przez kolumnę z jodem umieszczoną w ultratermostacie o temperaturze 298,2 stopnia Kelvina. Początkowo pary jodu kierowano do absorbera /18 Rys.3. / /rysunek zamieszczono poprzednio/. W tym czasie za pomocą zaworu /1/ i autotransformatora /21/ ustalano natężenie i temperaturę głównego strumienia powietrza. We wszystkich doświadczeniach temperatura strumienia głównego wynosiła 293 stopnie Kelvina, a wilgotność względna około 95 procent. Za po-

mocą autotransformatora /22/ regulowano natężenie przepływu powietrza przez kolumnę z jodem, tak aby, po połączeniu tego strumienia ze strumieniem głównym, stężenie par jodu w strumieniu przed zwężką wynosiło $20 \cdot 10^{-9}$ kilomola na metr sześcienny.

Po 60 sekundach od momentu włączania przepływu strumieni powietrza, za pomocą kurka trójdrożnego /17/ kierowano pary jodu do strumienia głównego. Od tego momentu liczono czas doświadczenia, który wynosił 120 sekund.

Następnie wyłączano przepływ powietrza przez kolumnę z jodem, natomiast przepływ strumienia głównego utrzymywano jeszcze przez 30 sekund w celu usunięcia z układu powietrza zawierającego pary jodu.

Bezpośrednio po wykonaniu zdjęcie suszono w temperaturze $303 \div 308$ stopni Kelvina. W celu przyspieszenia suszenia w suszarce umieszczano wentylatorkę "Zefir". Zdjęcie wysychało po 200 sekundach, ale pozostawało w suszarce około 600 sekund.

Zdjęcia przechowywano w atmosferze o obniżonej wilgotności.

Współczynnik odbicia światła otrzymanych zdjęć jodoskrobiowych określano po jednej dobie od momentu uzyskania zdjęć.

Pomiary wykonywano za pomocą leukometru firmy Zeiss. Stosowano światło białe. Powierzchnia fotometrowana miała kształt krążka o średnicy 36 milimetrów. Ponieważ współczynnik odbicia światła dla uzyskiwanych zdjęć jodoskrobiowych zmieniał się znacznie w pobliżu przedniej krawędzi zdjęcia, pomiar współczynnika odbicia światła wykonywano w odległości 80 milimetrów od tej krawędzi.

2.6.2. Badanie trwałości zdjęć jodoskrobiowych

Trwałość zdjęć jodoskrobiowych określono przeprowadzając wielokrotnie pomiary ich współczynnika odbicia światła. Doświadczenia wykonano sposobem opisanym w poprzednim punkcie, zmieniając jednocześnie czas doświadczenia i stężenia par jodu w strumieniu powietrza, tak aby uzyskać zdjęcia o bardzo różnym stopniu zaciemnienia. Grupę zdjęć A przechowywano w atmosferze o obniżonej wilgotności, grupę B - w atmosferze o normalnej wilgotności.

Wyniki pomiarów umieszczono w tablicy 3. Na rysunku 8. przedstawiono zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych grupy A od czasu ich przechowywania.

Zdjęcia oznaczone numerem 1. nie były poddane działaniu par jodu. Ilości jodu zaabsorbowanego na zdjęciach numer 9. były bardzo duże, a wartości współczynnika odbicia światła są dla nich minimalne.

Przeprowadzone badania wykazały, że uzyskiwane zdjęcia jodoskrobiowe są bardzo trwałe. Zmiany współczynnika odbicia światła w czasie są tak małe, że zdjęcia te mogą być wykorzystywane do ilościowych odczytów w okresie kilku miesięcy od momentu ich wykonania. Zmiany współczynnika odbicia światła dla zdjęć przechowywanych w atmosferze o normalnej wilgotności są nieco większe niż dla zdjęć przechowywanych w atmosferze o obniżonej wilgotności, lecz również bardzo nieznaczne.

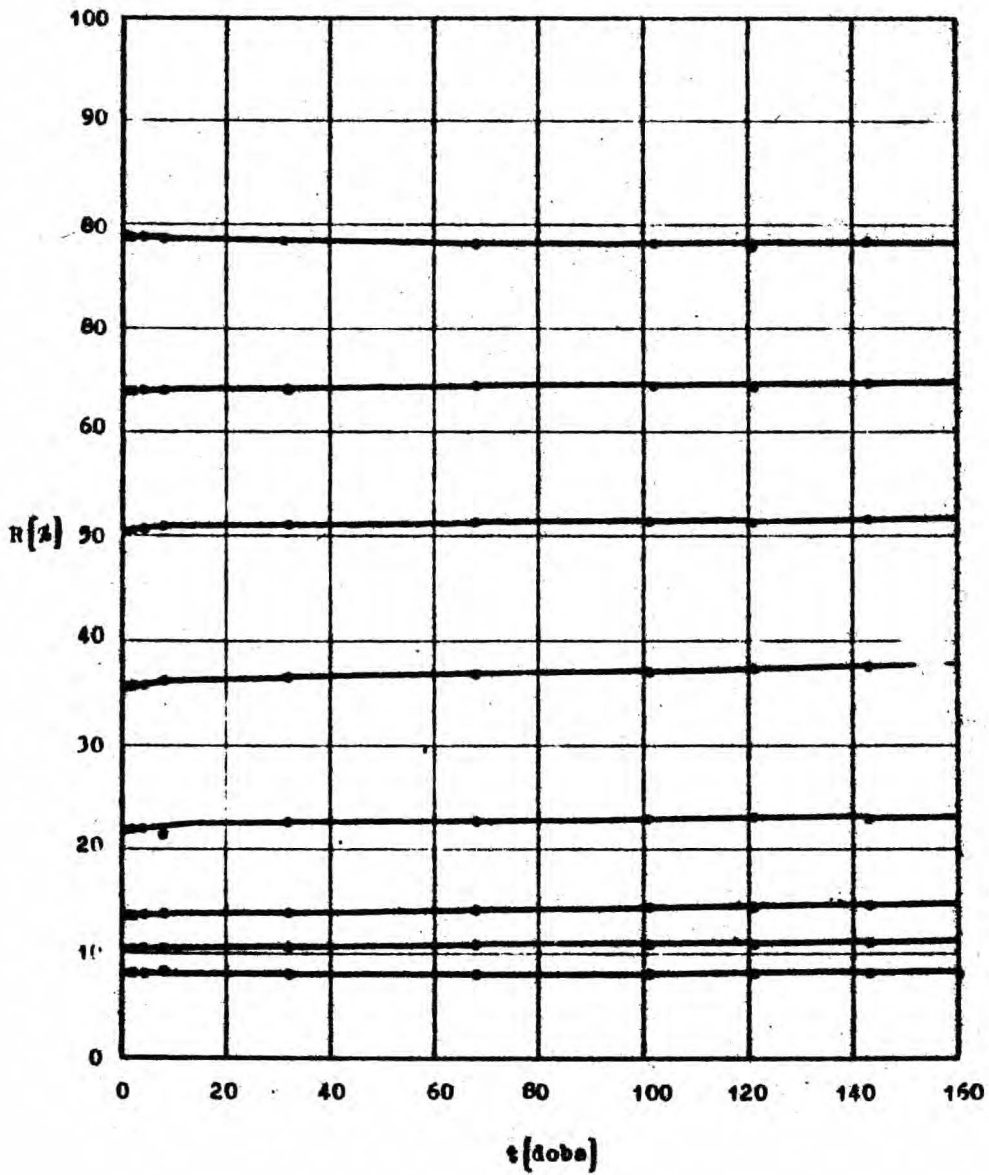
Tablica 3.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od czasu przechowywania zdjęć

Współczynnik odbicia światła wyrażony jest w procentach.

Grupa zdjęć	Nr	czas przechowywania zdjęć (doba)								
		0	1	2	4	8	32	68	102	143
A	1	78,8	78,8	78,8	78,7	78,7	78,4	78,3	78,3	78,3
	2	72,5	72,8	72,7	72,7	72,9	72,5	72,7	72,7	73,0
	3	63,7	63,9	64,0	64,0	64,1	64,1	64,4	64,4	64,7
	4	50,4	50,6	50,7	50,7	50,9	51,0	51,5	51,5	51,6
	5	35,5	35,7	35,7	35,7	36,1	36,5	37,0	37,2	37,5
	6	21,9	22,1	22,1	22,1	21,4	22,6	22,8	23,0	23,1
	7	13,6	13,7	13,8	13,8	13,9	14,1	14,3	14,4	14,6
	8	10,3	10,3	10,5	10,5	10,6	10,7	10,9	10,9	11,0
	9	8,1	8,2	8,3	8,3	8,4	8,5	8,5	8,6	8,7
B	1	79,0	79,0	79,0	78,9	78,8	78,6	78,6	78,5	78,6
	2	73,5	73,5	73,5	73,4	73,4	73,4	73,6	73,7	74,0
	3	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,3	65,8	66,0	66,0
	4	49,9	50,0	49,9	50,0	50,2	50,9	51,8	52,3	52,9
	5	34,8	35,0	34,8	35,0	35,1	35,7	36,2	36,7	37,1
	6	22,2	22,3	22,3	22,4	23,6	23,3	24,0	24,5	25,0
	7	14,1	14,2	14,3	14,4	14,5	15,0	15,5	15,8	16,1
	8	9,9	10,0	10,0	10,1	10,1	10,3	10,6	10,7	10,8
	9	8,1	8,2	8,2	8,2	8,3	8,5	8,6	8,7	8,8

Rys. 8. Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od czasu przechowywania zdjęć
grupa zdjęć - A



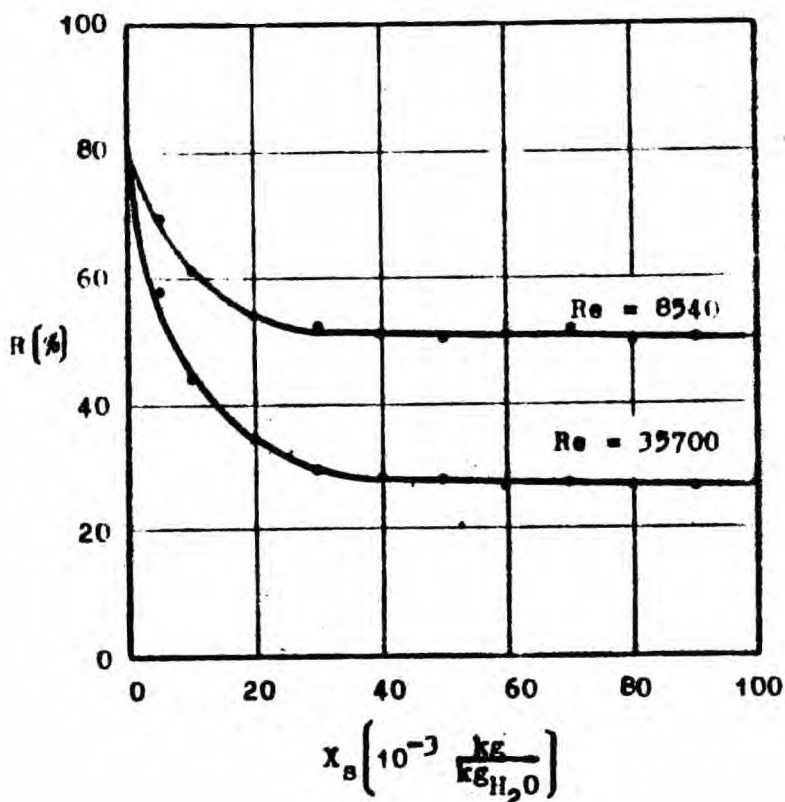
2.6.3. Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od składu roztworu użytego do nasycania bibuły.

W pomiarach stosowano roztwory do nasycania bibuły o innym składzie niż ustalony w doświadczeniach wstępnych skład roztworu wzorcowego.

W poszczególnych seriach doświadczeń zmieniano stężenie jednego ze składników roztworu, stężenie drugiego było takie jak w roztworze wzorcowym.

Doświadczenia wykonano w sposób opisany w punkcie 2.6.1. dla dwóch wartości objętościowego natężenia przepływu powietrza. Wyniki pomiarów umieszczono w tablicach 4. i 5. oraz przedstawiono na rysunkach 9. i 10.

Rys.9. Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od stężenia skrobi w roztworze użytym do nasycania bibuły.



Tablica 4.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od stężenia skrobi w roztworze użytym do nasycania bibuły

Warunki pomiaru:

$$x_{\text{CdJ}_2} = 250 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}} ,$$

$$b = 100,9 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} ,$$

$$V_{t1} = 3,01 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} , \quad V_{t2} = 12,58 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} ,$$

$$\text{Re}_1 = 8540 ,$$

$$\text{Re}_2 = 35700 .$$

Nr	$x_s \cdot 10^3$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}$	R_1 %	R_2 %
1	0	79,1	79,0
2	5	69,5	57,6
3	10	61,2	44,0
4	20	54,1	34,5
5	30	52,3	29,4
6	40	51,4	28,2
7	50	50,6	27,7
8	60	50,8	26,8
9	70	51,6	27,3
10	80	49,9	26,9
11	90	50,8	26,5
12	100	50,7	27,0

Tablica 5

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od stężenia jodku kadmowego w roztworze użytym do nasycania bibuły

Warunki pomiaru:

$$x_s = 50 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{kg H}_2\text{O}} ,$$

$$b = 100,9 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} ,$$

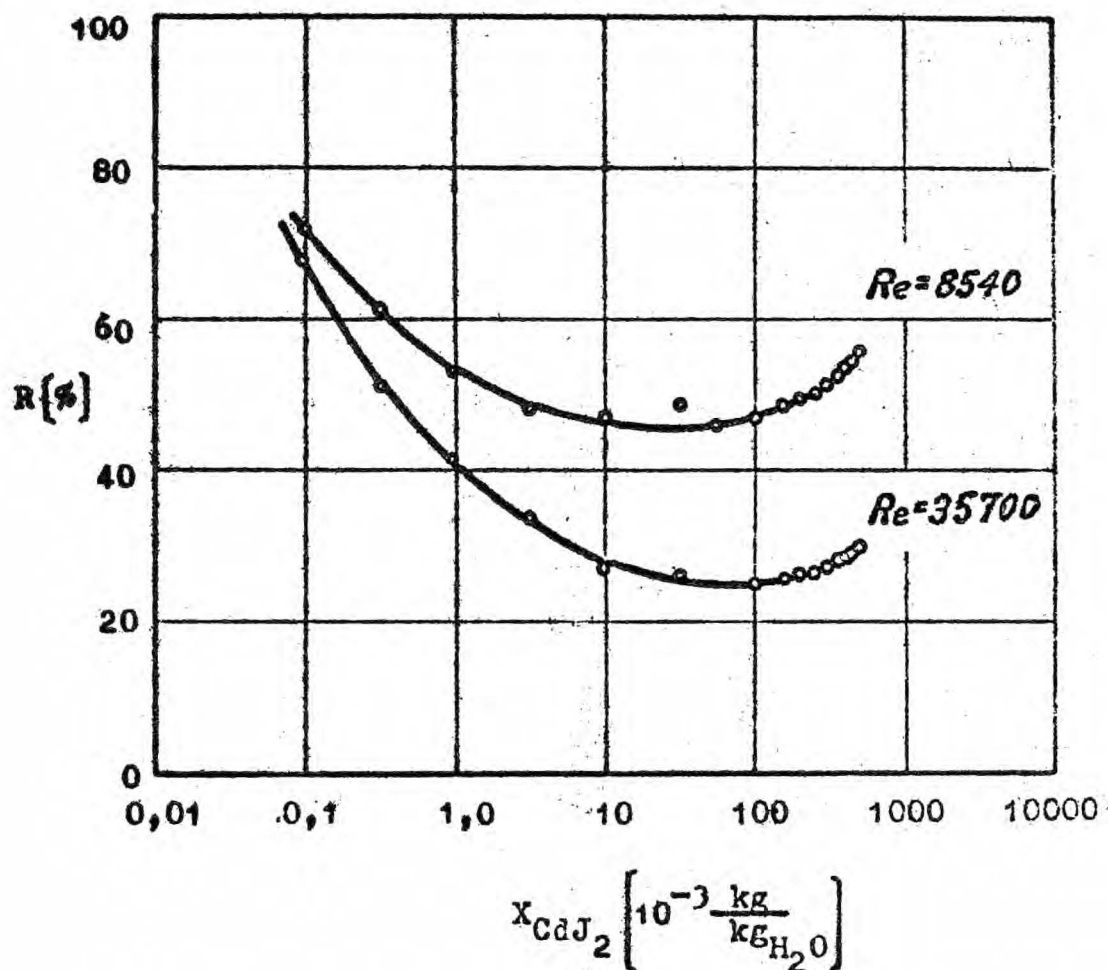
$$V_{t1} = 3,01 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} , \quad V_{t2} = 12,58 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} ,$$

$$Re_1 = 8540 ,$$

$$Re_2 = 35700 .$$

Nr	$x_{\text{CdJ}} \cdot 10^3$ $\frac{\text{kg}}{\text{kg H}_2\text{O}}$	R_1 %	R_2 %
1	0	76,9	75,8
2	0,1	72,2	68,1
3	0,3	61,7	51,2
4	1,0	53,0	41,2
5	3,0	48,4	34,0
6	10,0	47,5	27,3
7	30,0	49,0	26,2
8	100	47,3	25,4
9	150	48,7	25,6
10	200	49,7	26,2
11	250	50,6	26,7
12	300	51,5	27,6
13	350	52,9	28,1
14	400	53,7	28,5
15	450	54,7	28,9
16	500	55,6	29,9

Rys. 10. Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od stężenia jodku kadmowego w roztworze użytym do nasycania bibuły.



Przeprowadzone badania wykazały, że przy niskim stężeniu skrobi w roztworze użytym do nasycania bibuły współczynnik odbicia światła uzyskiwanych zdjęć jest stosunkowo wysoki. Jeżeli stężenie skrobi w roztworze jest zbliżone do stężenia w roztworze wzorcowym, współczynnik odbicia światła praktycznie nie zależy od stężenia skrobi w roztworze.

Reakcja tworzenia kompleksu jodoskrobiowego praktycznie nie zachodzi na bibule nasyconej roztworem nie zawierającym jodku kadmowego. Jednak już bardzo niewielkie stężenie jodku

kadmowego w roztworze użytym do nasycania bibuły znacznie przyspiesza proces absorpcji jodu i w efekcie zmniejszają się wartości współczynnika odbicia światła uzyskiwanych zdjęć jodoskrobiowych. Przy dalszym wzroście stężenia jodku kadmowego współczynnik odbicia światła nieznacznie wzrasta. Efekt ten wywołany jest prawdopodobnie przesunięciem widma absorpcyjnego światła dla otrzymywanych zdjęć jodoskrobiowych w kierunku fal krótkich.

W dalszych pomiarach stosowano roztwór skrobi i jodku kadmowego o takim składzie jaki ustalono w doświadczeniach wstępnych.

2.6.4. Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od czasu nasycania bibuły roztworem skrobi i jodku kadmowego.

Doświadczenia wykonano tak jak w poprzednich badaniach, zmieniając czas nasycania bibuły od 2 sekund do 360 sekund.

Wyniki pomiarów umieszczone w tablicy 6, oraz przedstawione na rysunku 11. wykazały, że współczynnik odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych nie zależy od czasu nasycania bibuły roztworem skrobi i jodku kadmowego w przebadanym zakresie zmienności czasu.

Tablica 6

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodo-
skrobiowych od czasu nasycania bibuły roztworem skrobi
i jodku kadmowego

Warunki pomiaru:

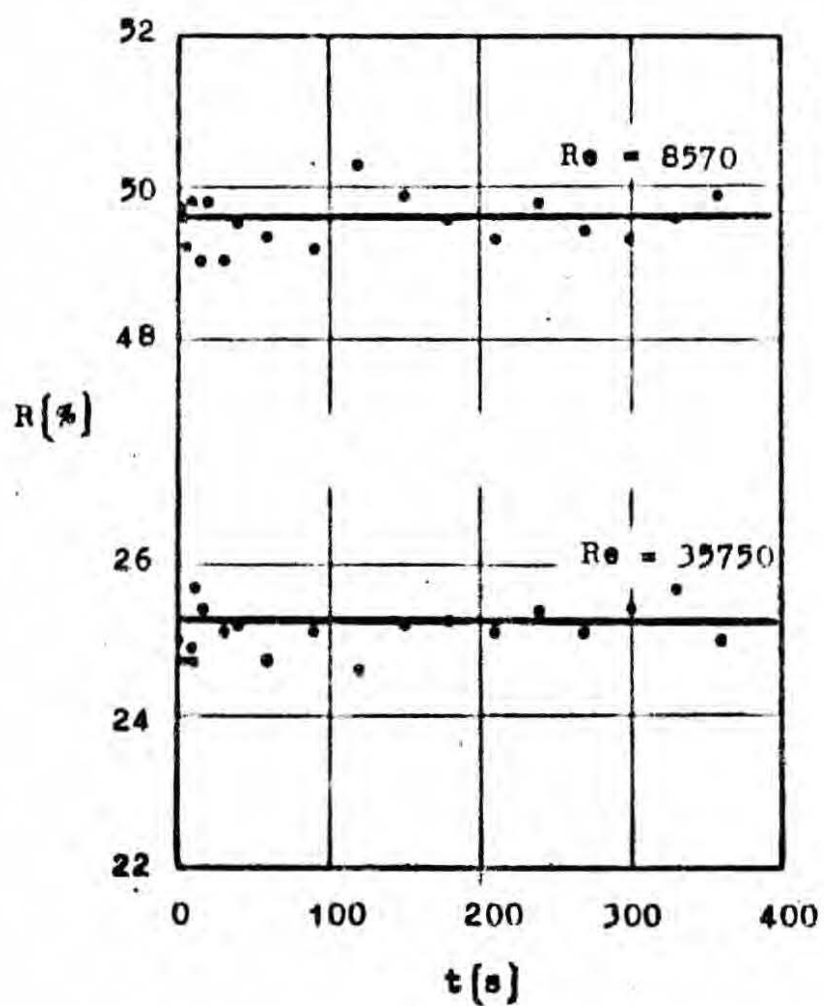
$$b = 101,3 \cdot 10^3 \frac{N}{m^2} ,$$

$$V_{t1} = 3,01 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} , \quad V_{t2} = 12,55 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} ,$$

$$Re_1 = 8570 , \quad Re_2 = 35750 .$$

Nr	t s	R ₁ %	R ₂ %
1	2	49,7	25,0
2	4	49,6	24,7
3	6	49,2	24,9
4	8	49,8	25,7
5	10	49,6	24,7
6	15	49,0	25,4
7	20	49,8	25,3
8	30	49,1	25,1
9	40	49,5	25,2
10	60	49,3	24,7
11	90	49,2	25,1
12	120	50,3	24,6
13	150	49,9	25,2
14	180	49,6	25,3
15	210	49,3	25,1
16	240	49,8	25,4
17	270	49,4	25,1
18	300	49,3	25,4
19	330	49,6	25,7
20	360	49,9	25,0

Rys. 11. Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od czasu nasyconia bibuły roztworem skrobi i jodku kadmowego



2.6.5. Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od czasu przechowywania roztworu skrobi i jodku kadmowego użytego do nasycania bibuły.

W doświadczeniach wykonanych tak jak w poprzednich badaniach porównano wartość współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych uzyskanych przy użyciu roztworów skrobi i jodku kadmowego o różnej długości czasu przechowywania.

W pierwszej części doświadczeń stosowano dwa roztwory A i B. Wyniki tych pomiarów umieszczono w tabelicy 7, część 1.

Po 70 dniach przygotowano jeszcze roztwór C i wykonano doświadczenia jak poprzednio. Uzyskane wyniki zamieszczono w tabelicy 7, część 2.

Przeprowadzone badania wykazały, że wartości współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych uzyskiwanych przy użyciu roztworów skrobi i jodku kadmowego o długości czasu przechowywania mniejszej niż 5 miesięcy są bardzo zbliżone, jednak nieco niższe dla roztworów starszych. Różnice te są małe i mieszczą się w granicach błędu pomiaru.

Tablica 7,
część 1.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od czasu przechowywania roztworu skrobi i jodku kadmowego użytego do nasycania bibuły

Warunki pomiaru:

roztwór A - 79 dób - jasnożółty,

roztwór B - 1 doba - bezbarwny,

$$b = 103,2 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} ,$$

$$V_{t1} = 2,98 \cdot 10^3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} , \quad V_{t2} = 12,44 \cdot 10^3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} ,$$

$$Re_1 = 8650 , \quad Re_2 = 36100 .$$

Nr	R _{1A} %	R _{1B} %
1	51,2	50,5
2	50,8	50,3
3	50,2	50,2
4	49,8	50,5
5	49,9	49,7
6	50,6	50,9
7	50,0	49,5
8	49,6	50,3
9	50,6	50,6
10	50,5	50,7
średnio	50,3	50,3

Nr	R _{2A} %	R _{2B} %
1	25,9	26,1
2	26,1	25,7
3	25,8	26,1
4	26,0	25,6
5	26,0	26,1
6	26,3	25,9
średnio	26,0	25,9

Tablica 7.,
część 2.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskro-
biowych od czasu przechowywania roztworu skrobi i jodku
kadmowego użytego do nasycania bibuły

Warunki pomiaru:

roztwór A - 150 dób - żółty,

roztwór B - 72 doby - jasnożółty,

roztwór C - 1 doba - bezbarwny,

$$b = 100,0 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} ,$$

$$V_{t1} = 3,02 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} ,$$

$$V_{t2} = 12,64 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} ,$$

$$Re_1 = 8490 ,$$

$$Re_2 = 35520 .$$

Nr	R _{1A} %	R _{1B} %	R _{1C} %
1	47,9	50,1	49,8
2	48,5	50,5	50,0
3	47,2	51,2	49,5
4	48,9	49,7	49,5
5	48,9	50,3	51,3
6	49,2	49,5	50,4
7	48,9	51,0	49,8
8	48,4	49,5	50,6
9	48,7	50,7	51,0
10	48,4	49,5	50,5
średnio	48,5	50,2	50,2

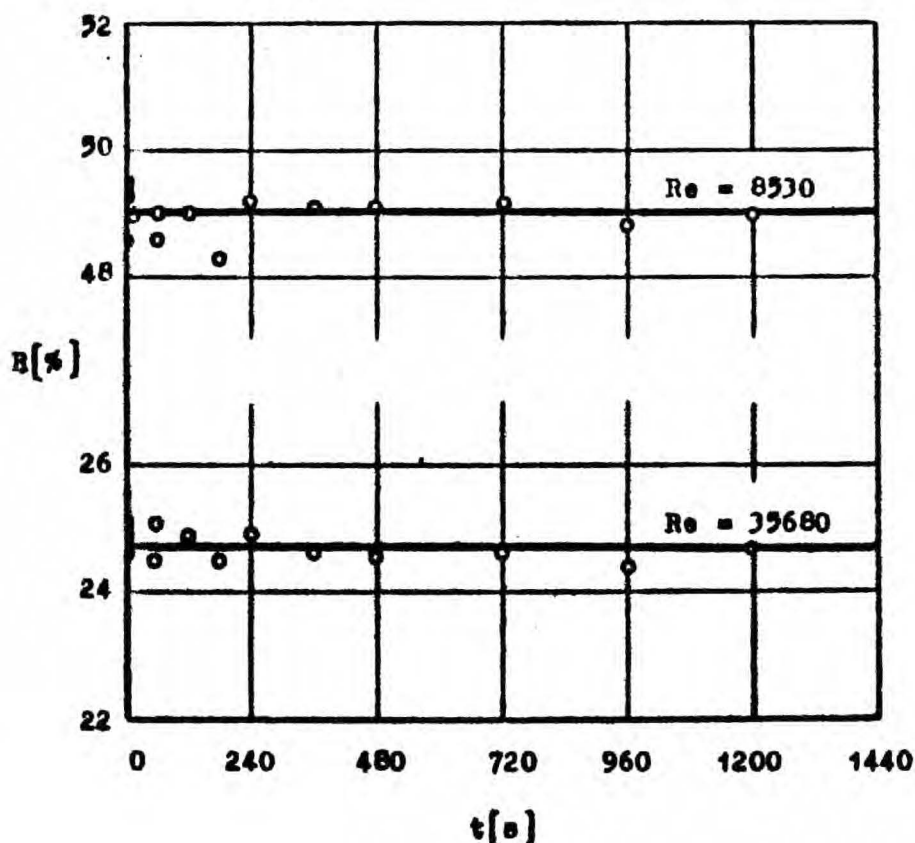
Nr	R _{2A} %	R _{2B} %	R _{2C} %
1	25,5	26,4	26,2
2	26,5	26,7	26,1
3	26,3	26,2	26,2
4	25,7	26,5	26,8
5	26,7	26,0	26,0
6	26,1	26,1	26,7
średnio	26,1	26,3	26,4

2.5.6. Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od czasu przechowywania zdjęć przed suszeniem

Doświadczenia wykonano tak jak w poprzednich badaniach. Wilgotne zdjęcia przechowywano do czasu suszenia pod szkiełkiem zegarkowym, następnie suszono w sposób opisany w punkcie 2.6.1.

Wyniki pomiarów umieszczone w tabelicy 8. oraz przedstawione na rysunku 12. wykazały, że przechowywanie wilgotnych zdjęć jodoskrobiowych w ciągu 1200 sekund nie wpływa na wartości współczynnika odbicia światła. Wskazuje to, że nie występuje zjawisko dyfuzji kompleksu jodoskrobiowego w głąb absorbentu.

Rys.12. Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od czasu przechowywania zdjęć przed suszeniem.



Tablica 8.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodo-
skrobiowych od czasu przechowywania zdjęć przed suszeniem.

Warunki pomiaru:

$$b = 100,8 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} ,$$

$$V_{t1} = 3,01 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} , \quad V_{t2} = 12,59 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} ,$$

$$Re_1 = 8530$$

$$Re_2 = 35680 .$$

Nr	t s	R ₁ %	R ₂ %
1	0	48,6	24,9
2	0	49,5	24,6
3	0	49,3	25,1
4	60	48,6	25,1
5	60	49,0	24,5
6	120	49,0	24,9
7	180	48,3	24,5
8	240	49,2	24,9
9	360	49,1	24,6
10	480	49,1	24,5
11	720	49,2	24,6
12	960	48,8	24,4
13	1200	49,0	24,6

2.6.7. Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od wilgotności absorbentu w czasie wykonywania doświadczenia

Wilgotność absorbentu określano przez ważenie. Pasek bibuły ważono przed i po nasyceniu roztworem skrobi i jodku kadmowego oraz przed i po wykonaniu doświadczenia. Ważono również wysuszone zdjęcie.

Średnią wilgotności absorbentu w czasie doświadczenia zmieniano jednym z dwóch sposobów:

A - W rurze umieszczano częściowo osuszony pasek absorbentu.

B - Pasek absorbentu umieszczano w rurze bezpośrednio po uzyskaniu, ale zmieniano wilgotność strumienia powietrza przez co uzyskiwano różną wilgotność średnią absorbentu w czasie wykonywania doświadczenia.

Doświadczenia wykonano tak jak w poprzednich badaniach dla czterech wartości natężenia przepływu powietrza. Wyniki pomiarów umieszczono w tablicy 9. oraz przedstawiono na rysunku 13.

Znaczenie symboli użytych w tablicy 9.

$m_{p1} \left(10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$ - masa jednostkowa bibuły ,

$m_{p2} \left(10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$ - masa jednostkowa absorbentu bezpośrednio po otrzymaniu ,

$m_{p3} \left(10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$ - masa jednostkowa absorbentu przed umieszczeniem w rurze ,

$m_{p4} \left(10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$ - masa jednostkowa absorbentu /zdjęcia/ po wykonaniu doświadczenia ,

$m_{p5} \left(10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$ - masa jednostkowa wysuszonego zdjęcia ,

$m_{po} \left(10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$ - wilgotność absorbentu bezpośrednio po otrzymaniu ,

$m_{ps} \left(10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)$ - średnia wilgotność absorbentu w czasie wykonywania doświadczenia ,

$\rho \left[\% \right]$ - wilgotność względna strumienia powietrza

$R \left[\% \right]$ - współczynnik odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych

Tablica 9.,
część 1.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskro-
biowych od wilgotności absorbentu w czasie wykonywania
doświadczenia

Warunki pomiaru:

$$b = 99,1 \cdot 10^3 \frac{N}{m^2} ,$$

$$V_t = 2,35 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} ,$$

$$Re = 6540 .$$

Grupa	Nr	m_{p1}	m_{p2}	m_{p3}	m_{p4}	m_{p5}	m_{po}	m_{ps}	β	R
A	1	97	233	182	170	129	104	47	98	59,0
	2	97	234	198	182	129	105	61	98	56,2
	3	98	230	230	215	129	101	93,5	98	54,1
	4	97	232	194	185	129	103	60,5	98	57,9
	5	98	234	204	193	130	104	68,5	98	56,0
	6	98	238	238	224	131	107	100	98	54,1
	7	98	239	197	190	131	108	62,5	98	58,0
	8	97	233	201	197	129	104	64	98	57,0
	9	98	238	238	231	131	107	103,5	98	54,6
	10	98	237	186	178	131	106	51	98	58,3
B	1	97	237	237	226	130	107	101,5	98	55,5
	2	96	234	234	220	128	106	99	97	55,0
	3	98	238	238	220	132	106	88	95	54,4
	4	96	235	235	216	129	106	86,5	93	55,4
	5	98	230	230	209	128	102	91,5	90	55,6
	6	97	234	234	209	129	105	92,5	89	55,3
	7	96	230	230	202	125	105	91	86	55,2
	8	97	237	237	207	129	108	93	83	54,4
	9	98	237	237	205	130	107	91	80	55,5
	10	98	236	236	201	131	105	87,5	80	55,5

Tablica 9.,

część 2.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od wilgotności absorbentu w czasie wykonywania doświadczenia.

Warunki pomiaru:

$$b = 99,1 \cdot 10^3 \frac{N}{m^2} ,$$

$$V_t = 4,23 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} ,$$

$$Re = 11780 .$$

Grupa	Nr	m_{p1}	m_{p2}	m_{p3}	m_{p4}	m_{p5}	m_{p0}	m_{ps}	β	R
A	1	96	229	186	176	127	102	54	97	47,0
	2	96	222	187	179	125	97	58	97	46,3
	3	95	228	195	184	126	102	63	97	46,5
	4	96	225	225	215	126	99	94	97	44,0
	5	95	225	189	180	125	100	59,5	97	46,0
	6	98	234	210	201	130	104	75,7	97	45,8
	7	98	237	237	228	131	106	101,5	97	44,7
	8	98	238	207	197	131	107	71	97	45,8
	9	97	231	210	200	128	103	77	97	44,7
	10	98	237	237	228	130	107	102,5	97	44,3
B	1	96	229	229	218	126	103	97,5	97	44,8
	2	97	230	230	216	128	102	95	96	44,7
	3	96	230	230	212	126	104	95	94	45,9
	4	96	231	231	208	128	103	91,5	92	44,5
	5	97	234	234	207	129	105	91,5	90	44,9
	6	98	238	238	209	131	107	92	89	44,7
	7	98	237	237	204	131	106	89,5	87	45,2
	8	97	230	230	195	128	102	84,5	83	45,2
	9	96	224	224	186	124	100	81	81	45,3
	10	97	229	229	189	126	103	83	80	45,5

Tablica 9.,
część 3.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od wilgotności absorbentu w czasie wykonywania doświadczenia.

Warunki pomiaru:

$$b = 99,1 \cdot 10^3 \frac{N}{m^2},$$

$$V_t = 8,44 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s},$$

$$Re = 23500.$$

Grupa	Nr	m_{p1}	m_{p2}	m_{p3}	m_{p4}	m_{p5}	m_{po}	m_{ps}	β	R
A	1	94	223	177	159	123	100	45	96	35,6
	2	95	223	185	168	124	99	52,5	96	34,7
	3	98	235	235	215	129	106	96	96	33,2
	4	97	237	204	187	129	108	66,5	96	34,3
	5	96	235	207	190	128	107	70,5	96	33,4
	6	98	239	239	219	131	108	98	96	32,9
	7	94	226	185	170	124	102	53,5	96	35,5
	8	94	225	183	167	124	101	51	96	34,1
	9	94	223	192	176	123	100	61	96	34,1
	10	94	226	226	107	124	102	92,5	96	33,0
B	1	94	228	228	210	124	104	95	96	32,7
	2	95	227	227	204	125	102	90,5	95	33,5
	3	96	226	226	199	125	101	87,5	94	33,9
	4	95	228	228	197	125	103	87,5	92	33,3
	5	96	230	230	195	127	103	85,5	90	32,9
	6	97	235	235	196	130	105	85,5	89	33,3
	7	96	234	234	189	128	106	83,5	87	33,4
	8	96	234	234	184	128	106	81	84	33,5
	9	94	230	230	174	124	106	78	84	33,6
	10	94	228	228	168	123	105	75	78	33,2

Tablica 9

część 4.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od wilgotności absorbentu w czasie wykonywania doświadczenia.

Warunki pomiaru:

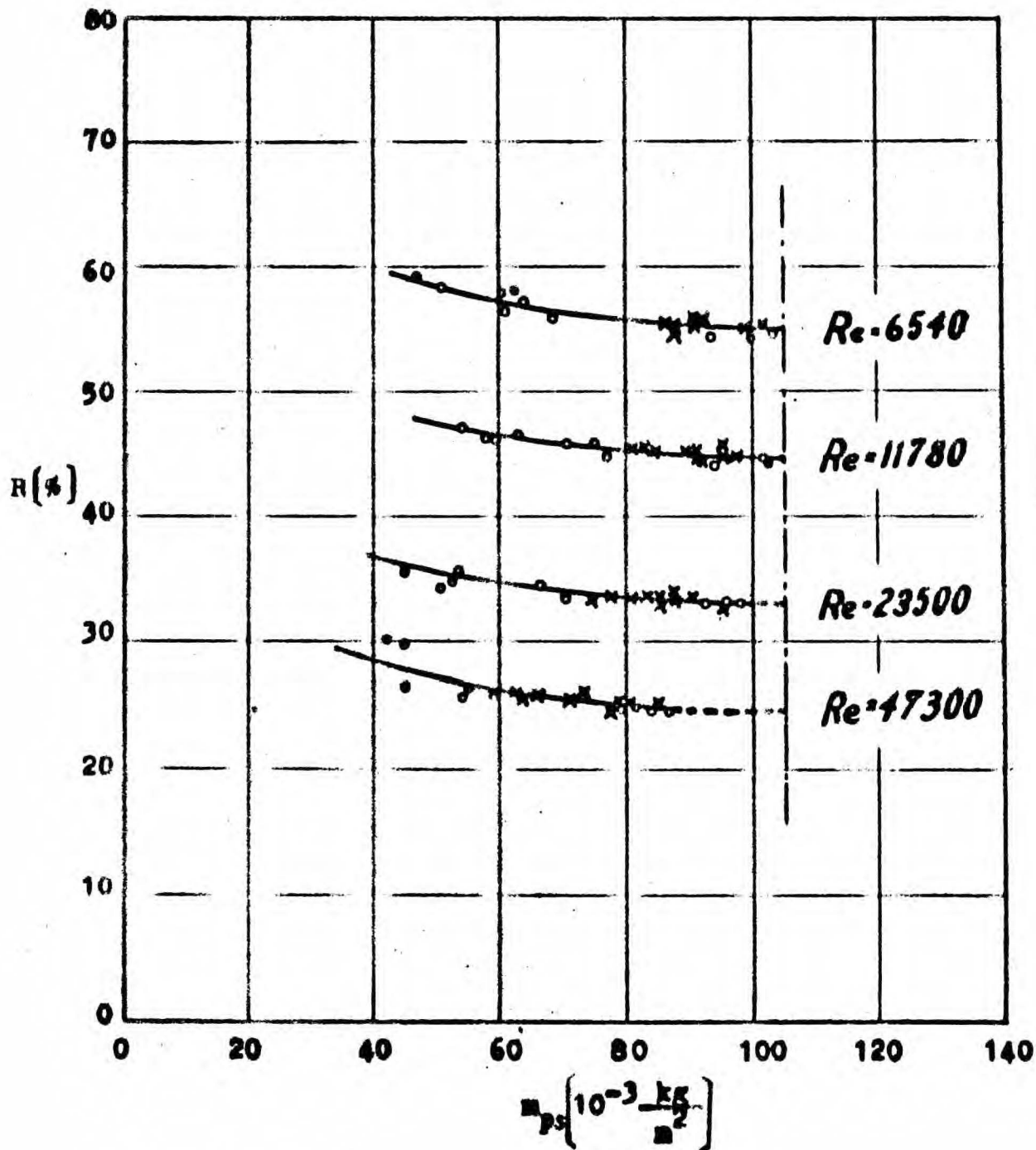
$$b = 99,1 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2},$$

$$V_t = 16,71 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}},$$

$$\text{Re} = 47300.$$

Grupa	Nr	m_{p1}	m_{p2}	m_{p3}	m_{p4}	m_{p5}	m_{po}	m_{ps}	β	R
A	1	94	243	194	158	131	112	45	94	26,5
	2	94	237	201	166	129	108	54,5	94	25,7
	3	94	236	236	196	129	107	87	94	24,5
	4	94	227	189	151	125	102	45	94	29,7
	5	95	227	227	182	125	102	79,5	94	24,7
	6	94	225	181	151	124	101	42	94	30,0
	7	95	225	198	160	124	101	55	94	26,2
	8	96	227	227	185	124	103	82	94	24,8
	9	94	229	204	165	125	104	59,5	94	25,7
	10	94	230	230	188	125	105	84	94	24,5
B	1	94	232	232	192	127	105	85	94	25,0
	2	94	227	227	181	126	101	78	93	24,3
	3	94	231	231	182	124	107	81,5	92	25,1
	4	95	234	234	179	127	107	79,5	91	25,1
	5	94	230	230	169	128	102	71,5	90	25,3
	6	94	235	235	170	129	106	73,5	88	26,0
	7	94	231	231	160	124	106	71,5	85	24,9
	8	95	229	229	153	124	105	66	83	25,7
	9	94	227	227	149	124	103	64	81	25,5
	10	94	228	228	148	124	104	64	79	25,5

Rys. 13. Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od wilgotności absorbentu w czasie wykonywania doświadczenia



o - grupa A

x - grupa B

--- - wilgotność absorbentu bezpośrednio po otrzymaniu

Przeprowadzone badania wykazały, że współczynnik odbicia światła dla otrzymywanych zdjęć jodoskrobiowych praktycznie nie zależy od wilgotności absorbentu w czasie wykonywania doświadczenia, jeżeli wilgotność ta jest dostatecznie duża. Reakcja tworzenia kompleksu jodoskrobiowego na pasku absorbentu o małej wilgotności jest powolna, wartości współczynnika odbicia światła są wtedy wyższe. Przy stosowanej wilgotności strumienia powietrza wysychanie absorbentu w czasie doświadczenia jest nieznaczne i nie wpływa na wynik pomiaru.

Przeprowadzone pomiary wykazały dodatkowo, że paski absorbentu o tej samej wielkości pola powierzchni /90 milimetrów X 110 milimetrów/ mają jednakowe masy i pochłaniają jednakowe ilości roztworu skrobi i jodku kadmowego. Wskazuje to, że stosowany absorbent jest jednorodny ze względu na grubość i strukturę, co stanowi podstawę dobrej powtarzalności wyników doświadczeń.

2.6.8. Dyskusja wyników

Przeprowadzone badania reakcji modelowej pozwoliły określić warunki, które muszą być spełnione aby uzyskać jednoznaczną zależność między współczynnikiem odbicia światła uzyskiwanych zdjęć jodoskrobiowych i ilością jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu. Zależność tę można wykorzystać bezpośrednio do oznaczania współczynnika wnikania masy, jeżeli stężenie par jodu przy powierzchni absorbentu w czasie doświadczeń jest znikomo małe w porównaniu ze stężeniem we wnętrzu strumienia. Jeżeli natomiast stężenie par jodu przy powierzchni absorbentu nie może być uważane za równe zeru, należy określić zależność $R = f /k_c/$ na podstawie doświadczeń przeprowadzonych

w układzie, dla którego znane są lokalne współczynniki wnikania masy i dopiero tę skalę można stosować do badania procesów wymiany masy w innych układach geometrycznych.

Przeprowadzone pomiary wykazały dodatkowo, że zanieczyszczenia zawarte w powietrzu nie wpływają na przebieg doświadczenia, gdyż uzyskano dobrą powtarzalność wyników pomiarów.

2.7. Badanie zależności współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu

2.7.1. Określanie ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu za pomocą empirycznego równania opisującego wymianę masy

Pomiary wykonano sposobem opisanym w punkcie 2.6.1. w geometrycznie podobnych rurach szklanych o wymiarach:

	średnica wewnętrzna rury d [mm]	długość rury l [mm]
A	19,9	720
B	29,2	1050
C	39,4	1420

Zdjęcia o różnym stopniu zaciemnienia uzyskano przez zmianę następujących parametrów doświadczenia:

- 1 - czas trwania doświadczenia,
- 2 - stężenie par jodu w strumieniu powietrza,
- 3 - natężenie przepływu powietrza,
- 4 - średnica rury.

Pasek absorbentu o długości 11,5 raza większej i szerokości 3 razy większej od średnicy rury umieszczano w rurze w taki sposób, aby dokładnie przylegał do ścianki, a koniec paska znajdował się w odległości około 10 milimetrów od wylotu rury. Obliczenia ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu i pomiar współczynnika odbicia światła wykonano dla punktu odległego o odcinek równy 10 średnicom rury od przedniej krawędzi zdjęcia.

Ilość jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu określono za pomocą wzoru:

$$n_p = k_c (c - c') t ,$$

gdzie:

c - stężenie par jodu we wnętrzu strumienia,

c' - stężenie par jodu przy powierzchni absorbentu.

W obliczeniach przyjęto, że stężenie par jodu przy powierzchni absorbentu w czasie doświadczenia jest równe zero czyli wybrana reakcja modelowa jest bardzo szybka.

Współczynnik wnikania masy obliczono za pomocą równania podanego przez Colburna ^{6/}:

$$Sh = 0,023 Re^{0,8} Sc^{\frac{1}{3}} ,$$

Zależność ta jest słuszna dla przepływu burzliwego w rurze, jeżeli profile prędkości i stężenia są w pełni wykształcone. Dla punktu pomiaru, który znajdował się w odległości równej 35 średnicom od początku rury, profil prędkości był w pełni wykształcony. Założenie takie byłoby wątpliwe dla profilu stężenia, gdyż punkt pomiaru znajdował się w odległości zaledwie 10 średnic od poprzedniej krawędzi absorbentu. Ponieważ w literaturze

brak jest danych, które pozwalałyby określić wpływ niepełnego wykształcenia profilu stężenia na wartości współczynnika wnikania masy przy przepływie burzliwym, wpływ ten określono na podstawie analogicznych danych dla procesu wymiany ciepła^{88/} przyjmując, że zachodzi analogia między tymi zjawiskami. Poszukiwana poprawka zależy od liczby Reynoldsa i liczby Schmidta i dla przeprowadzonych pomiarów nie przekraczała 4 procent. Jest to wartość mała, leżąca w granicach dokładności zastosowanego równania Colburna i nie uwzględniono jej w obliczeniach.

Przy obliczaniu ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu uwzględniono zmianę stężenia par jodu w strumieniu powietrza na skutek absorpcji na powierzchni absorbentu. Stopień absorpcji jodu ze strumienia równa się stosunkowi ilości jodu zaabsorbowanego na powierzchni absorbentu do ilości jodu wprowadzonego do układu:

$$\alpha = \frac{k_c \cdot c \cdot 3d \cdot l \cdot t}{U \cdot c_0 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot t} \approx 4 \frac{l \cdot c \cdot k_c}{d \cdot c_0 \cdot U} ,$$

gdzie:

c - stężenie par jodu w strumieniu ,

c_0 - stężenie par jodu w strumieniu wpływającym do rury ,

l - długość odcinka rury pokrytego absorbentem ,

d - średnica rury .

Ponieważ w przeprowadzonych pomiarach $c \approx c_0$, powyżej podaną zależność można przekształcić do postaci wykorzystywanej w obliczeniach:

$$\alpha \approx 4 \frac{l}{d} \frac{Sh}{Re Sc} .$$

Wyniki pomiarów umieszczono w tablicach 10. ÷ 12. oraz przedstawiono na rysunku 15. / str. 88/.

Tablica 10

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu przy zmianach czasu trwania doświadczenia

Warunki pomiaru:

$$\begin{aligned}
 d &= 29,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} , & V_t &= 6,04 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} , \\
 c &= 18,06 \cdot 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} , & \text{Re} &= 17190 , \\
 b &= 101,1 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} , & \text{Sh} &= 69,5 , \\
 \lambda &= 15,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} , & k_c &= 19,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} , \\
 D &= 8,11 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} , & \alpha &= 8,6 \%
 \end{aligned}$$

Nr	t s	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	R %
1	0	0	78,7
2	5	1,7	78,6
3	10	3,5	78,8
4	15	5,2	78,2
5	15	5,2	78,0
6	20	7,0	73,7
7	25	8,7	73,1
8	30	10,5	71,8
9	40	13,9	65,7
10	45	15,7	60,4
11	50	17,4	62,7
12	60	20,9	59,2
13	70	24,4	56,5
14	75	26,1	52,5
15	80	27,9	53,7
16	90	31,4	50,9
17	100	34,9	48,3
18	105	36,6	47,9
19	110	38,3	46,0
20	120	41,8	44,2
21	130	45,3	42,8
22	150	52,3	38,5
23	165	57,5	37,8

Nr	t s	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	R %
24	180	62,7	34,2
25	190	66,2	34,4
26	200	69,7	33,3
27	210	73,2	32,2
28	220	76,7	30,9
29	225	78,4	30,9
30	240	83,6	30,0
31	255	88,9	28,6
32	270	94,1	26,7
33	300	104,6	25,9
34	330	115,0	23,1
35	360	125,5	22,7
36	390	135,9	20,9
37	420	146,4	19,8
38	450	156,8	19,6
39	480	167,3	17,3
40	500	174,3	17,8
41	540	188,2	16,8
42	600	209	15,8
43	720	251	14,4
44	900	318	13,1
45	∞	∞	8,1

Tablica 11.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu przy zmianach stężenia par jodu w strumieniu powietrza

Warunki pomiaru:

$$d = 29,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} ,$$

$$t = 120 \text{ s} ,$$

$$b = 101,1 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} ,$$

$$\nu = 15,33 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} ,$$

$$D = 8,11 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} ,$$

$$V_t = 6,04 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} ,$$

$$\text{Re} = 17190 ,$$

$$\text{Sh} = 69,5 ,$$

$$K_c = 19,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} ,$$

$$\alpha = 8,6 \% .$$

Nr	$c \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	R %
1	0	0	78,7
2	1,75	4,1	78,5
3	2,26	5,2	78,8
4	3,02	7,0	76,1
5	4,01	9,3	72,6
6	5,02	11,6	68,1
7	7,03	16,1	64,0
8	9,03	20,9	59,1
9	11,29	26,1	55,7
10	14,09	32,6	49,6
11	18,06	41,8	45,7
12	30,1	69,7	33,0
13	40,1	92,9	28,3
14	44,7	110,5	24,2
15	55,3	128,1	21,2

Tablica 12.,
część A

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu przy zmianach natężenia przepływu powietrza

Warunki pomiaru:

$$d = 19,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} ,$$

$$\lambda = 15,46 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} ,$$

$$t = 120 \text{ s} ,$$

$$D = 8,19 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} ,$$

$$b = 100,7 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{m}^2} ,$$

Nr	$V_t \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Re	Sh	$k_c \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	α %	$c \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	R %
1	1,51	6270	31,0	12,69	10,6	17,74	27,0	53,5
2	1,69	7020	34,0	13,92	10,2	18,80	29,7	52,6
3	2,02	8390	39,2	16,05	9,9	18,78	34,2	48,4
4	2,34	9720	44,1	18,06	9,6	18,03	39,1	45,6
5	2,68	11130	49,1	20,1	9,4	18,05	43,5	43,8
6	3,01	12500	53,9	22,1	9,2	18,09	48,0	41,5
7	3,55	13910	58,7	24,0	9,0	18,11	52,2	40,5
8	3,77	15650	64,5	26,4	8,8	18,12	57,4	38,1
9	4,20	17440	70,4	28,8	8,6	18,13	62,7	35,3
10	4,71	19560	70,1	31,8	8,4	18,13	68,7	36,6
11	5,38	22300	85,7	35,2	8,2	18,12	76,3	31,5
12	6,06	25200	94,5	38,7	8,0	18,11	84,1	30,2
13	6,72	27900	102,4	41,9	7,8	18,29	92,0	28,0
14	7,56	31400	105,1	43,0	7,6	18,31	94,5	27,6
15	8,40	34900	122,5	50,2	7,4	18,30	110,2	25,0
16	10,10	41900	141,8	58,1	7,2	18,27	127,4	23,6
17	11,83	49100	161,1	66,0	7,0	18,16	143,8	21,0
18	13,56	56300	179,7	73,6	6,8	18,11	159,9	19,3

Tablica 12.,
część B.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu przy zmianach natężenia przepływu powietrza

Warunki pomiaru:

$$d = 29,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} , \quad \nu = 15,46 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} ,$$

$$t = 120 \text{ s} , \quad D = 8,19 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} ,$$

$$b = 100,7 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} ,$$

Nr	$V_t \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Re	Sh	$k_c \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	α %	$c \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	R %
1	2,34	6620	32,4	9,04	10,4	17,89	19,4	61,2
2	2,69	7610	36,2	10,10	10,1	17,94	21,7	58,7
3	3,01	8520	39,7	11,08	9,8	17,97	23,9	57,1
4	3,34	9450	43,1	12,03	9,6	18,01	26,0	55,2
5	3,57	10100	45,4	12,67	9,4	18,03	27,4	52,5
6	4,19	11860	51,7	14,43	9,2	18,07	31,3	51,4
7	4,71	13330	56,8	15,85	9,0	18,05	34,3	48,6
8	5,38	15230	63,1	17,61	8,8	18,05	38,1	46,5
9	6,05	17120	69,3	19,34	8,6	18,07	41,9	44,1
10	6,71	18990	75,3	21,0	8,4	18,25	46,0	43,1
11	7,53	21300	82,6	23,1	8,2	18,29	50,7	40,1
12	8,37	23700	89,9	25,1	8,0	18,31	55,1	37,9
13	10,06	28500	104,2	29,1	7,7	18,34	64,0	35,4
14	11,75	33300	118,0	32,9	7,5	18,35	72,7	32,3
15	13,44	38000	131,2	36,6	7,3	18,35	80,6	30,6
16	15,15	42800	144,3	40,3	7,1	18,31	88,5	28,7
17	16,86	47700	157,4	43,9	7,0	18,28	96,3	27,7

Tablica 12.,

część C

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu przy zmianach natężenia przepływu powietrza

Warunki pomiaru:

$$d = 39,4 \cdot 10^{-3} \text{ m} ,$$

$$\nu = 15,46 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} ,$$

$$t = 120 \text{ s} ,$$

$$D = 8,19 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} .$$

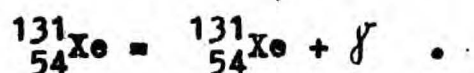
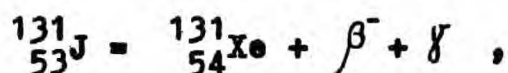
$$b = 100,7 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} ,$$

Nr	$V_t \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Re	Sh	$k_c \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	α %	$c \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	R %
1	3,02	6330	31,3	6,47	10,5	17,85	13,86	67,5
2	3,34	7000	33,9	7,01	10,3	17,87	15,03	65,7
3	3,77	7910	37,4	7,73	10,0	17,91	16,61	63,7
4	4,20	8810	40,7	8,42	9,8	17,92	18,11	61,0
5	4,71	9880	44,7	9,24	9,5	17,96	19,91	59,7
6	5,37	11260	48,7	10,07	9,3	17,98	21,7	57,9
7	6,05	12690	54,6	11,29	9,1	17,97	24,3	55,9
8	6,70	14050	59,2	12,24	8,9	18,19	26,7	54,7
9	7,54	15810	65,1	13,46	8,7	18,21	29,4	51,8
10	8,37	17550	70,7	14,62	8,5	18,25	32,0	50,4
11	10,05	21100	82,0	16,96	8,3	18,27	37,2	47,8
12	11,74	24600	92,5	19,13	8,0	18,31	42,0	44,1
13	13,43	28200	103,4	21,4	7,8	18,29	47,0	42,1
14	15,12	31700	113,5	23,5	7,6	18,31	51,6	40,1
15	16,83	35300	123,7	25,6	7,4	18,28	56,2	37,8
16	18,52	38800	133,4	27,6	7,6	18,31	60,6	36,5

2.7.2. Oznaczanie ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu za pomocą izotopu promieniotwórczego ^{131}J .

W doświadczeniach użyto jod, który zawierał śladowe ilości izotopu promieniotwórczego ^{131}J . Działając parami tego jodu na paski absorbentu uzyskano zdjęcia jodoskrobiowe. Z pomiaru aktywności zdjęcia i znanej aktywności właściwej użytego jodu obliczono ilość zaabsorbowanego jodu.

Izotop ^{131}J ulega rozpadowi promieniotwórczemu według schematu:

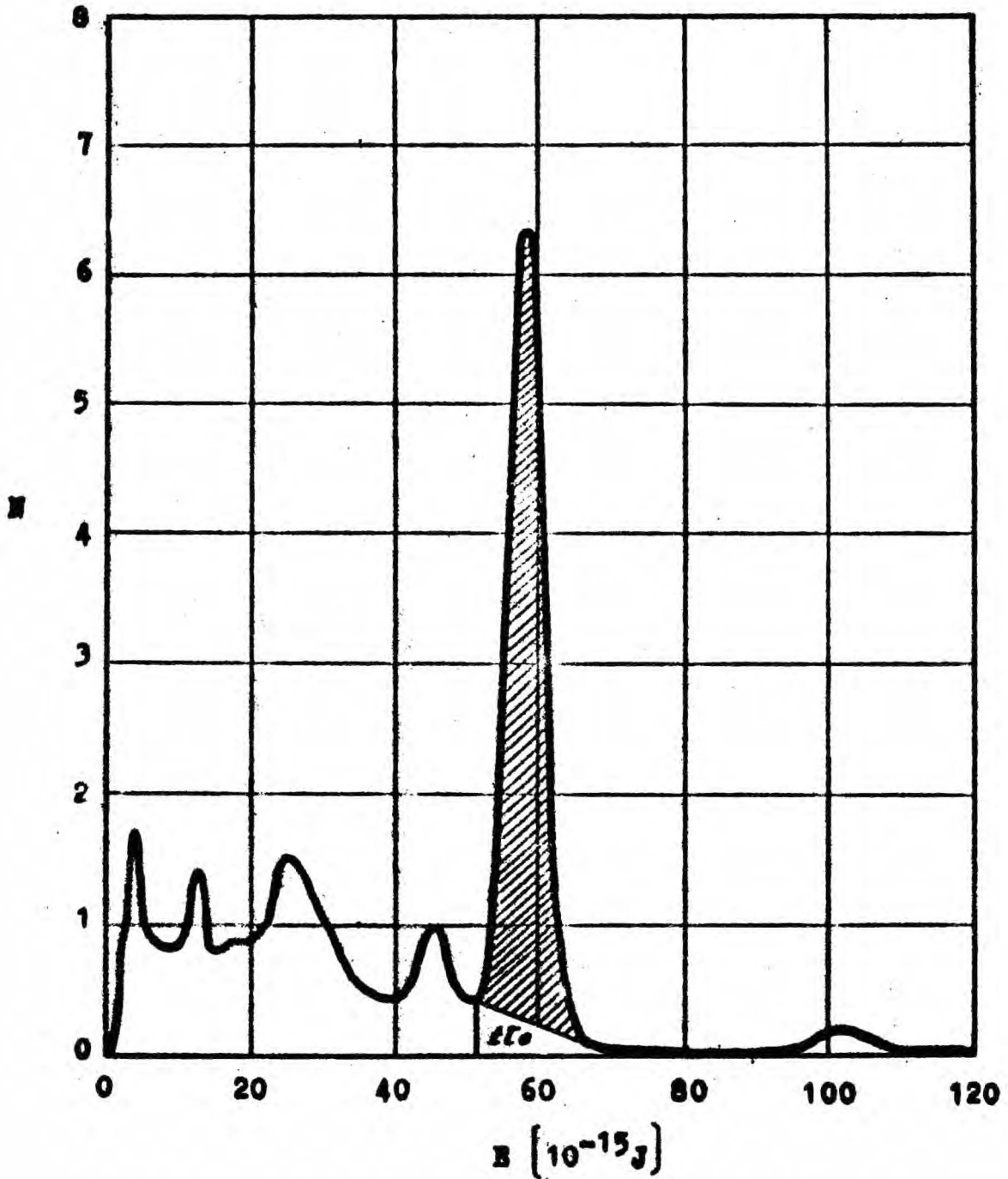


Pomiary aktywności wykonano za pomocą spektrografu γ , co pozwoliło na zmierzenie promieniowania emitowanego tylko w pierwszej reakcji. Na rysunku 14. przedstawiono widmo γ dla próbki jodu uzyskane za pomocą tego spektrografu. Pole zakreskowane przedstawia część promieniowania emitowanego przez izotop ^{131}J . Wartość tę określano we wszystkich pomiarach aktywności.

Do pomiarów użyto wodnego roztworu Na^{131}J o aktywności właściwej około $3,7 \cdot 10^{10}$ rozpadów na kilogram i sekundę. Do 0,2 centymetra sześciennego tego roztworu dodano 0,05 centymetra sześciennego 0,2 procentowego roztworu KJ jako

* Pomiary zostały wykonane przez A.Siudę, J.Rojka i A.Szarka w Zakładzie Radiochemii Instytutu Badań Jądrowych.

Rys. 14. Widmo próbki jodu ^{131}J



N - względna widmowa aktywność promieniowania
E - energia kwantu

nośnika i następnie utleniono jodki za pomocą mieszaniny składającej się z 1 centymetra sześciennego 10-procentowego roztworu NaNO_3 i 0,3 centymetra sześciennego 3-normalnego roztworu HNO_3 . Otrzymany jod wyekstrahowano za pomocą 2 centymetrów sześciennych eteru etylowego. Z warstwy eterowej pobrano 0,4 centymetra sześciennego roztworu i połączono z 4 centymetrami sześciennymi roztworu jodu nieaktywnego w eterze, zawierającymi 0,1045 grama jodu. Ponieważ ilość jodu zawarta w próbce 0,4 centymetra sześciennego była bardzo mała, ostatecznie otrzymano 4,4 centymetra sześciennego roztworu, w którym zawarte było 0,1045 grama jodu, w tym śladowe ilości izotopu ^{131}J .

Z przygotowanego w powyżej podany sposób roztworu jodu pobrano 5 próbek po 0,1 centymetra sześciennego w celu wyznaczenia aktywności właściwej zawartego tam jodu. Pozostałą część roztworu umieszczono w krystalizatorze o średnicy 90 milimetrów i głębokości 5 milimetrów i odparowano eter w taki sposób, aby na dnie powstała równomierna warstewka jodu. Przykrywając krystalizator arkuszami absorbentu otrzymano zdjęcia jodoskrobiowe. Zdjęcia o różnym stopniu zaciemnienia uzyskano przez zmianę czasu ekspozycji. Ze środkowej części otrzymanych zdjęć wycięto arkusiki o wymiarach 39,8x38,9 milimetra w celu zmierzenia aktywności i współczynnika odbicia światła.

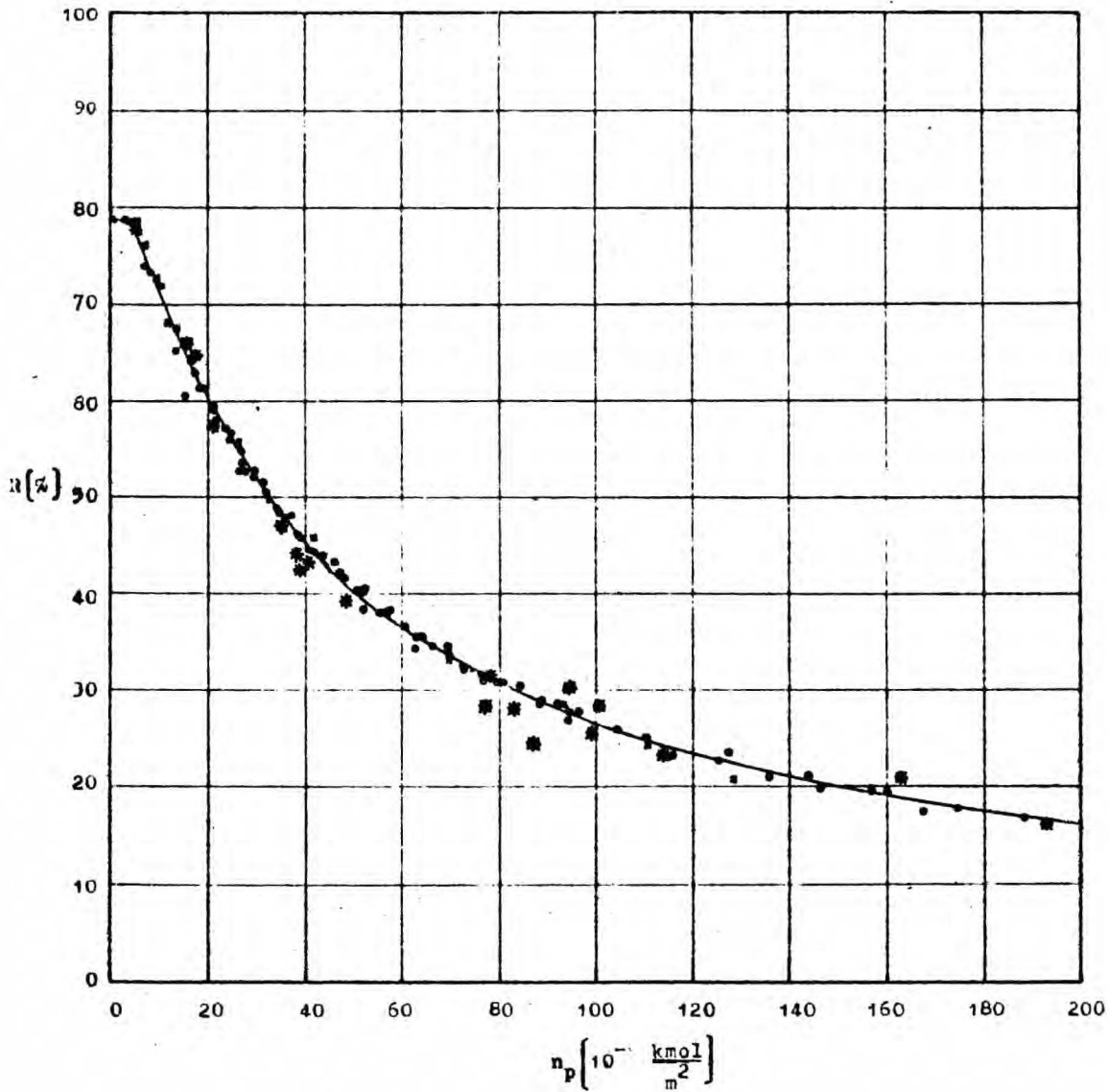
Ponieważ geometria układu przy mierzeniu aktywności zdjęć była inna niż przy wyznaczaniu aktywności właściwej jodu, do obliczeń wprowadzono empirycznie wyznaczoną poprawkę. Określono ją porównując aktywności jednakowych próbek wodnego roztworu $\text{Na } ^{131}\text{J}$. W pierwszym przypadku aktywność mierzono w takich

Tablica 13.

Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu. Oznaczenia ilości zaabsorbowanego jodu za pomocą izotopu promieniotwórczego ^{131}J .

Nr	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	R %
1	5,26	77,3
2	15,32	65,8
3	17,17	64,4
4	20,8	57,2
5	35,3	46,8
6	35,4	43,8
7	38,2	44,1
8	38,2	42,5
9	38,3	43,1
10	48,7	39,0
11	76,7	28,1
12	78,4	31,4
13	83,6	27,9
14	86,9	24,0
15	94,6	30,3
16	99,6	25,4
17	100,3	28,7
18	113,9	23,1
19	163,9	21,0
20	193,4	16,0

Rys. 15. Zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu



pomiary wykonane w rurach przy zmianach:

- o - czasu trwania doświadczenia
 - x - stężenia par jodu w strumieniu
 - - natężenia przepływu powietrza
- } ilość zaabsorbowanego jodu określano za pomocą równania Colburna
- * - pomiary wykonane za pomocą izotopu ^{131}J

warunkach w jakich wykonywano pomiary aktywności właściwej jodu, w drugim przypadku określano aktywność próbki roztworu Na^{131}J naniesionej na arkusik absorbentu o wymiarach zdjęcia.

Ponieważ w okresie 6 godzin, w którym wykonano wszystkie pomiary aktywności, stopień rozpadu izotopu ^{131}J wynosi zaledwie 2 procent, poprawki tej nie uwzględniono w obliczeniach.

Wyniki pomiarów umieszczono w tablicy 13, oraz przedstawiono na rysunku 15.

2.7.3. Dyskusja wyników

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań określono zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu. Punkty obrazujące wyniki doświadczeń przeprowadzonych w rurach oraz pomiarów wykonanych z pomocą izotopu promieniotwórczego ^{131}J leżą praktycznie na jednej krzywej. Wskazuje to, że zgodnie z przyjętym poprzednio założeniem, stężenie par jodu przy powierzchni absorbentu w czasie doświadczenia jest znikomo małe w porównaniu ze stężeniem we wnętrzu strumienia, czyli w przebadanym zakresie zmienności parametrów doświadczenia wybrana reakcja modelowa jest bardzo szybka.

Znalezioną zależność między współczynnikiem odbicia światła uzyskiwanych zdjęć jodoskrobiowych i ilością jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu można wykorzystać do oznaczania współczynników wnikania masy. Bardzo duża szybkość wybranej reakcji modelowej pozwala na dość swobodny wybór czasu doświadczenia i stężenia par jodu w strumieniu powietrza, tak aby uzyskać zdjęcie jodoskrobiowe o pożądanej wartości współczynnika odbicia światła.

2.8. Badanie wymiany masy przy pomocy opracowanej metody oznaczania współczynników wnikania masy

2.8.1. Sposób prowadzenia pomiarów

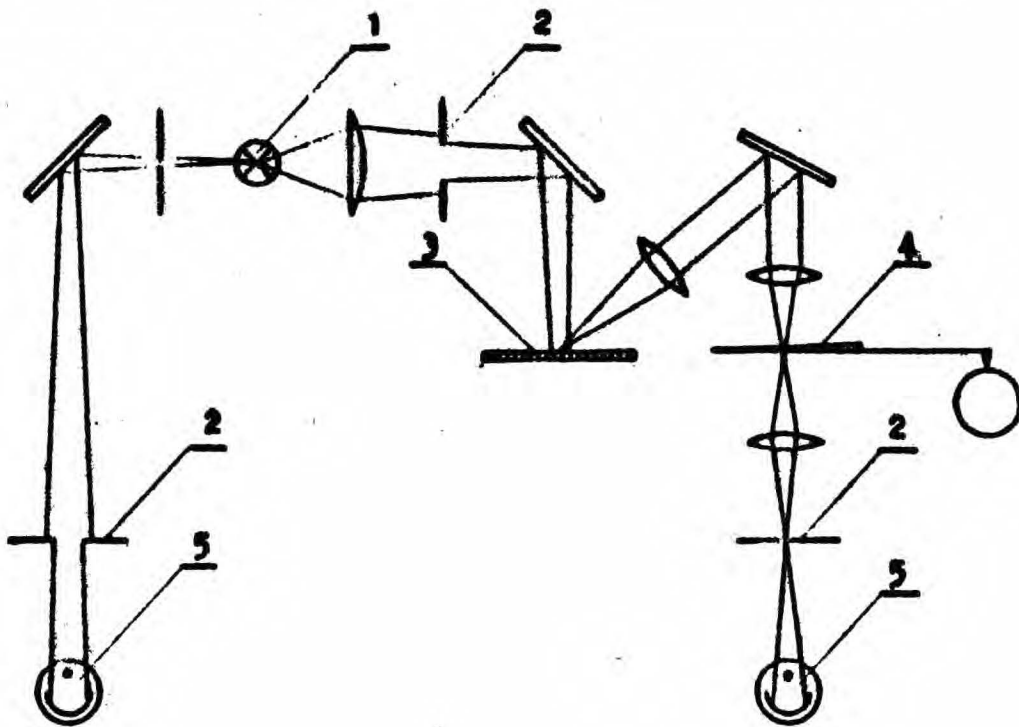
Znalezioną poprzednio zależność współczynnika odbicia światła uzyskiwanych zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu wykorzystano do zbadania procesów wymiany w kilku wybranych układach geometrycznych. Wykonane pomiary nie wyjaśniają dokładniej żadnego z poruszonych problemów, są one sprawdzeniem przydatności opracowanej metody do badania zjawisk wymiany masy i ciepła.

Pomiary przeprowadzono za pomocą aparatury opisanej w punkcie 2.2. i stosowanej w poprzednich badaniach. Doświadczenia wykonano sposobem opisanym w punkcie 2.6.1.

Współczynniki odbicia światła potrzebne do oznaczenia współczynników wnikania masy określano za pomocą leukometru stosowanego w poprzednich badaniach lub za pomocą mikrofotometru rejestrującego firmy KOVO, w którym układ optyczny przystosowano do pomiaru strumienia światła odbitego*. Na rysunku 16. przedstawiono schemat układu optycznego mikrofotometru po wykonanej adaptacji. Powierzchnia fotometrowana miała kształt kwadratu o boku 2 milimetry.

* Adaptację wykonano w Katedrze Fizyki na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej.

Rys. 16. Schemat układu optycznego mikrofotometru



- 1 - źródło światła
- 2 - przesłony regulacyjne
- 3 - obiekt fotometrowany
- 4 - klin optyczny sprężony z urządzeniem piszącym
- 5 - fotokomórki

2.8.2. Analiza błędów pomiaru współczynnika wnikania masy

Błąd pomiaru współczynnika wnikania masy określono w oparciu o analizę równania:

$$k_c = \frac{n_p}{t \cdot c}$$

Ilość jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu n_p oraz stężenie par jodu we wnętrzu strumienia

c_n określano za pomocą następujących zależności:

$$n_p = n_p (R) ,$$
$$c = c_n \frac{V_{tJ_2}}{V_t} ,$$

gdzie:

R - współczynnik odbicia światła dla zdjęcia jodoskrobiowego ,

c_n - stężenie par jodu w powietrzu wypływającym z kolumny z jodem. Stężenie to zależy od temperatury:

$$c_n = c_n (T) .$$

V_{tJ_2} - objętościowe natężenie przepływu powietrza przez kolumnę z jodem,

V_t - objętościowe natężenie przepływu głównego strumienia powietrza.

Po podstawieniu powyżej podanych zależności do równania określającego współczynnik wnikania masy uzyskuje się następującą zależność :

$$k_c = \frac{n_p}{t} \cdot \left[\frac{V_{tJ_2}}{V_t} \cdot c_n (T) \right]^{-1} ,$$

w której zawarte są wielkości mierzone bezpośrednio w doświadczeniu. Równanie to wykorzystano do określenia maksymalnego błędu przypadkowego pomiaru współczynnika wnikania masy :

$$\frac{\Delta k_c}{k_c} = \left(\frac{1}{n_p} \cdot \frac{dn_p}{dR} \right) \Delta R + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta V_{tJ_2}}{V_{tJ_2}} + \frac{\Delta V_t}{V_t} + \left(\frac{1}{c_n} \frac{dc_n}{dT} \right) \Delta T .$$

Wartości maksymalnych błędów pomiaru dla poszczególnych wielkości umieszczono w tabelicy 14.

Tablica 14.

Maksymalne błędy pomiaru poszczególnych wielkości
w przeprowadzonych badaniach wymiany masy

wielkość mierzona	maksymalny błąd pomiaru
R	leukometr $\Delta R = 0,2 \%$
	mikrofotometr $\Delta R = 2 \%$
t	$\frac{\Delta t}{t} = 0,2 \%$
V_{tJ_2}	$\frac{\Delta V_{tJ_2}}{V_{tJ_2}} = 2 \%$
V_t	$\frac{\Delta V_t}{V_t} = 2 \%$
T	$\Delta T = 0,1 \text{ deg}$

Tablica 15.

Zależność wartości wyrażenia $\frac{1}{n_p} \frac{dn_p}{dR}$ od wartości współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych

R [%]	20	30	40	50	60	70
$\frac{1}{n_p} \frac{dn_p}{dR} [\%^{-1}]$	0,063	0,052	0,045	0,048	0,051	0,072

W tablicy 15. podano zależność wartości wyrażenia $\frac{1}{n_p} \frac{dn_p}{dR}$ od wartości współczynnika odbicia światła. Z przytoczonych danych wynika, że wartość tego wyrażenia jest prawie stała, a więc dokładność pomiaru współczynnika wnikania masy w nieznacznym stopniu zależy od wartości współczynnika odbicia światła dla zdjęcia jodoskrobiowego. W przeprowadzonych obliczeniach błędu pomiaru wykorzystano największą wartość wyrażenia $\frac{1}{n_p} \frac{dn_p}{dR}$.

Współczynnik $\frac{1}{c_n} \frac{dc_n}{dT}$ określono w punkcie 2.3.:

$$\frac{1}{c_n} \frac{dc_n}{dT} = 0,084 \text{ deg}^{-1} .$$

Wykorzystując powyżej podane wartości obliczono maksymalny błąd pomiaru współczynnika wnikania masy. Dla doświadczeń, w których współczynnik odbicia światła określano za pomocą leukometru, błąd pomiaru wynosił:

$$\frac{\Delta k_c}{k_c} = 6,5 \% .$$

Jeżeli współczynnik odbicia światła określono za pomocą mikrofotometru, błąd pomiaru był znacznie większy i wynosił:

$$\frac{\Delta k_c}{k_c} = 19,3 \% .$$

2.8.3. Badanie wymiany masy przy przepływie płynu między równoległymi płytami

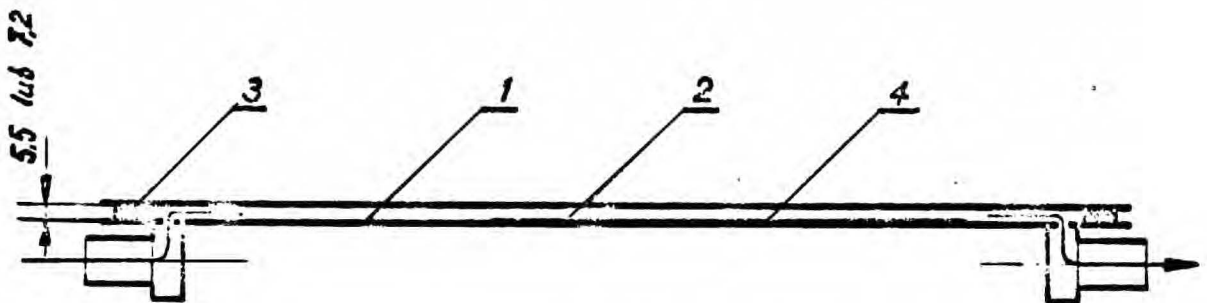
Pomiary wykonane w poziomym kanale przedstawionym schematycznie na rysunku 17. Przekrój poprzeczny kanału miał kształt prostokąta o szerokości 100 milimetrów i wysokości 5,5 lub 7,2 milimetra. Wymiary te pozwalają przyjąć, że w środkowej części kanału przepływ zachodził między równoległymi płytami. Dla takiego układu średnicę zastępczą i liczbę Reynoldsa definiuje się najczęściej w następujący sposób ^{89/}:

$$d_z = 2 \cdot h \quad ,$$

$$Re = \frac{V \cdot d_z}{\nu} \quad ,$$

gdzie h oznacza odległość między płytami.

Rys.17. Schemat kanału



- 1 - płyta z twardego polichlorku winylu zaopatrzona w otworki, które zapewniały dokładne przyleganie absorbentu
- 2 - płyta szklana dociskana za pomocą ściskaczy
- 3 - wymienna wkładka z twardego polichlorku winylu
- 4 - absorbent

wysokość kanału - 100 mm

Pasek absorbentu o szerokości 110 milimetrów i długości 13 razy większej od średnicy zastępczej umieszczano na dnie kanału. Przednia krawędź paska znajdowała się w odległości równej 25 średnicom zastępczym od miejsca wlotu powietrza do kanału.

Wymianę masy zbadano dla punktu leżącego na osi symetrii kanału i znajdującego się w odległości równej 10 średnicom zastępczym od przedniej krawędzi absorbentu. Na podstawie pomiarów współczynnika odbicia światła dla uzyskanych zdjęć jedoskrobiowych określono ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu, które wykorzystano do obliczenia lokalnych wartości współczynnika ^{wzrostania/} masy i liczby Sherwooda.

W obliczeniach uwzględniono zmianę stężenia par jodu w strumieniu powietrza na skutek absorpcji na powierzchni absorbentu. W tym celu wykonano pomiary współczynnika odbicia światła wzdłuż osi symetrii zdjęcia i obliczone ilości jodu zaabsorbowanego na powierzchni zdjęcia.

Wyniki pomiarów umieszczono w tabeli 16. Na rysunku 18 przedstawiono zależność liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa przy przepływie płynu między równoległymi płytami.

Dla przepływu burzliwego uzyskano następującą zależność:

$$Sh_{100} = 0,023 Re^{0,8} So^3$$

Równanie to opisuje wymianę masy poza obszarem stabilizacji hydrodynamicznej i stężeniowej, tak jak były wykonane pomiary.

Dla liczb Reynoldsa poniżej 4500 występuje obszar przejściowy przepływu płynu. Przy liczbach Reynoldsa poniżej 2500 przepływ jest laminarny. Niewielka liczba pomiarów w tym zakresie nie pozwala na podanie zależności ilościowej.

Znaczenie symboli użytych w tabeli 16.

d_z - średnica zastępcza kanału ,

V_t - natężenie przepływu objętościowe ,

p - ciśnienie w punkcie pomiaru ,

t - czas trwania doświadczenia ,

ν - współczynnik lepkości kinematycznej ,

D - współczynnik dyfuzji ,

Re - liczba Reynoldsa ,

c_o - stężenie par jodu w strumieniu powietrza w punkcie nad przednią krawędzią zdjęcia ,

n_o - ilość jodu wprowadzonego do kanału w czasie trwania doświadczenia ,

n_{ps} - średnia ilość jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni zdjęcia dla linii na osi symetrii zdjęcia ,

n_g - ilość jodu zaabsorbowanego na powierzchni zdjęcia ,

α - stopień absorpcji par jodu ze strumienia powietrza ,

c - stężenie par jodu w strumieniu powietrza w punkcie pomiaru ,

n_{pk} - ilość jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni zdjęcia w punkcie pomiaru ,

k_{Cl_2} - współczynnik wnikania masy ,

Sh_{loc} - liczba Sherwooda .

Tabela 16.

część 1.

Zależność liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa przy przepływie płynu między równoległymi płytami

$$d_s = 11,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Nr	$V_t \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$p \cdot 10^{-3}$ $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	t s	$\gamma \cdot 10^6$ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$D \cdot 10^6$ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Re	$c_o \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	$n_o \cdot 10^9$ kmol	$n_{ps} \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	$n_s \cdot 10^9$ kmol	α %	$\sigma \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	$n_{pk} \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	$k_o \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Sh ₁₀₀ —
1	1,17	100,8	300	15,39	8,14	1518	19,92	7,02	43,4	0,45	7,0	18,53	34,7	6,24	8,43
2	1,34	100,8	300	15,39	8,14	1740	19,90	7,98	49,9	0,55	6,9	18,53	40,1	7,21	9,74
3	1,51	100,8	300	15,39	8,14	1962	19,84	9,00	52,8	0,58	6,5	18,55	41,9	7,53	10,17
4	1,67	100,8	300	15,39	8,14	2180	19,82	9,96	54,8	0,60	6,1	18,61	43,8	7,85	10,61
5	2,02	100,8	300	15,39	8,14	2620	19,74	11,94	61,0	0,67	5,6	18,63	47,8	8,55	11,56
6	2,34	100,8	300	15,39	8,14	3050	19,94	5,60	29,3	0,32	5,8	18,78	25,0	11,09	14,98
7	2,68	100,8	120	15,39	8,14	3480	19,92	7,40	34,0	0,37	5,8	18,76	30,1	13,37	18,07
8	3,01	100,8	120	15,39	8,14	3920	19,90	7,20	39,0	0,43	6,0	18,71	34,9	15,54	21,0
9	3,35	100,8	120	15,39	8,14	4350	19,86	8,00	41,7	0,46	5,7	18,73	37,5	16,68	22,5
10	3,78	100,9	120	15,36	8,12	4900	19,86	9,00	47,4	0,52	5,8	18,71	43,4	19,33	26,2
11	4,19	100,9	120	15,36	8,12	5450	19,84	9,98	51,6	0,57	5,7	18,71	47,0	20,9	28,3
12	4,71	100,9	120	15,36	8,12	6110	19,80	11,18	54,5	0,60	5,4	18,73	50,0	22,2	30,1
13	5,36	101,1	120	15,34	8,12	6990	19,76	12,72	60,9	0,67	5,3	18,71	56,2	25,0	33,9
14	6,06	101,1	120	15,34	8,12	7880	19,68	14,30	65,9	0,73	5,1	18,68	61,9	27,6	37,4
15	6,70	101,1	120	15,34	8,12	8720	19,84	15,96	67,8	0,75	4,7	18,99	63,9	28,0	38,0
16	7,56	101,2	120	15,32	8,11	9840	19,72	17,90	73,3	0,80	4,5	18,83	70,3	31,1	42,2
17	8,38	101,3	120	15,31	8,10	10950	19,76	19,88	80,3	0,88	4,4	18,89	75,4	33,3	45,2
18	9,13	101,5	120	15,29	8,09	12050	19,74	21,6	84,3	0,93	4,3	18,89	80,5	35,5	48,3
19	10,08	101,5	120	15,29	8,09	13180	19,66	23,8	85,9	0,95	4,0	18,87	82,8	36,6	49,7
20	10,91	101,6	120	15,26	8,08	14280	19,64	25,7	96,2	1,06	4,1	18,83	90,0	39,8	54,2

Tablica 16.

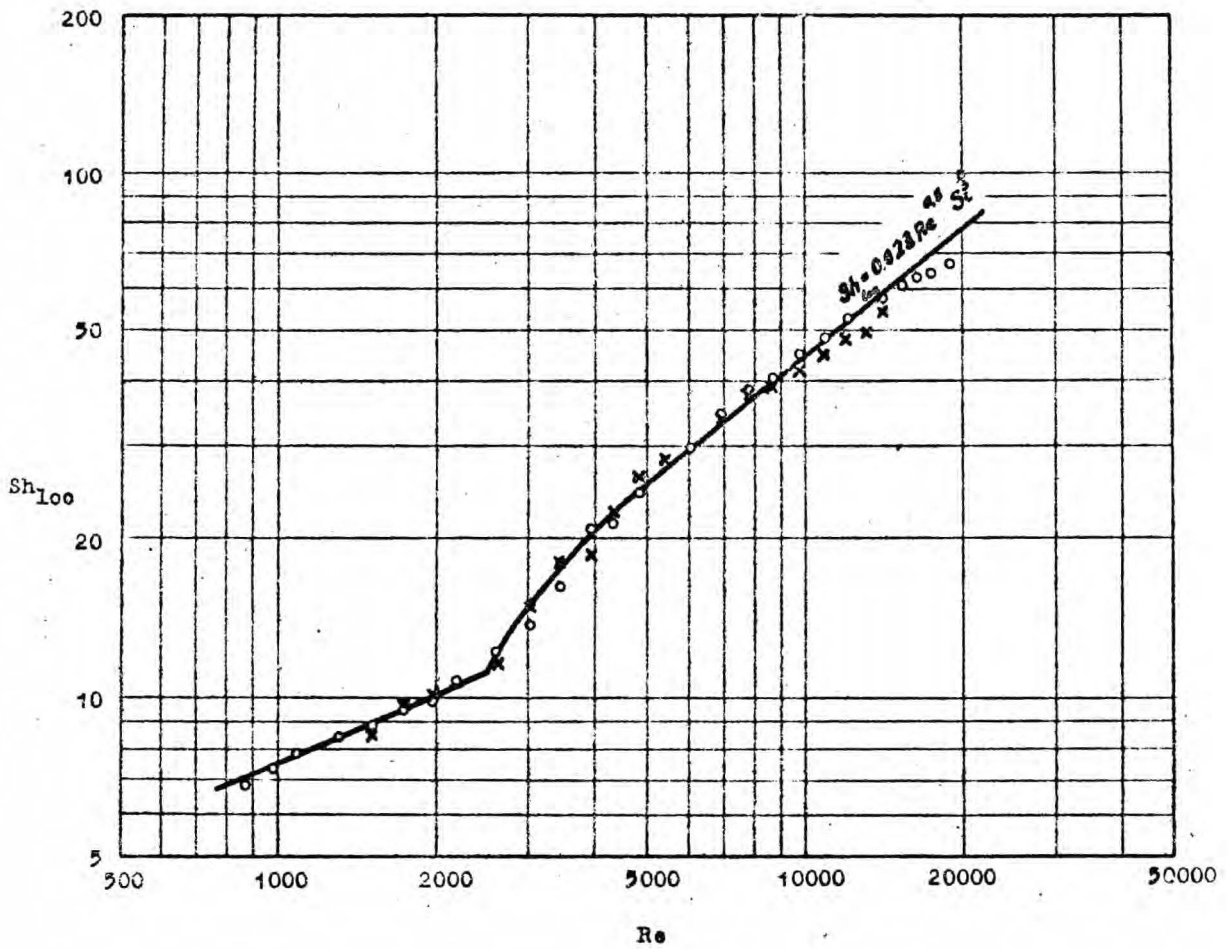
część 2-

Zależność liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa przy przepływie płynu między równoległymi płytami

$$d_s = 14,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Nr	$v_t \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$p \cdot 10^{-3}$ $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	t s	$\gamma \cdot 10^6$ $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	$D \cdot 10^6$ $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Re	$\sigma_o \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	$n_o \cdot 10^9$ kmol	$n_{ps} \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	$n_s \cdot 10^9$ kmol	α %	$\sigma \cdot 10^3$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	$n_{pk} \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	$k_o \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Sh_{100}
1	0,67	100,7	300	15,40	8,15	870	19,94	4,02	27,3	0,39	9,8	17,99	20,9	3,87	6,83
2	0,76	100,7	300	15,40	8,15	980	19,94	4,56	29,6	0,43	9,3	18,09	22,6	4,16	7,35
3	0,83	100,7	300	15,40	8,15	1090	19,92	4,98	30,9	0,45	8,9	18,15	24,5	4,50	7,99
4	1,00	100,8	300	15,39	8,14	1310	19,94	6,00	34,2	0,49	8,2	18,31	26,2	4,77	8,44
5	1,17	100,8	300	15,39	8,14	1520	19,92	7,02	35,4	0,51	7,3	18,47	28,6	5,05	8,93
6	1,34	100,8	300	15,39	8,14	1740	19,90	7,98	38,6	0,56	7,0	18,51	30,6	5,51	9,74
7	1,51	100,8	300	15,39	8,14	1960	19,84	9,00	39,4	0,57	6,3	18,56	31,4	5,63	9,96
8	1,69	100,8	300	15,39	8,14	2180	19,82	10,02	42,0	0,61	6,0	18,63	37,0	6,08	10,76
9	2,02	100,8	300	15,39	8,14	2620	19,74	11,94	48,1	0,69	5,8	18,60	38,7	6,94	12,27
10	2,34	100,8	120	15,39	8,14	3050	19,94	5,60	20,6	0,30	5,3	18,88	17,5	7,72	13,66
11	2,67	100,8	120	15,39	8,14	3480	19,92	6,42	24,1	0,35	5,4	18,84	20,6	9,11	16,11
12	3,01	100,8	120	15,39	8,14	2920	19,92	7,20	25,9	0,39	5,4	18,84	23,8	10,52	18,61
13	3,35	100,8	120	15,39	8,14	4350	19,90	8,00	29,7	0,43	5,4	18,83	27,2	12,03	21,3
14	3,77	100,9	120	15,36	8,12	4900	19,90	9,00	33,5	0,48	5,4	18,83	31,1	13,78	24,4
15	4,19	100,9	120	15,36	8,12	5450	19,84	9,98	37,6	0,54	5,4	18,77	34,3	15,23	27,0
16	4,70	100,9	120	15,36	8,12	6110	19,82	11,18	40,9	0,59	5,3	18,77	37,9	16,82	29,8
17	5,37	100,9	120	15,36	8,12	6990	19,74	12,72	47,0	0,68	5,3	18,68	43,2	19,25	34,1
18	6,04	101,1	120	15,34	8,12	7880	19,72	14,30	50,7	0,73	5,1	18,71	48,6	21,6	38,4
19	6,70	101,1	120	15,34	8,12	8730	19,84	15,92	53,8	0,76	4,7	18,91	51,3	22,6	40,1
20	7,54	101,2	120	15,33	8,11	9830	19,82	17,92	60,1	0,87	4,8	18,87	57,6	25,4	45,2
21	8,39	101,2	120	15,33	8,11	10930	19,76	19,90	64,8	0,93	4,7	18,83	62,1	27,5	48,8
22	9,23	101,3	120	15,31	8,10	12040	19,76	21,9	71,3	1,03	4,7	18,83	66,8	29,6	52,5
23	10,06	101,5	120	15,29	8,09	13160	19,72	23,8	73,0	1,05	4,4	18,85	70,1	31,0	55,1
24	10,90	101,6	120	15,26	8,08	14270	19,68	25,8	76,4	1,10	4,3	18,83	72,8	32,2	57,4
25	11,76	101,6	120	15,26	8,08	15400	19,62	27,7	80,3	1,16	4,2	18,80	76,9	34,1	60,7
26	12,60	101,9	120	15,23	8,06	16530	19,58	29,6	81,8	1,18	4,0	18,80	79,9	35,4	63,3
27	13,43	102,0	120	15,20	8,04	17650	19,54	31,3	84,1	1,22	3,9	18,78	81,1	36,0	64,4
28	14,25	102,1	120	15,90	8,04	18890	19,46	33,3	86,9	1,25	3,8	18,72	84,0	37,4	67,0

Rys. 18. Zależność liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa przy przepływie płynu między równoległymi płytami



x - $d_z = 11,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

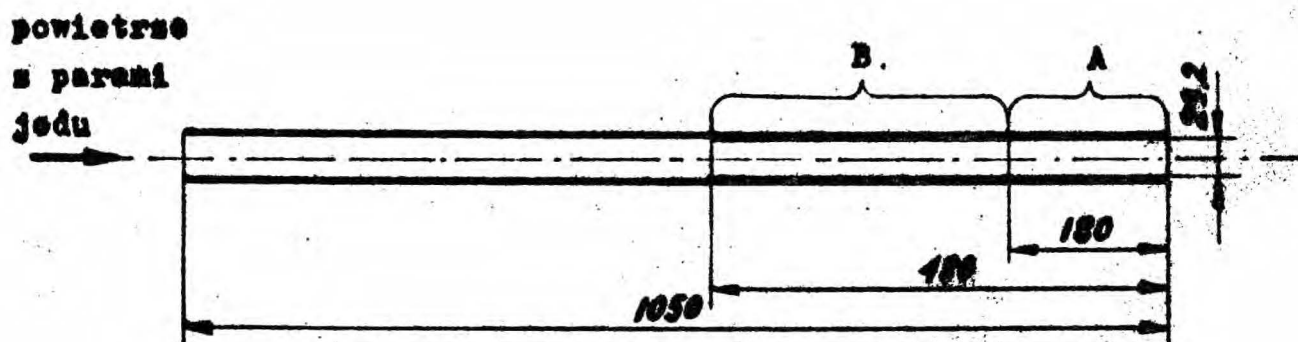
o - $d_z = 14,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

2.8.4. Badanie wymiany masy na odcinku stabilizacji stężeniowej przy przepływie płynu przez rurę

Wymiana masy na odcinku tworzenia się stężeniowej warstwy przyściennej jest bardziej intensywna niż przy przepływie ustabilizowanym. Chociaż przypadek ten jest często spotykany w technice, dotychczas nie był przedmiotem obszerniejszych badań.

Badanie wymiany masy na odcinku stabilizacji stężeniowej wykonane w rurze szklanej o średnicy wewnętrznej 29,2 milimetra i długości 1050 milimetrów. W doświadczeniach użyto paski bibuły o szerokości 90 milimetrów i długości 480 milimetrów. Część paska o długości 180 milimetrów nasycono na całej szerokości roztworem skrobi i jodku kadmowego i następnie pasek umieszczono w rurze w sposób przedstawiony na rysunku 19.

Rys. 19. Sposób umieszczenia absorbentu w rurze przy badaniu wymiany masy na odcinku stabilizacji stężeniowej



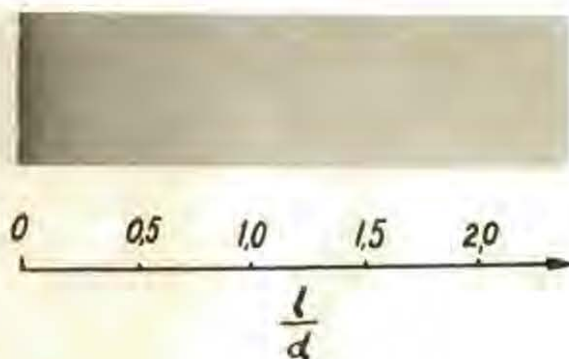
A - absorbent

B - bibuła nie nasycona roztworem

Na początku absorbentu hydrodynamiczna warstwa przyścienna była w pełni wykształcona, natomiast stężeniowa warstwa przyścienna dopiero powstawała, wskutek czego wartości współczynnika wnikania masy były tu wyższe.

Pomiary wykonano dla pięciu wartości natężenia przepływu powietrza. Na rysunku 20. przedstawiono fotografię fragmentu zdjęcia uzyskanego w doświadczeniu numer 3. Otrzymane zdjęcia fotometrowano za pomocą mikrofotometru. Zmierzone współczynniki odbicia światła wykorzystano do określenia lokalnych współczynników wnikania masy i lokalnych wartości liczby Sherwooda. Ponieważ stężenie par jodu w strumieniu powietrza nieznacznie zmieniało się na skutek absorpcji na powierzchni absorbentu, poprawki tej nie uwzględniono w obliczeniach. Wyniki pomiarów umieszczono w tablicach 17. i 18. Na rysunku 21. przedstawiono zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od długości odcinka stabilizacji stężeniowej.

Rys. 20. Zdjęcie obrazujące wymianę masy na odcinku stabilizacji stężeniowej



Tablica 17.

Charakterystyka pomiarów wymiany masy na odcinku stabilizacji stężeniowej

Warunki pomiaru :

$$d = 29,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} , \quad D = 15,51 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} ,$$

$$b = 100,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} , \quad D = 8,21 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} .$$

Nr	$V_t \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Re	t s	$c \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$
1	0,50	1410	480	19,97
2	1,02	2870	240	19,92
3	2,02	5680	120	19,74
4	4,20	11810	120	19,87
5	8,40	23600	120	19,92

Tablica 18.

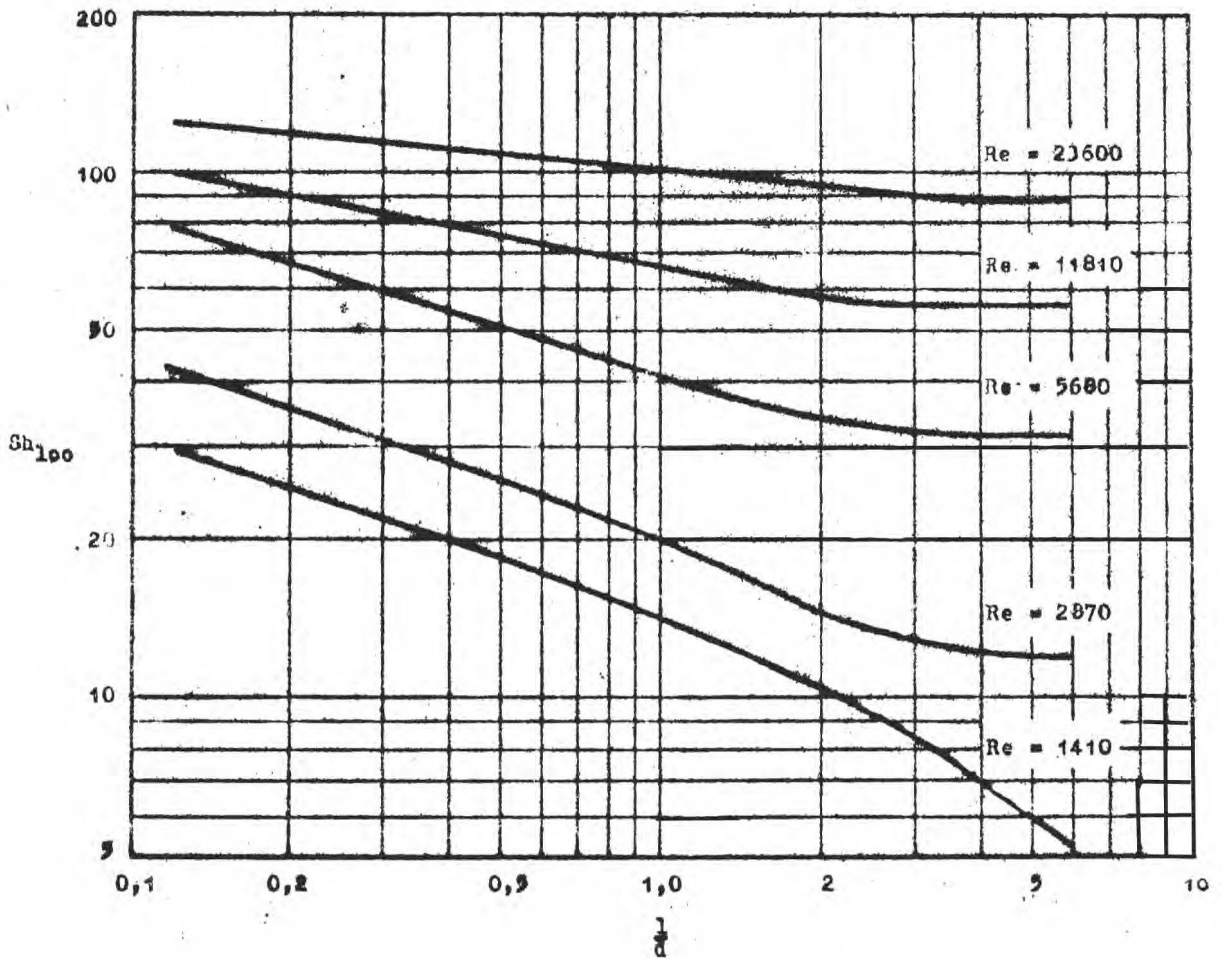
Zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od
długości odcinka stabilizacji stężeniowej

l - długość odcinka stabilizacji stężeniowej

d - średnica rury

$1 \cdot 10^3$	$\frac{l}{d}$	numer pomiaru									
		1		2		3		4		5	
		$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{100} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{100} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{100} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{100} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{100} -
4	0,14	73	27,4	54	40,8	50	76	66	100	81	122
6	0,21	66	24,8	46	34,7	43	66	59	89	79	119
8	0,27	59	22,2	42	31,7	39	60	57	86	77	116
10	0,34	56	21,0	39	29,4	37	56	55	83	75	113
15	0,51	48	18,1	35	26,4	32	49	51	77	72	109
20	0,69	42	15,8	32	24,1	30	46	47	71	69	104
25	0,86	39	14,7	30	22,6	28	43	45	68	67	101
30	1,03	37	13,9	27	20,4	27	41	43	65	66	100
35	1,20	34	12,8	25	18,7	25	38	41	62	65	98
40	1,37	33	12,4	23	17,3	25	38	41	62	64	97
45	1,54	31	11,6	22	16,6	24	36	40	61	64	97
50	1,71	30	11,3	21	15,8	23	35	39	59	63	95
60	2,06	27	10,2	19	14,3	23	35	39	59	63	95
70	2,40	25	9,4	18	13,6	22	34	38	57	62	93
80	2,74	24	9,0	17	12,8	22	34	37	56	61	92
90	3,08	22	8,3	17	12,8	21	32	37	56	60	91
100	3,43	20	7,5	17	12,8	21	32	37	56	60	91
110	3,77	19	7,1	16	12,1	21	32	37	56	59	89
120	4,11	18	6,8	16	12,1	21	32	37	56	59	89
130	4,45	17	6,4	16	12,1	20	30	37	56	58	88
150	5,13	17	6,4	16	12,1	20	30	37	56	58	88

Rys. 21. Zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od długości odcinka stabilizacji stężeniowej



Tablica 19.

Wartości współczynników A i B w równaniu opisującym wymianę masy na odcinku stabilizacji stężeniowej:

$$Sh_{100} = A \left(\frac{1}{d} \right)^{-B}$$

Nr	Re	A	B
1	1410	14,5	0,33
2	2870	20,5	0,33
3	5680	41,3	0,30
4	11810	66,0	0,193
5	23600	101,0	0,105

Przeprowadzone pomiary wykazały, że w zakresie $0,1 < \frac{1}{d} < 2$ lokalną wartość liczby Sherwooda można wyrazić za pomocą równania :

$$Sh_{100} = A \left(\frac{1}{d} \right)^{-B}$$

gdzie A i B oznaczają współczynniki zależne od liczby Reynoldsa i liczby Schmidta. Wykonane pomiary są niewystarczające dla podania korelacji uwzględniającej te zależności. W tablicy 19. zamieszczono wartości współczynników A i B dla poszczególnych pomiarów. Współczynnik B wzrasta ze zmniejszaniem się liczby Reynoldsa, osiągając dla przepływu laminarnego wartość równą $\frac{1}{3}$. Wartość tę przewiduje teoretyczne równanie wymiany masy przy przepływie laminarnym w rurach 11,90/:

$$Sh_{100} = 1,077 Re^{\frac{1}{3}} Sc^{\frac{1}{3}} \left(\frac{1}{d} \right)^{-\frac{1}{3}}$$

Po przedstawieniu wartości liczby Reynoldsa i liczby Schmidta charakteryzujących pomiar numer 1. otrzymuje się następującą zależność:

$$Sh_{loc} = 16,2 \left(\frac{l}{d} \right)^{-\frac{1}{3}}.$$

Równanie uzyskane na drodze doświadczalnej:

$$Sh_{loc} = 14,5 \left(\frac{l}{d} \right)^{-\frac{1}{3}}$$

daje wyniki o 10,5 procent niższe.

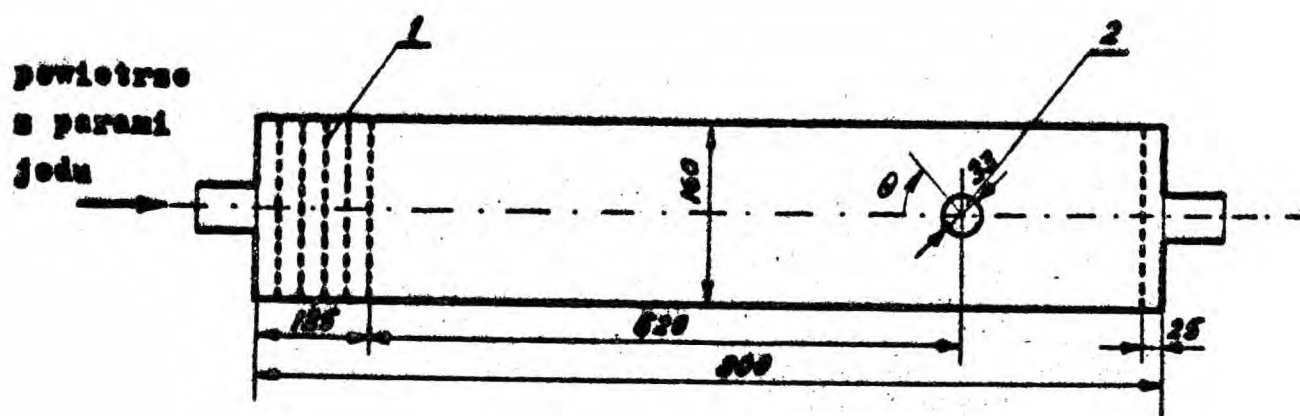
Przeprowadzone pomiary wykazały dodatkowo, że przy przepływie burzliwym w rurze stabilizacja stężeniowa jest praktycznie osiągnięta już w odległości $l = 5 \cdot d$ od przedniej krawędzi absorbentu. Wynik taki wskazuje poprawność założenia poczynionego w punkcie 2.7.1. na podstawie analogii wymiany ciepła i masy, że w odległości $l = 10 \cdot d$ od poprzedniej krawędzi absorbentu stężeniowa warstwa przyścienna jest w pełni wykształcona.

2.8.5. Badanie wymiany masy przy opływie walca

Wymiana masy przy opływie pojedynczego walca była przedmiotem licznych badań, w których wyznaczono lokalne i średnie wartości współczynnika wnikania masy 15, 18, 24, 38, 40, 41, 50, 91, 92/. Między uzyskanymi wynikami są duże rozbieżności na skutek znacznego wpływu intensywności i skali burzliwości strumienia na procesy wymiany masy przy opływie modeli. Dotychczasowe badania nie pozwalają na ilościowe opisanie tych zjawisk.

Badania wymiany masy przy opływie walca wykonano w układzie przedstawionym schematycznie na rysunku 22. W celu uzyskania strumienia powietrza o płaskim profilu prędkości w kanale umieszczono siatki wyrównawcze. Średnica oczek w siatkach wynosiła 2 milimetry.

Rys.22. Schemat układu, w którym badano wymianę masy przy opływie walca

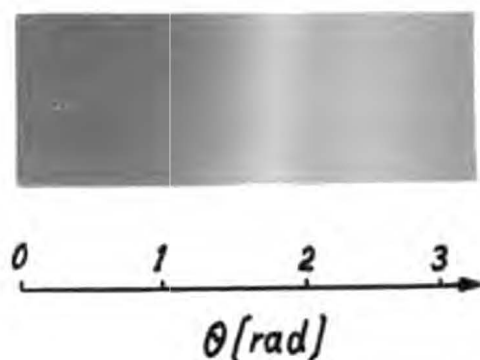


- 1 - siatki wyrównawcze
- 2 - badany walec

wysokość kanału - 100 mm

W pomiarach użyto walec o średnicy 33 milimetrów i długości 100 milimetrów. Badany walec pokrywano absorbentem i umieszczano w kanale prostopadle do kierunku przepływu powietrza. Otrzymane zdjęcia fotometrowano za pomocą mikrofotometru. Na rysunku 23. przedstawiono fotografię fragmentu zdjęcia uzyskanego w doświadczeniu numer 2.

Rys. 23. Zdjęcia obrazujące wymianę masy przy opływie walca



Liczbę Reynoldsa dla badanego układu zdefiniowano w następujący sposób:

$$Re = \frac{U \cdot d}{\nu} ,$$

gdzie :

U - prędkość przepływu powietrza obliczona dla pustego kanału,

d - średnica walca,

ν - lepkość kinematyczna powietrza .

Wyniki pomiarów umieszczono w tablicach 20. i 21. Na rysunku 24. przedstawiono zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od położenia na obwodzie walca.

Lokalna wartość liczby Sherwooda jest stosunkowo wysoka na powierzchni czołowej walca i maleje w miarę oddalania się od tego punktu. Na tylnej powierzchni walca wartości liczby Sherwooda są znowu wyższe. Przy wyższych wartościach liczby Reynoldsa liczba Sherwooda osiąga dwa minima. Zjawisko to występuje wtedy, gdy stopień burzliwości strumienia jest wysoki.

Tablica 20.

Charakterystyka pomiarów wymiany masy przy opływie walca

Warunki pomiaru :

$$d = 33,0 \cdot 10^{-3} \text{ m} , \quad \nu = 15,31 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} ,$$

$$b = 101,3 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} , \quad D = 8,10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} .$$

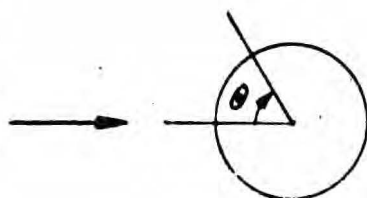
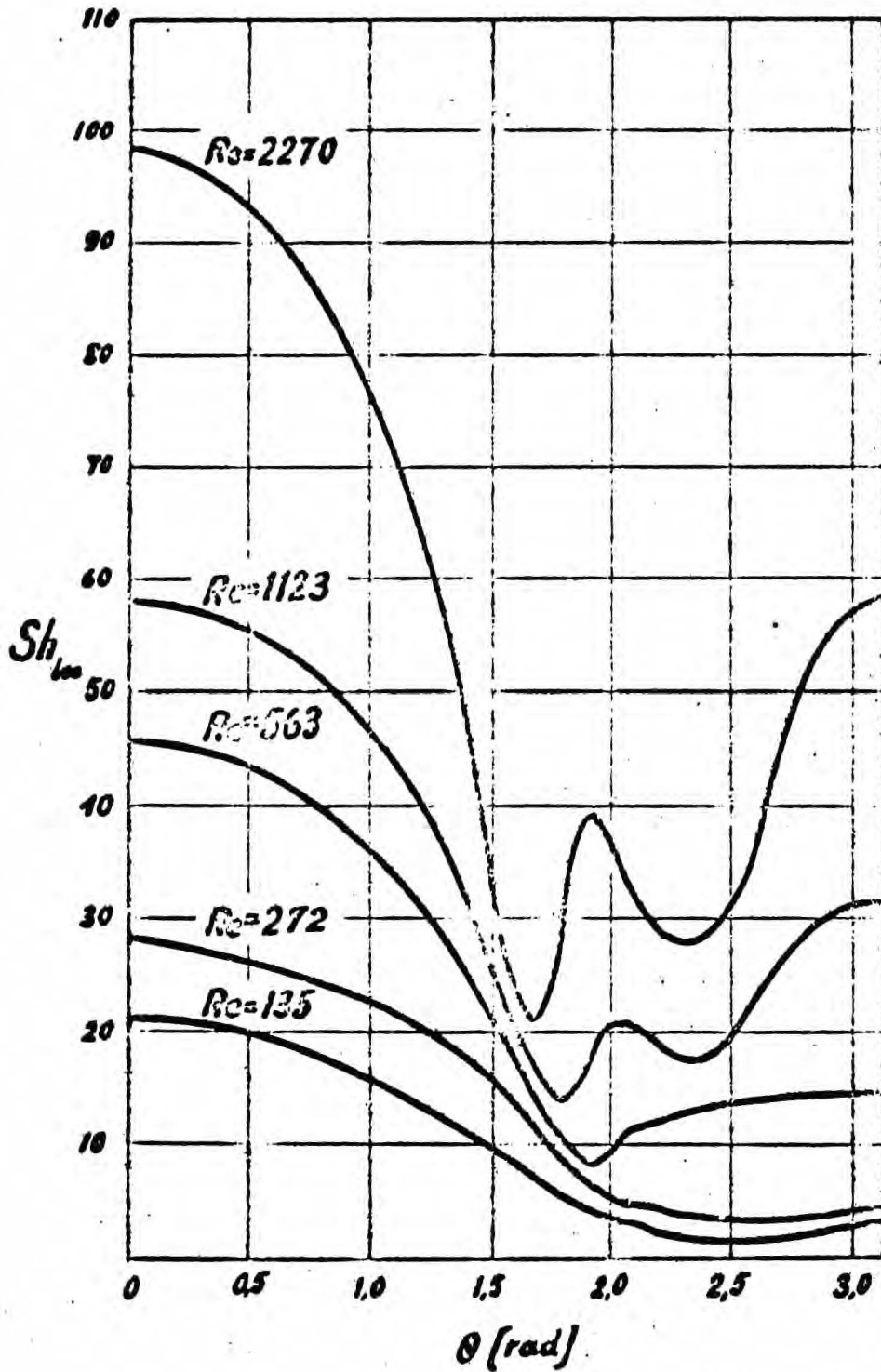
Nr	$V_t \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Re	t s	$c \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$
1	1,00	135	720	19,92
2	2,02	272	480	19,94
3	4,18	563	360	19,87
4	8,34	1123	240	19,92
5	16,82	2270	120	19,71

Tablica 21.

Zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od położenia na obwodzie walca

θ rad	numer pomiaru									
	1		2		3		4		5	
	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{100} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{100} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{100} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{100} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{100} -
0	75	21,3	64	27,2	54	46	68	58	58	100
0,12	75	21,3	64	27,2	53	45	68	58	57	98
0,24	74	21,0	63	26,8	53	45	67	57	56	96
0,36	72	20,4	62	26,4	52	44	66	56	55	95
0,48	70	19,9	61	26,0	51	44	64	55	54	93
0,61	68	19,3	60	25,5	50	43	64	55	53	91
0,73	66	18,7	59	25,1	48	41	62	53	51	88
0,85	64	18,2	58	24,7	46	39	60	51	47	81
0,97	61	17,3	57	24,3	44	38	58	49	45	78
1,09	58	16,5	56	23,8	42	36	54	46	41	71
1,21	55	15,6	54	23,0	39	33	50	43	37	64
1,33	52	14,8	53	22,6	36	31	42	36	33	57
1,45	44	12,5	48	20,4	32	27	32	27	25	43
1,58	39	11,1	44	18,7	24	21	22	19	15	26
1,70	33	9,4	37	15,8	27	15	16	14	12	21
1,82	25	7,1	32	13,6	12	11	16	14	17	29
1,94	17	4,8	24	10,2	9	8	21	18	23	40
2,06	12	3,4	16	6,8	10	9	25	21	19	33
2,18	10	2,8	11	4,7	14	12	22	19	17	29
2,30	9	2,6	9	3,8	15	13	21	18	16	28
2,42	9	2,6	9	3,8	16	14	21	18	17	29
2,55	9	2,6	9	3,8	16	14	24	21	18	30
2,67	9	2,6	9	3,8	16	14	29	25	24	41
2,79	9	2,6	9	3,8	16	14	33	28	28	48
2,91	10	2,8	9	3,8	17	15	35	30	32	55
3,03	11	3,1	10	4,3	17	15	37	32	34	59
3,14	11	3,1	11	4,7	17	15	37	32	34	59

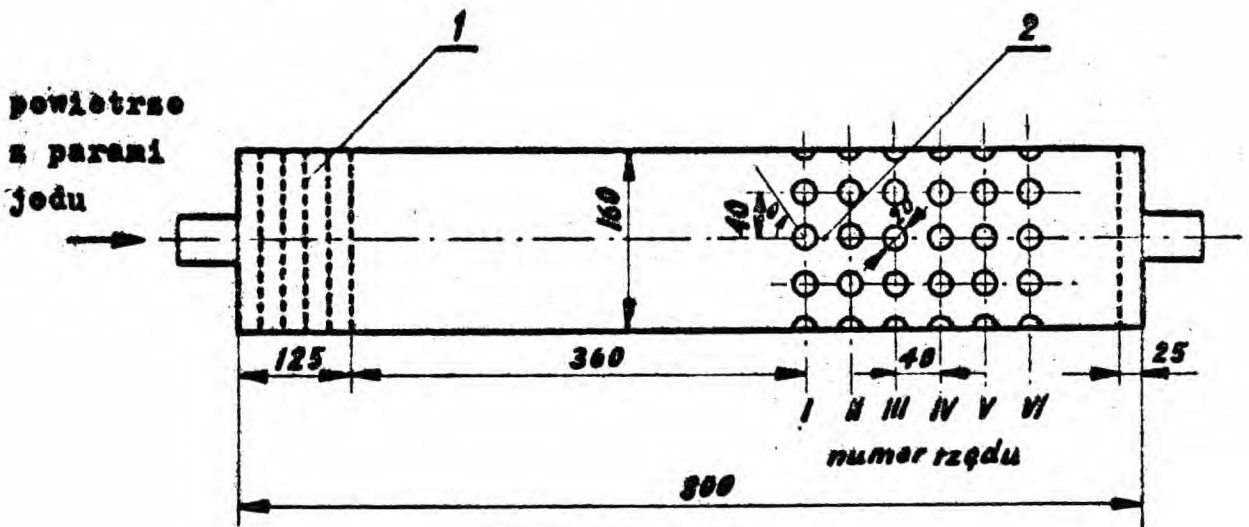
Rys. 24. Zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od położenia na obwodzie walca



2.8.6. Badanie wymiany masy przy opływie pęczka rur

Pęczki rur są powszechnie stosowanym układem w wymiennikach ciepła i dlatego układ ten był przedmiotem wielu badań, w oparciu o które opracowano szereg zależności empirycznych ^{38, 93 ÷ 95/}. Korzystając z analogii między zjawiskami wymiany ciepła i masy można wyciągnąć wnioski o procesie wymiany ciepła przy opływie pęczka rur badając proces wymiany masy.

Rys. 25. Schemat układu, w którym badano wymianę przy opływie pęczka rur



1 - siatki wyrównawcze

2 - badany szereg rur

wysokość kanału 100 mm

Badania wymiany masy przy opływie pęczka rur przeprowadzono w układzie przedstawionym schematycznie na rysunku 25. Pomiar wykonano dla środkowego szeregu rur, szeregi boczne umieszczono w celu wyeliminowania efektów brzegowych. Rurki znajdujące się w rzędach I ÷ V pokrywano absorbentem i następnie wykonano pomiar tak jak w poprzednich badaniach.

Rys. 26. Zdjęcie obrazujące wymianę masy przy opływie pęczka rur



Otrzymane zdjęcia fotometrowano za pomocą mikrofotometru.

Liczbę Reynoldsa dla badanego układu zdefiniowano za pomocą wzoru:

$$Re = \frac{U \cdot d}{\nu} ,$$

gdzie:

U - prędkość przepływu powietrza w miejscu, gdzie przekrój poprzeczny strumienia jest najmniejszy,

d - średnica rury .

W obliczeniach uwzględniono zmianę stężenia par jodu w strumieniu powietrza na skutek absorpcji na powierzchni absorbentu pokrywającego rurki poprzednich rzędów. Wyniki pomiarów umieszczono w tablicy 22. oraz w tablicy 22 - uzupełnienie. Na rysunku 27. przedstawiono zależność średniej wartości liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa przy opływie pęczka rur.

Przeprowadzone badania wykazały, że przy liczbach Reynoldsa poniżej 1000 wymiana masy jest najintensywniejsza dla pierwszego rzędu rurek. Średnie wartości liczby Sherwooda dla dalszych rzędów są niższe, ponieważ czołowe i tylne powierzchnie rurek biorą bardzo mały udział w procesie wymiany masy, gdyż praktycznie nie są omywane przez strumień płynu. Bardzo duży rozrzut wyników w omawianym zakresie wartości liczby Reynoldsa nie pozwala na wyznaczenie zależności liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa dla każdego z osobna rzędu rurek. Na rysunku 27. opisano jedną krzywą wymianę masy dla rzędów II-V.

Przy liczbach Reynoldsa w zakresie $2000 < Re < 3000$ wartości liczby Sherwooda są jednakowe dla wszystkich rzędów rurek. Korzystając z analogii między zjawiskami wymiany ciepła i masy uzyskane wyniki porównano z wartościami liczby Nusselta obliczonymi za pomocą wzorów podanych przez Colburna^{93/} i Michieje-
wa^{95/} i uzyskano zgodność rezultatów z dokładnością do 10 procent.

Tablica 22.

Zależność liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa przy opływie pęczka rur

Warunki pomiaru:

$$d = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m} ,$$

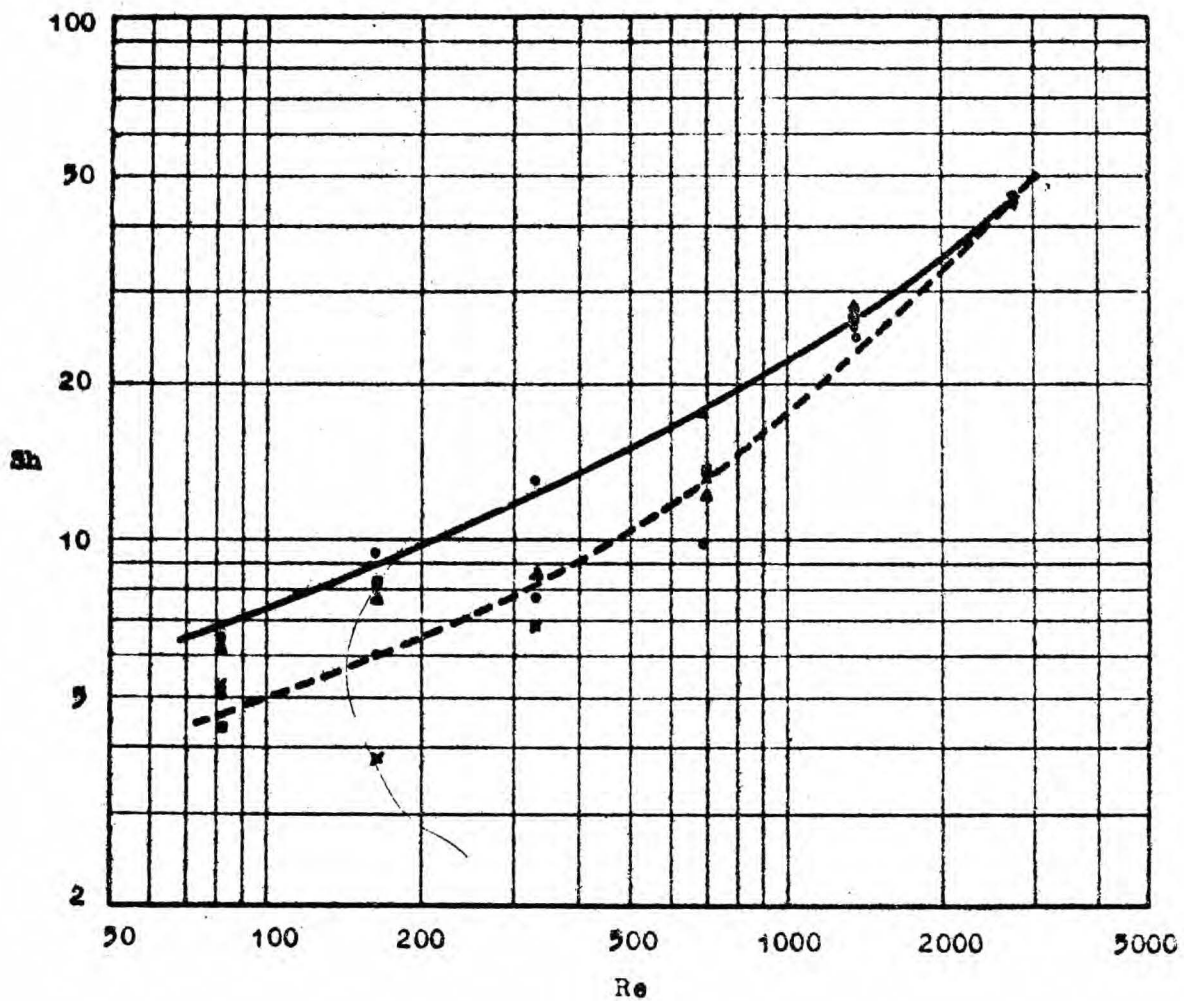
$$\rho = 15,31 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} ,$$

$$b = 101,3 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} ,$$

$$D = 8,10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} .$$

Nr pom.	$v_t \cdot 10^3$ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Re	t s	numer rzędu									
				I		II		III		IV		V	
				$c \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	Sh	$c \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	Sh	$c \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	Sh	$c \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	Sh	$c \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$	Sh
1	0,50	82	1110	19,97	6,4	18,63	5,0	17,63	5,3	16,63	6,4	15,48	4,4
2	1,00	163	720	19,92	9,3	18,97	6,0	18,39	3,8	18,03	7,8	17,31	8,4
3	2,02	330	480	19,94	13,0	19,27	7,6	18,90	6,8	18,57	8,7	18,16	8,6
4	4,18	683	360	19,87	17,5	19,44	9,8	19,22	13,0	18,91	12,1	18,62	13,6
5	8,34	1362	240	19,92	25,9	19,61	24,3	19,32	28,0	18,99	28,4	18,61	27,8
6	16,83	2750	120	19,71	46,1	19,43	45,0	19,16	46,0	18,89	46,0	18,62	45,7

Rys. 27. Zależność liczby Sherwooda od liczby Heynoldsa przy opływie pęczka rur



numer rzędu

I	-	•	}	—
II	-	○		
III	-	x		
IV	-	△		
V	-	□		

Tablica 22 - uzupełnienie ,

pomiar 1.

Zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od położenia na obwodzie rury przy opływie pęczka rur

r	numer rzędu									
	I		II		III		IV		V	
	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -
0	104	11,5	17	2,0	18	2,3	17	2,3	10	1,4
0,2	103	11,4	22	2,6	22	2,8	27	3,6	15	2,2
0,4	99	11,0	37	4,4	37	4,7	44	5,9	30	4,3
0,6	96	10,7	48	5,7	55	6,9	62	8,3	42	6,0
0,8	90	10,0	58	6,9	61	7,1	75	10,0	54	7,8
1,0	82	9,1	64	7,6	67	8,5	80	10,7	54	7,8
1,2	76	8,5	69	8,2	66	8,3	88	11,8	41	7,3
1,4	64	7,1	69	8,2	63	8,0	80	10,7	44	6,3
1,6	57	6,3	65	7,8	57	7,2	71	9,5	37	5,3
1,8	40	4,5	63	7,5	42	5,3	57	7,6	27	3,9
2,0	27	3,0	46	5,5	28	3,5	41	5,5	16	2,3
2,2	16	1,8	23	2,7	18	2,3	37	5,0	11	1,6
2,4	16	1,8	20	2,4	18	2,3	16	2,1	10	1,4
2,6	20	2,2	15	1,8	29	3,7	13	1,7	11	1,6
2,8	30	3,3	17	2,0	40	5,1	17	2,3	22	3,2
3,0	38	4,2	27	3,2	46	5,8	37	5,0	37	5,3
3,14	39	4,3	38	4,5	46	5,8	32	4,3	41	5,9
śred.	-	6,4	-	5,0	-	5,3	-	6,4	-	4,4

Tablica 22 - uzupełnienie ,
pomiar 2.

Zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od położenia
na obwodzie rury przy opływie pęczka rur

Ø rad	numer rzędu									
	I		II		III		IV		V	
	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -
0	102	17,6	10	1,8	10	1,9	10	1,9	16	3,2
0,2	101	17,4	14	2,5	11	2,1	16	3,0	20	4,0
0,4	99	17,0	22	4,0	17	3,2	33	6,3	38	5,5
0,6	96	16,5	34	6,1	26	4,8	46	8,7	54	10,7
0,8	92	15,8	40	7,2	32	6,0	61	11,6	66	13,1
1,0	91	15,7	56	10,1	35	6,5	73	13,9	76	15,1
1,2	75	12,9	57	10,3	34	6,3	77	14,6	79	15,7
1,4	62	10,7	57	10,3	30	5,6	76	14,5	75	14,9
1,6	52	8,9	57	10,3	19	3,5	69	13,1	64	12,7
1,8	36	6,2	53	9,6	12	2,2	58	11,0	55	10,9
2,0	18	3,1	40	7,2	10	1,9	48	9,1	41	8,1
2,2	10	1,7	32	5,8	9	1,7	31	5,9	30	5,9
2,4	10	1,7	21	3,8	10	1,9	16	3,0	16	3,2
2,6	15	2,6	10	1,8	16	3,0	10	1,9	11	2,2
2,8	18	3,1	9	1,6	21	3,9	10	1,9	16	3,2
3,0	28	4,8	10	1,8	24	4,5	16	3,0	24	4,8
3,14	30	5,2	16	2,9	24	4,5	23	4,4	30	5,9
śred.	-	9,3	-	6,0	-	3,8	-	7,8	-	8,4

Tablica 22 - uzupełnienie,
pomiar 3.

Zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od położenia
na obszarze rury przy opływie pęczka rur

φ	numer rzędu									
	I		II		III		IV		V	
	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -
0	80	20,6	10	2,7	10	2,7	10	2,8	10	2,8
0,2	80	20,6	10	2,7	15	4,1	15	4,2	16	4,5
0,4	79	20,4	20	5,3	25	6,8	27	7,5	29	8,2
0,6	79	20,4	32	8,5	37	10,1	39	10,8	39	11,1
0,8	78	20,1	42	11,2	46	12,6	52	14,4	48	13,6
1,0	76	19,6	53	14,2	52	14,2	57	15,8	56	15,9
1,2	73	18,8	56	15,0	47	12,8	58	16,1	55	15,6
1,4	68	17,5	55	14,7	39	10,6	57	15,8	52	14,7
1,6	61	15,7	48	12,8	32	8,7	51	14,1	41	11,6
1,8	57	14,7	35	9,3	18	4,9	39	10,8	31	8,8
2,0	37	9,5	20	5,3	10	2,7	27	7,5	19	5,4
2,2	24	6,2	10	2,7	9	2,5	15	4,2	10	2,8
2,4	11	2,8	9	2,4	10	2,7	10	2,8	10	2,8
2,6	10	2,6	11	2,9	12	3,3	10	2,8	15	4,3
2,8	10	2,6	17	4,5	17	4,6	15	4,2	18	5,1
3,0	14	3,6	21	5,6	18	4,9	17	4,7	25	7,1
3,14	17	4,4	22	5,9	18	4,9	24	6,6	30	8,5
śred.	-	13,0	-	7,6	-	6,8	-	8,7	-	8,6

Tablica 22 - uzupełnienie ,
pomiar 4 .

Zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od położenia
na obwodzie rury przy opływie pęczka rur

φ rad	numer rzędu									
	I		II		III		IV		V	
	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh _{loc}	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh _{loc}	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh _{loc}	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh _{loc}	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh _{loc}
0	102	35,3	10	3,5	16	5,7	24	8,3	31	11,4
0,2	99	34,3	12	4,2	22	7,9	30	10,4	37	16,7
0,4	93	32,2	16	5,6	38	13,6	42	14,4	48	17,7
0,6	90	31,1	21	7,4	54	19,3	55	19,0	57	21,0
0,8	88	30,4	33	11,6	61	21,8	61	21,0	62	22,9
1,0	80	27,7	39	13,8	63	22,5	63	21,7	66	24,4
1,2	74	25,6	48	16,9	61	21,8	60	20,7	62	22,9
1,4	59	20,4	52	18,4	57	20,3	53	18,3	58	21,4
1,6	48	16,6	47	16,6	44	15,7	39	13,5	48	17,7
1,8	30	10,4	39	13,8	31	11,1	25	8,6	35	12,9
2,0	15	5,2	30	10,6	19	6,8	13	4,5	18	6,6
2,2	14	4,8	16	5,6	16	5,7	10	3,5	15	5,5
2,4	16	5,5	13	4,6	17	6,1	18	6,2	16	5,9
2,6	16	5,5	16	5,6	19	6,8	19	6,6	18	6,6
2,8	16	5,5	18	6,3	25	8,9	24	8,3	22	8,1
3,0	15	5,2	23	8,1	32	11,4	25	8,6	30	11,1
3,14	15	5,2	29	10,2	34	12,1	25	8,6	32	11,8
śred.	-	17,5	-	9,8	-	13,0	-	12,1	-	13,6

Tablica - 22 - uzupełnienie ,
pomiar 5 .

Zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od położenia
na obwodzie na obwodzie rury przy opływie pęczka rur

θ	numer rzędu									
	I		II		III		IV		V	
	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -
0	80	41,4	25	13,2	36	19,2	34	18,5	38	21,0
0,2	79	40,8	31	16,3	42	22,4	41	22,3	44	24,3
0,4	79	40,8	40	21,0	58	30,9	59	32,0	57	25,9
0,6	78	40,3	59	31,0	73	38,9	76	41,3	80	44,2
0,8	77	39,8	73	38,4	80	42,6	81	44,0	90	49,7
1,0	75	38,8	79	41,6	87	46,4	87	47,2	82	45,3
1,2	70	36,2	79	41,6	80	42,6	89	48,3	78	43,1
1,4	59	30,5	71	37,3	85	45,3	78	42,2	72	39,7
1,6	44	22,7	57	30,0	67	35,7	62	33,7	66	36,4
1,8	23	17,1	37	19,5	53	28,3	48	26,1	39	21,5
2,0	18	9,3	25	13,2	34	18,1	24	13,0	22	12,1
2,2	19	9,8	23	112,1	20	10,7	24	13,0	24	13,2
2,4	25	12,9	25	13,2	26	13,9	25	13,6	25	13,8
2,6	28	14,5	31	16,3	28	14,9	25	13,6	28	15,5
2,8	30	15,5	37	19,5	31	16,5	34	18,5	34	18,8
3,0	31	16,0	39	20,5	38	20,3	41	22,3	37	20,4
3,14	33	17,1	39	20,5	40	21,3	54	29,3	39	21,5
śred.	-	25,9	-	24,3	-	28,0	-	28,4	-	27,8

Tablica 22 - uzupełnienie ,
 pomiar 6 .

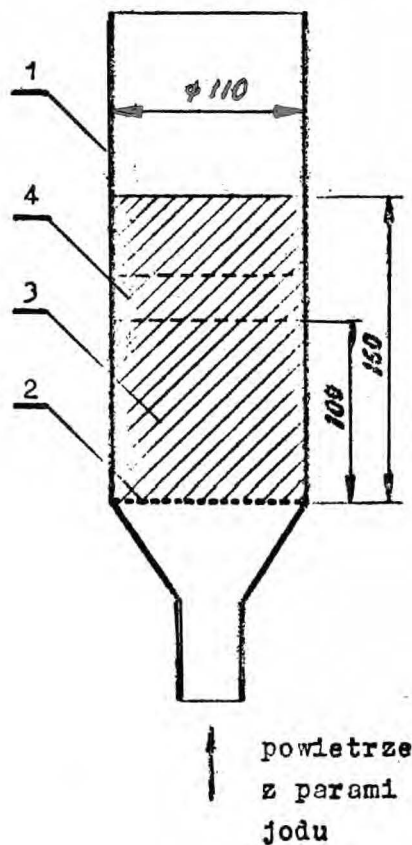
Zależność lokalnej wartości liczby Sherwooda od położenia
 na obwodzie rury przy opływie pęcska rur

rad	numer rzędu									
	I		II		III		IV		V	
	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2}$	Sh_{loc} -
0	64	66,8	31	32,6	33	35,1	32	34,9	34	37,6
0,2	63	65,8	32	33,6	39	41,5	39	42,5	37	41,0
0,4	63	65,8	40	42,0	53	56,4	46	50,1	46	50,9
0,6	62	64,7	57	59,9	59	62,8	61	66,5	56	62,0
0,8	61	63,7	59	62,0	64	68,2	66	71,9	59	65,3
1,0	59	61,6	64	67,2	65	69,2	67	73,0	61	67,5
1,2	57	59,5	65	68,3	63	67,1	65	70,9	60	66,4
1,4	54	56,4	63	66,2	59	62,8	59	64,3	57	63,1
1,6	48	50,1	54	56,8	54	57,5	53	57,8	48	53,1
1,8	33	34,4	42	44,1	40	42,6	33	36,0	30	33,2
2,0	17	17,7	28	29,4	25	26,6	20	21,8	22	24,4
2,2	25	26,1	24	25,2	23	24,5	23	25,1	24	26,6
2,4	27	28,2	24	25,2	23	24,5	20	21,8	23	25,5
2,6	24	25,1	25	26,3	23	24,5	23	25,1	27	29,9
2,8	30	31,3	33	34,6	30	32,0	29	31,6	36	39,9
3,0	34	35,5	39	41,0	35	37,3	36	39,2	38	42,1
3,14	35	36,5	43	45,2	38	40,5	39	42,5	38	42,1
śred.	-	46,1	-	45,0	-	46,0	-	46,0	-	45,7

2.8.7. Badanie wymiany masy przy przepływie płynu przez wypełnienie ziarniste*

Opracowana metoda oznaczania współczynników wnikania masy może być bardzo przydatna przy projektowaniu reaktorów kontaktowych, gdyż umożliwia określenie stopnia wykorzystania powierzchni kontaktu i właściwy dobór kształtu ziaren.

Rys. 28. Schemat układu, w którym badano wymianę masy przy przepływie płynu przez wypełnienie ziarniste.



- 1 - kolumna szklana
- 2 - siatka z twardego polichloroku winylu
- 3 - wypełnienie kolumny
- 4 - warstwa wypełnienia, w której umieszczono badane walce

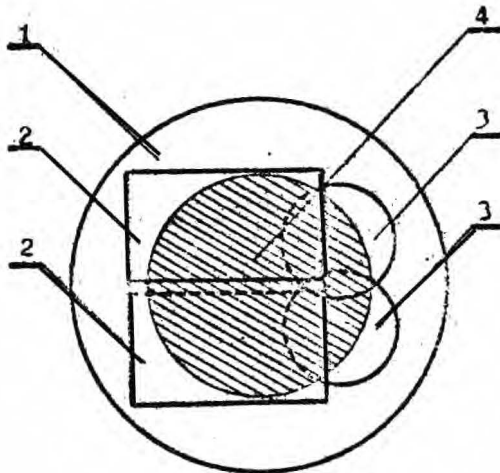
* Doświadczenia wykonał K. Arnold.

Badania wymiany masy przy przepływie płynu przez wypełnienie ziarniste wykonano w układzie przedstawionym schematycznie na rysunku 28. Jako wypełnienie użyto walce wykonane z twardego polichlorku winylu. Średnica walców wynosiła 20 milimetrów, wysokość również 20 milimetrów. W każdym doświadczeniu 5 walców pokrywano absorbentem i umieszczano w sposób przypadkowy wewnątrz warstwy wypełnienia. Pomiary wykonano tak jak w poprzednich badaniach. Na rysunku 29. przedstawiono fotografię zdjęcia /numer II/ uzyskanego w doświadczeniu numer 5.

Rys. 29. Zdjęcie obrazujące wymianę masy na powierzchni walca umieszczonego w warstwie wypełnienia



Rys. 30. Sposób umieszczenia fragmentów zdjęcia na stoliku pomiarowym leukometru



- 1 - stolik pomiarowy
- 2 - części paska zdjętego z powierzchni bocznej walca
- 3 - krążki zdjęte z podstaw walca
- 4 - powierzchnia fotometryczna

Otrzymane zdjęcia fotometryczano za pomocą leukometru. Na rysunku 30. przedstawiono sposób umieszczenia fragmentów na stoliku pomiarowym leukometru.* Pasek zdjęty z powierzchni bocznej walca/ dzielono na pół i fotometryczano razem z krążkami zdjętymi z podstaw. Pomiar wykonywano dwukrotnie zmieniając położenie fragmentów zdjęcia. W obliczeniach wykorzystano wartość średnią z obu odczytów.

* Posiadany mikrofotometr rejestrujący nie nadawał się do fotometryczania zdjęć uzyskanych w warstwie wypełnienia, ponieważ gradienty współczynnika odbicia światła były duże w porównaniu z możliwą szybkością przesuwu klina optycznego. Zastosowanie w badaniach leukometru obarcza pomiary błędem wynikającym z nieliniowego charakteru zależności $R = f/n_p/$.

Średnicę zastępczą i liczbę Reynoldsa dla badanego układu zdefiniowano w następujący sposób:

$$d_z = \sqrt{\frac{F}{\pi}} ,$$

$$Re = \frac{U \cdot d_z}{\nu} ,$$

gdzie:

F - powierzchnia elementu wypełnienia ,

U - prędkość liniowa przepływu powietrza liczona na pustą kolumnę.

Wyniki pomiarów umieszczono w tablicach 23. i 23 - uzupełnienie. Na rysunku 31. przedstawiono zależność liczby Sherwooda* od liczby Reynoldsa przy przepływie płynu przez wypełnienie ziarniste. Można ją wyrazić w postaci empirycznego równania:

$$Sh = 0,62 Re^{0,61} Sc^{\frac{1}{3}} .$$

Wprowadzając do podanej zależności współczynnik uwzględniający kształt elementów wypełnienia, który dla stosowanego wypełnienia równa się $\psi = 0,91^{96/}$, otrzymuje się następujące równanie:

$$Sh = 0,68 Re^{0,61} Sc^{\frac{1}{3}} .$$

Uzyskana zależność jest bardzo podobna do wzorów podanych przez Birda^{8/} i Bretsznajdera^{97/}:

$$Sh = 0,61 Re^{0,59} Sc^{\frac{1}{3}} \psi ,$$

$$Sh = 0,99 Re^{0,59} Sc^{\frac{1}{3}} \psi .$$

* Liczbę Sherwooda określono jako średnią dla pięciu walców.

Tablica 23.

Zależność liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa przy przepływie płynu przez wypełnienie ziarniste

Nr	$V_t \cdot 10^3$ $\frac{m^3}{s}$	$p \cdot 10^{-3}$ $\frac{N}{m^2}$	t s	$\rho \cdot 10^6$ $\frac{m^2}{s}$	$D \cdot 10^6$ $\frac{m^2}{s}$	Re	$c \cdot 10^9$ $\frac{kmol}{m^3}$	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{kmol}{m^2}$	Sh
1	0,76	98,7	120	15,77	8,34	126	19,95	12,7	15,6
2	1,53	99,1	120	15,77	8,34	255	19,87	18,0	22,2
3	3,05	98,7	120	15,77	8,34	508	19,95	27,7	34,0
4	4,76	99,2	120	15,77	8,34	792	19,84	34,3	42,3
5	9,25	100,8	120	15,47	8,19	1569	19,90	61,3	76,8
6	13,46	101,2	120	15,47	8,19	2280	19,82	65,7	82,5
7	16,87	101,6	120	15,47	8,19	2860	19,74	68,8	86,8

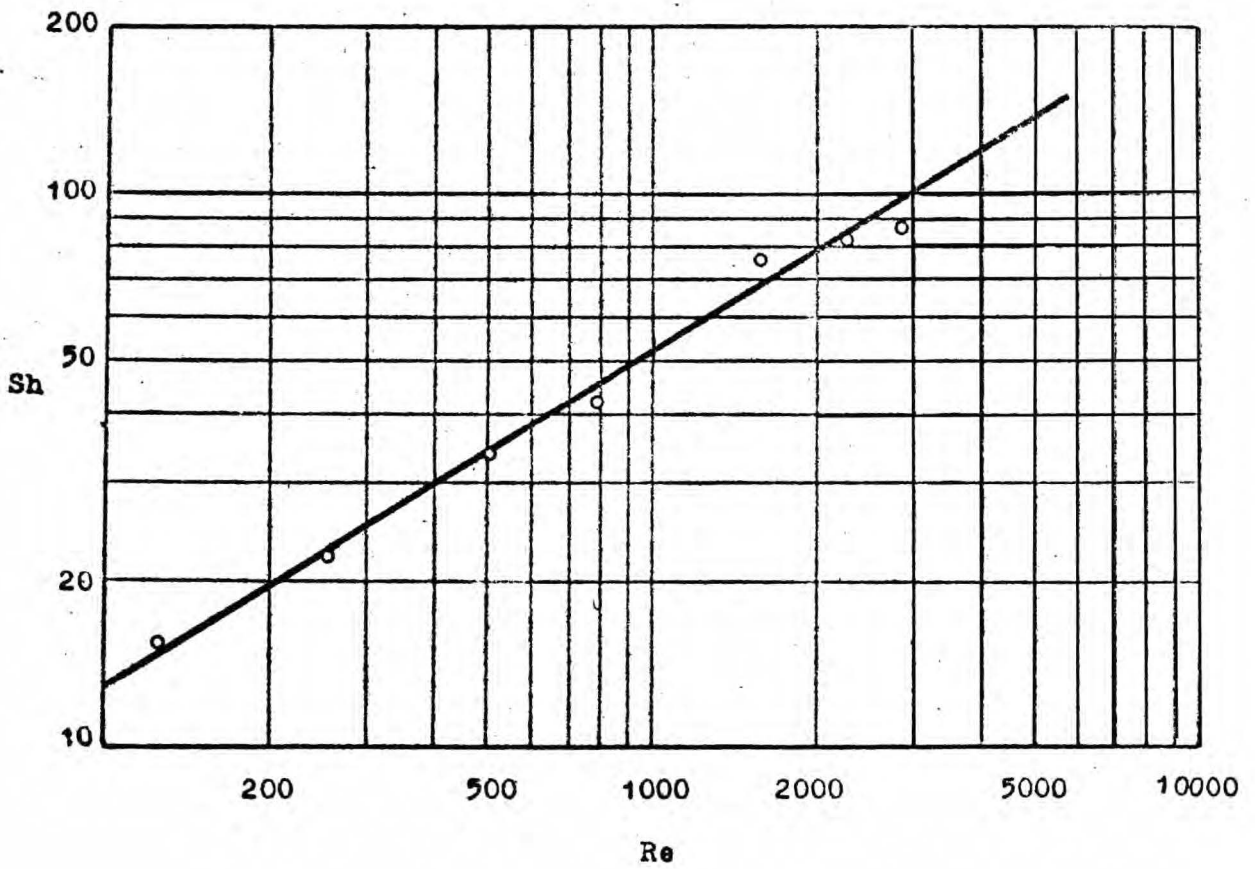
Tablica 23 - uzupełnienie

Wyniki pomiaru ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu dla zdjęć uzyskanych przy przepływie płynu przez wypełnienie ziarniste

Ilość jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu wyrażona jest w $10^{-9} \frac{kmol}{m^2}$.

numer walca	numer pomiaru						
	1	2	3	4	5	6	7
I	18,0	20,4	31,6	35,7	64,4	69,3	80,8
II	11,1	18,8	29,3	36,3	58,2	66,2	69,3
III	12,7	13,9	22,6	32,3	63,6	56,6	78,3
IV	11,8	17,0	27,4	34,7	52,0	75,5	49,2
V	10,1	19,8	27,7	32,7	68,2	61,0	66,2
śred.	12,7	18,0	27,7	34,3	61,3	65,7	68,8

Rys. 31. Zależność liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa przy przepływie płynu przez wypełnienie ziarniste

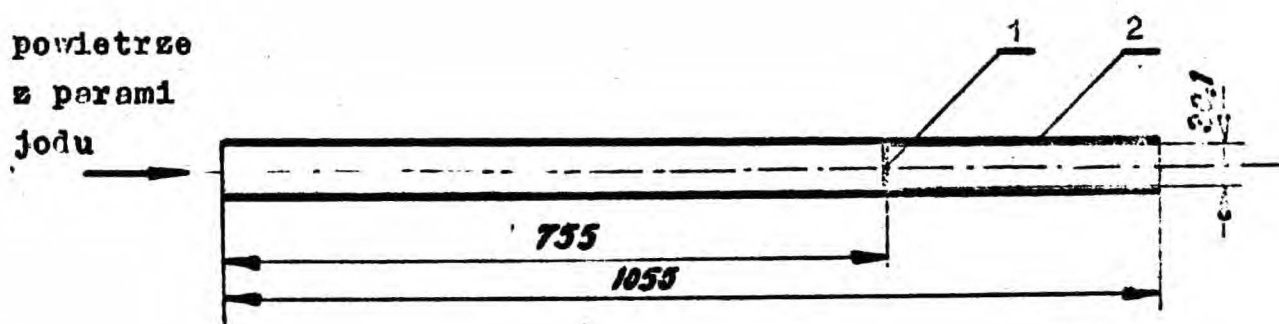


2.8.8. Badanie wymiany masy za siatką umieszczoną w rurze ¹

Siatki są bardzo często stosowane jako generatory burzliwości strumienia przy badaniu procesów wymiany ciepła i masy. Siatka umieszczona w strumieniu płynu tłumi częściowo burzliwość własną strumienia i jednocześnie wywołuje w strumieniu burzliwość charakterystyczną dla danej siatki. Ze wzrostem odległości od siatki zanika burzliwość wywołana przez siatkę i równocześnie rozwija się burzliwość własna strumienia. Wpływ siatki na proces wymiany jest wynikiem nakładania się tych efektów.

Badanie wpływu siatek na wymianę masy przy przepływie przez rurę wykonano w układzie przedstawionym schematycznie na rysunku 32. Na rysunku 33. przedstawiono fotografie stosowanych siatek.

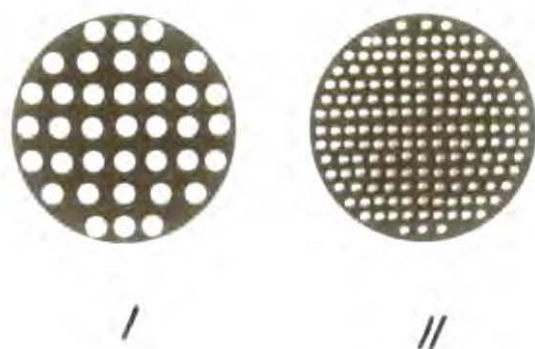
Rys. 32. Schemat układu, w którym badano wymianę masy za siatką umieszczoną w rurze



- 1 - siatka
- 2 - absorbent

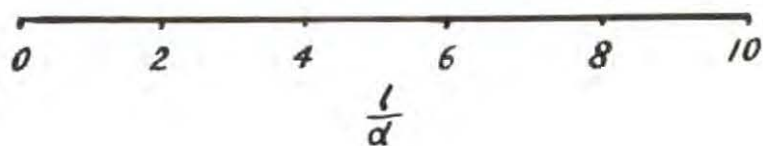
1/ Badania zostały wykonane na wniosek I. Mościckiej. Wyniki tych pomiarów zostaną porównane z rezultatami uzyskanymi w innym układzie.

Rys. 33. Siatki stosowane w przeprowadzonych badaniach



numer siatki	średnica oczka d_s /mm/	ilość oczek
I	3,0	35
II	1,5	165

Rys. 34. Zdjęcie obrazujące wymianę masy za siatką przy przepływie płynu przez rurę



Absorbent umieszczano bezpośrednio za siatką. Na rysunku 34. przedstawiono fotografię zdjęcia uzyskanego w doświadczeniu 1. /siatka I/. Pomiary wymiany masy wykonano dla kilku przekrojów znajdujących się w różnej odległości od siatki. Uzyskane wyniki zamieszczono w tablicach 24. i 25. oraz przedstawiono na rysunkach 35. i 36.

Wykonane pomiary wskazują, że wymiana masy jest bardzo intensywna bezpośrednio za siatką. Wartości liczby Sherwooda są tu znacznie wyższe od obliczonych ze wzoru Colburna. Ze wzrostem odległości od siatki wartość stosunku $\frac{Sh}{Sh_{Colb.}}$ spada asymptotycznie do jedności.

Na podstawie uzyskanych wyników nie można określić dokładnych zależności:

$$\frac{Sh}{Sh_{Colb.}} = f\left(\frac{1}{d}\right), \quad \text{przy } Re = \text{const},$$

jednak przeprowadzone pomiary wskazują, że siatki wywołują największy wzrost intensywności wymiany masy przy najniższych wartościach liczby Reynoldsa.

Porównanie działania stosowanych siatek wskazuje, że przy jednakowych liczbach Reynoldsa siatka I wywołuje większy wzrost wartości liczby Sherwooda. Ponieważ szybkości liniowe przepływu powietrza przez oczka obu siatek były zbliżone /różniły się o 18 procent/, uzyskane wyniki wskazują, że, w zbadanym zakresie stosunku średnicy rury do średnicy oczka, siatka o większych oczkach efektywniej wpływa na szybkość procesu wymiany masy.

Przeprowadzone badania wykazały ponadto, że w odległości od siatki równej 100-krotnej średnicy oczka, mimo że wnikanie masy nie jest jednakowo intensywne na całym obwodzie rury, średnia wartość liczby Sherwooda dla kolejnych przekrojów poprzecznych praktycznie jest już stała.

Tablica 24.

Wymiana masy za siatką umieszczoną w rurze

Warunki pomiaru:

siatka I $b = 101,3 \cdot 10^3 \frac{N}{m^2}$
 $d = 30,1 \cdot 10^{-3} m$ $\gamma = 15,3 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$
 $t = 120 s$ $D = 8,1 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

Re - liczba Reynoldsa liczona tak jak dla pustej rury

Sh_{Colb.} - liczba Sherwooda obliczona za pomocą wzoru Colburna

Nr dośw.	$V_t \cdot 10^3$ $\frac{m^3}{s}$	Re	$\sigma \cdot 10^9$ $\frac{kmol}{m^2}$	$\frac{1}{d}$	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{kmol}{m^2}$	$\sigma \cdot 10^9$ $\frac{kmol}{m^2}$	Sh	Sh _{Colb.}	$\frac{Sh}{Sh_{Colb}}$
1	3,01	8320	19,96	1	69,2	19,30	111,0	38,9	2,85
				2	42,0	18,88	68,9		1,77
				3	34,3	18,58	57,2		1,47
				4	30,0	18,28	50,8		1,30
				5	26,8	18,02	46,0		1,18
				6	25,5	17,78	44,4		1,14
				7	24,0	17,56	42,3		1,09
				8	22,5	17,36	40,1		1,03
				9	21,5	17,16	38,8		1,00
2	4,19	11580	19,92	1	78,8	19,38	125,9	50,6	2,49
				2	52,2	19,02	85,0		1,68
				3	44,7	18,72	73,9		1,46
				4	39,7	18,44	66,6		1,32
				5	36,4	18,18	62,0		1,23
				6	34,0	17,92	58,7		1,16
				7	31,5	17,72	55,0		1,09
				8	30,2	17,52	53,4		1,06
				9	29,2	17,33	52,0		1,03
3	6,05	16700	19,84	1	100,3	19,36	160,4	67,9	2,41
				2	70,2	19,02	114,3		1,68
				3	59,2	18,74	97,8		1,44
				4	52,7	18,51	88,2		1,30
				5	50,2	18,25	85,2		1,21
				6	46,8	18,03	80,4		1,18
				7	45,6	17,81	79,3		1,17
				8	44,5	17,59	78,3		1,15
				9	43,5	17,39	77,4		1,14
4	8,39	23200	19,86	1	108,6	19,48	172,6	88,3	1,95
				2	79,0	19,22	127,3		1,44
				3	71,0	18,96	115,9		1,31
				4	65,8	18,76	108,7		1,23
				5	64,8	18,53	108,3		1,22
				6	60,7	18,33	102,5		1,16
				7	59,8	18,11	102,3		1,16
				8	59,2	17,91	102,3		1,16
				9	58,0	17,71	101,4		1,15
5	12,66	35000	19,74	1	148,0	19,40	236,2	122,8	1,93
				2	108,7	19,14	175,9		1,43
				3	95,0	18,93	155,4		1,27
				4	89,3	18,73	147,6		1,20
				5	85,5	18,53	142,9		1,16
				6	81,2	18,35	137,0		1,11
				7	79,0	18,18	134,6		1,09
				8	77,8	18,00	133,8		1,09
				9	74,8	17,82	130,0		1,06

Tablica 25.

Wymiana masy za siatką umieszczoną w rurze

Warunki pomiaru:

siatka II $b = 101,3 \cdot 10^3 \frac{N}{m^2}$

$d = 30,1 \cdot 10^{-3} m$ $\varrho = 15,3 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

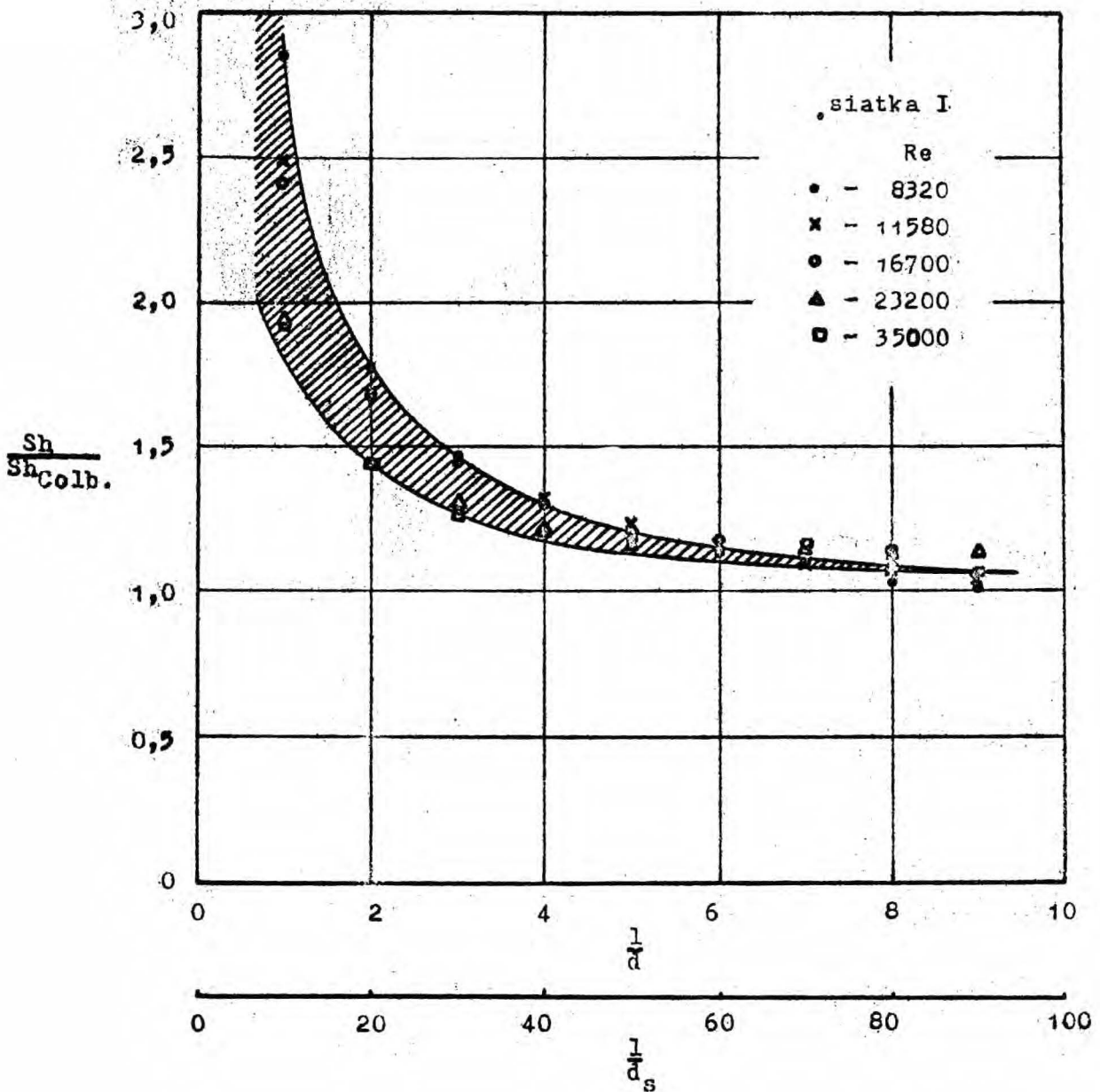
$t = 120 \cdot s$ $D = 8,1 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

Re - liczba Reynoldsa liczona tak jak dla pustej rury

Sh_{Colb.} - liczba Sherwooda obliczona za pomocą wzoru Colburi

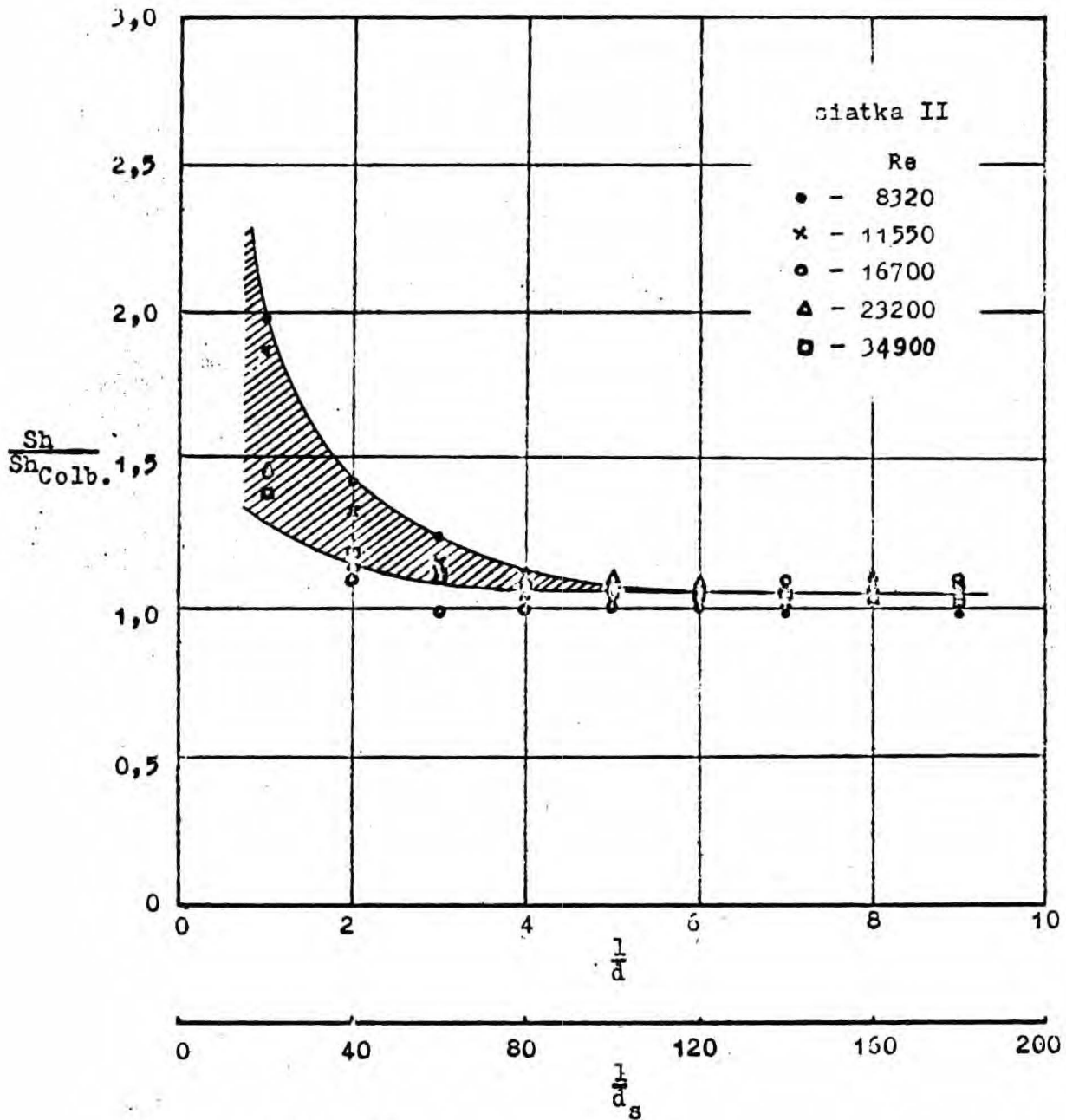
Nr dośw.	$V_c \cdot 10^3$ $\frac{m^3}{s}$	Re	$c_0 \cdot 10^9$ $\frac{kmol}{m^3}$	$\frac{1}{d}$	$n_p \cdot 10^9$ $\frac{kmol}{m^2}$	$c \cdot 10^9$ $\frac{kmol}{m^3}$	Sh	Sh _{Colb.}	$\frac{Sh}{Sh_{Colb.}}$
1	3,01	8320	19,96	1	48,4	19,50	76,9	38,9	1,98
				2	34,6	19,16	55,9		1,43
				3	29,6	18,88	48,5		1,24
				4	26,6	18,62	44,2		1,13
				5	24,8	18,38	41,8		1,07
				6	22,9	18,18	39,0		1,00
				7	21,8	17,98	37,5		0,97
				8	21,8	17,76	38,0		0,98
				9	21,7	17,56	38,2		0,98
2	4,18	11550	19,94	1	59,5	19,54	94,3	50,6	1,87
				2	41,8	19,24	67,3		1,33
				3	35,7	19,00	58,2		1,15
				4	32,3	18,78	53,2		1,05
				5	30,9	18,56	51,5		1,02
				6	30,3	18,36	51,1		1,01
				7	30,3	18,16	51,7		1,02
				8	30,4	17,94	52,4		1,04
				9	30,4	17,76	52,9		1,05
3	6,04	16700	19,86	1	62,2	19,56	98,4	67,9	1,45
				2	46,8	19,32	75,0		1,10
				3	41,4	19,14	67,1		0,99
				4	41,2	18,94	67,4		1,00
				5	42,0	18,74	69,4		1,02
				6	42,6	18,54	71,1		1,04
				7	44,5	18,35	75,1		1,10
				8	44,7	18,11	76,4		1,12
				9	43,2	17,91	74,7		1,10
4	8,38	23200	19,90	1	82,5	19,62	130,2	88,3	1,47
				2	62,9	19,40	100,4		1,14
				3	60,2	19,20	97,1		1,10
				4	59,4	19,00	96,8		1,10
				5	59,4	18,78	97,9		1,11
				6	58,2	18,58	97,0		1,09
				7	56,2	18,40	94,6		1,07
				8	55,8	18,20	94,9		1,07
				9	56,5	18,00	97,2		1,10
5	12,64	34900	19,80	1	107,5	19,54	170,3	122,5	1,39
				2	91,2	19,34	146,0		1,19
				3	85,0	19,12	137,6		1,12
				4	81,4	18,96	132,9		1,08
				5	79,5	18,79	131,0		1,07
				6	76,6	18,61	127,5		1,04
				7	76,6	18,43	128,7		1,05
				8	74,2	18,27	125,8		1,03
				9	72,7	18,09	124,4		1,02

Rys. 35. Wymiana masy za siatką umieszczoną w rurze



l - odległość od siatki
 d - średnica wewnętrzna rury
 d_s - średnica oczka siatki

Rys. 36. Wymiana masy za siatką umieszczoną w rurze



l - odległość od siatki

d - średnica wewnętrzna rury

d_s - średnica oczka siatki

3. Omówienie wyników i wnioski

Procesy wymiany ciepła i masy można scharakteryzować dokładnie za pomocą lokalnych współczynników wnikania ciepła i masy. Pomiarów tych wielkości nastroczają eksperymentatorom duże trudności, jednak pewnym ułatwieniem jest analogia między zjawiskami wymiany ciepła i masy, która umożliwia określanie współczynników wnikania ciepła na podstawie pomiarów wymiany masy i odwrotnie.

Kilkakrotnie podejmowano próby opracowania dogodnej metody oznaczania lokalnych współczynników wnikania masy opierającej się na zasadzie wykorzystania barwnej reakcji czynnika zawartego w strumieniu płynu z absorbentem umieszczonym na powierzchni badanego modelu. Otrzymany obraz charakteryzuje zjawisko wymiany masy od strony jakościowej i może być wykorzystany do oznaczania lokalnych współczynników wnikania, jeżeli reakcja jest dostatecznie szybka, a obraz odpowiednio trwały. Dotychczas nie opracowano metody, w której byłyby spełnione oba wymienione warunki.

Poszukując odpowiedniej reakcji modelowej zbadano w sposób jakościowy 43 reakcje barwne, z którym jako najlepszą wybrano reakcję par jodu z absorbentem, którym była bibuła chromatograficzna nasycona roztworem skrobi i jodku kadmowego. W celu sprawdzenia możliwości wykorzystania wybranej reakcji do oznaczania współczynników wnikania masy wykonano badania zależności współczynnika odbicia światła dla uzyskiwanych zdjęć jodoskrobiowych od sposobu prowadzenia doświadczenia.

Stwierdzono, że zdjęcia jodoskrobiowe są bardzo trwałe. W okresie 1 miesiąca współczynnik odbicia światła dla tych zdjęć zmienia się zaledwie o 4 procent, a w okresie 4 miesięcy zmiana ta nie przekracza 7 procent.

Stwierdzono, że kilkuprocentowe wahania składu roztworu skrobi i jodku kadmowego stosowanego do nasycania bibuły nie wpływają na wartości współczynnika odbicia światła uzyskiwanych zdjęć.

Pomiary wykonane przy użyciu roztworów przechowywanych przez okres zmieniający się od 1 doby do 6 miesięcy dały praktycznie takie same wyniki co wskazuje, że nie zachodzi zjawisko starzenia się roztworu skrobi i jodku kadmowego.

Stwierdzono, że zmiana czasu nasycania bibuły w granicach od 2 do 360 sekund również nie wpływa na wartości współczynnika odbicia zdjęć jodoskrobiowych.

Wilgotne zdjęcia można przechowywać przez 20 minut do momentu rozpoczęcia ruszenia i nie wpływa to na wynik pomiaru.

Współczynnik odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych w niewielkim stopniu zależy od wilgotności absorbentu podczas wykonywania doświadczenia w obszarze wysokich wilgotności. Przy stosowanej w niniejszej pracy wilgotności strumienia powietrza wysychanie absorbentu w czasie doświadczenia było nieznaczne i nie wpływało na wynik pomiaru.

Stwierdzona w badaniach reakcji modelowej dobra powtarzalność wyników doświadczeń wskazuje, że reakcja jodu z absorbentem może być stosowana do pomiarów ilościowych.

Ponieważ w badaniach stosowano powietrze oczyszczone tylko od zanieczyszczeń stałych, dobra powtarzalność wyników doświad-

czeń wskazuje jednocześnie, że zanieczyszczenia gazowe spotykane w powietrzu "laboratoryjnym" nie wpływają na rezultaty pomiarów.

Na podstawie przeprowadzonych badań reakcji modelowej ustalono optymalne warunki wykonywania pomiarów. W warunkach tych określono zależność współczynnika odbicia światła dla zdjęć jodoskrobiowych od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu. Pomiarów wykonano dwoma niezależnymi sposobami. W pierwszym sposobie zdjęcia jodoskrobiowe otrzymano w rurach, a ilość zaabsorbowanego jodu obliczono za pomocą równania Colburna przyjmując, że stężenie par jodu przy powierzchni absorbentu jest równe zeru. W drugim sposobie ilość jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu oznaczono bezpośrednio za pomocą izotopu promieniotwórczego ^{131}J . Zgodność uzyskanych wyników wskazuje, że stężenie par jodu przy powierzchni absorbentu jest znikomo małe w porównaniu ze stężeniem we wnętrzu strumienia, a więc reakcja par jodu z absorbentem jest bardzo szybka.

Zależność współczynnika odbicia światła od ilości jodu zaabsorbowanego na jednostce powierzchni absorbentu wykorzystano do oznaczania lokalnych współczynników wnikania masy. Powierzchnia pomiaru miała kształt kwadratu o boku 2 milimetry. Badania wykonano częściowo w układach dość dobrze znanych w celu porównania otrzymanych wyników z rezultatami uzyskanymi za pomocą innych metod.

Określono zależność liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa przy przepływie płynu między równoległymi płytami w obszarze wykształconych profilów prędkości i stężenia.

Wykonano pomiary rozkładu lokalnych wartości liczby Sherwooda przy opływie pojedynczego walca.

W badaniach wymiany masy przy opływie pęczka rur określono rozkłady lokalnych oraz średnich wartości liczby Sherwooda dla pięciu rzędów rur w układzie szeregowym.

Wykorzystano opracowaną metodę do określenia rozkładu wartości liczby Sherwooda w obszarze stabilizacji stężeniowej przy wykształconym profilu prędkości dla przepływu laminarnego oraz burzliwego przez rurę. Zależność uzyskana dla przepływu laminarnego była zgodna z równaniem teoretycznym.

Badania wymiany masy przy przepływie płynu przez wypełnienie ziarniste wykazały bardzo nierównomierny udział różnych fragmentów powierzchni ziarna w procesie wnikania. Na podstawie pomiarów wykonanych dla pięciu walców umieszczonych w sposób przypadkowy wewnątrz warstwy wypełnienia określono zależność średniej wartości liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa, uzyskując wynik zgodny z rezultatami znalezionymi w literaturze.

Wykorzystano opracowaną metodę do zbadania wymiany masy w obszarze stabilizacji za siatką umieszczoną w rurze. Stwierdzono, że wymiana masy jest bardzo intensywna bezpośrednio za siatką. W odległości od siatki równej 100-krotnej średnicy oczka wnikanie masy nie jest jednakowo intensywne na całym obwodzie rury, ale średnia wartość liczby Sherwooda dla kolejnych przekrojów poprzecznych praktycznie jest już stała.

Przeprowadzone badania wykazały, że opracowana metoda daje wyniki zgodne z rezultatami uzyskiwanymi za pomocą innych, dotychczas stosowanych metod.

Ze względu na możliwość określania lokalnych współczynników wnikania, opracowana metoda pozwala głębiej wniknąć w mechanizm zjawisk wymiany.

Szybkość i łatwość wykonywania pomiarów za pomocą opracowanej metody pozwala sądzić, że znajdzie ona zastosowanie do badania bezpośrednio procesów wnikania masy, a pośrednio także do badania procesów wnikania ciepła na podstawie analogii tych zjawisk.

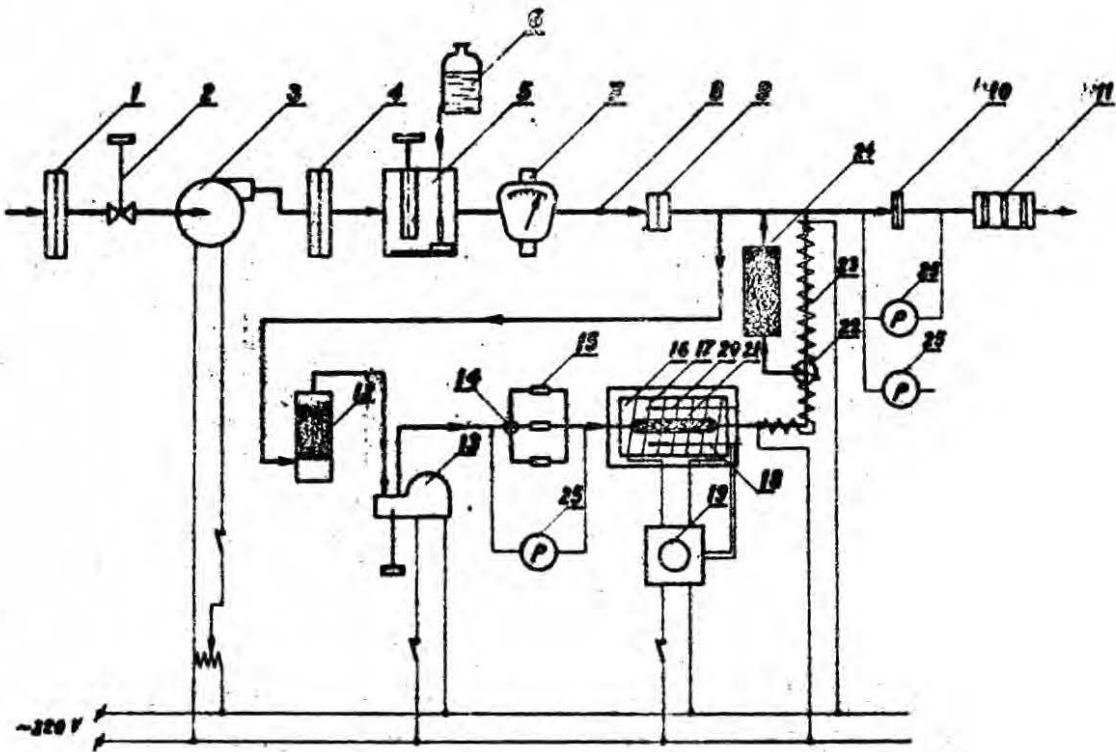
Załącznik

Opis przyrządu do badania wymiany masy

Wykorzystując doświadczenie zebrane podczas wykonywania niniejszej pracy zaprojektowano i wykonano przyrząd, który może być stosowany w laboratoriach badawczych i biurach projektowych do badania procesów wymiany masy. Na rysunku 36. przedstawiono schemat i fotografię tego przyrządu. W opracowanym prototypie wykorzystano podstawowe rozwiązania konstrukcyjne, które zastosowano w aparaturze poprzednio opisanej i stosowanej w niniejszej pracy. Wprowadzono następujące zmiany, które uczyniły przyrząd sprawniejszym i wygodniejszym w użyciu.

1. Zastosowano sprężarkę wirnikową o wyższym ciśnieniu sprężania.
2. Zwiększono czynną powierzchnię filtrów powietrza.
3. Zwiększono czynną powierzchnię nawilżacza.
4. Wyposażono przyrząd w regulator wilgotności powietrza.
5. Manometry cieczowe zastąpiono manometrami membranowymi.
6. Ultratermostat laboratoryjny zastąpiono termostatem wykonanym w bloku aluminiowym.
7. Zmieniono układ dozowania par jodu.
8. Wszystkie elementy aparatury zamknięto w obudowie o wymiarach 460 x 370 x 180 milimetrów.

Rys. 36. Schemat przyrządu do badania wymiany masy



Objaśnienia do schematu przyrządu

1. Filtr powietrza - płat gumy piankowej o grubości 10 mm.
2. Regulator natężenia przepływu powietrza.
3. Sprężarka wirnikowa; wydajność powietrza $20 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$,
maksymalne ciśnienie sprężania - $11 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$.
4. Filtr powietrza - płat gumy piankowej o grubości 5 mm.
5. Nawilżacz powietrza.
6. Butla z wodą.
7. Higrometr włosowy.
8. Termometr kontrolny; dokładność - 0,5 deg.
9. Siateczka wyrównawcza.
10. Zwężka pomiarowa.
11. Mieszalnik.
12. Absorber pary wodnej; wypełnienie - chlorek wapniowy.
13. Pompka membranowa z regulatorem natężeniu przepływu.
14. Kurek czterodrożny.
15. Kapilara pomiarowa.
16. Termostat wykonany w bloku aluminiowym.
17. Uzwojenie termostatu.
18. Termometr kontaktowy.
19. Przekaznik termostatu.
20. Termometr kontrolny; dokładność - 0,1 deg.
21. Pojemnik z jodem.
22. Kurek trójdrożny.
23. Uzwojenie grzejne.
24. Absorber par jodu; wypełnienie - guma piankowa.
- 25 + 28. Manometry membranowe.

Wykaz cytowanej literatury

1. K. Raznjevic, Tablice cieplne z wykresami, Warszawa 1966.
2. Kalendarz Chemiczny, Warszawa 1954.
3. H. T. Garry, L. J. Sillescu, Phys. Rev., 40, 269 /1932/.
4. Mellors Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry, London 1953.
5. F. H. Garner, V. G. Jensen, R. B. Keey, Trans. Inst. Chem. Engrs., 37, 191 /1959/.
6. T. H. Chilton, A. P. Colburn, Ind. Eng. Chem., 26, 1183 /1934/.
7. T. Hobler, Dyfuzyjny ruch masy i absorberzy, Warszawa 1962.
8. R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot, Transport Phenomena, New York 1960.
9. A. P. Colburn, Trans. A.I.Ch.E., 29, 174 /1933/.
10. T. Hobler, Ruch ciepła i wymienniki, Warszawa 1959.
11. C. O. Bennett, J. E. Myers, Przenoszenie pędu, ciepła i masy, Warszawa 1967.
12. H. Jeffreys, Phil. Mag., 35, 270 /1918/.
13. W. Nusselt, Z. ang. Math. Mech., 10, 105 /1930/.
14. O. G. Sutton, Proc. Roy. Soc. London, 46 A, 701 /1934/.
15. R. W. Powell, B. S. Griffiths, Trans. Inst. Chem. Engrs., 13, 175 /1935/.
16. R. W. Powell, Trans. Inst. Chem. Engrs., 18, 36 /1940/.
17. E. W. Comings, J. T. Clapp, J. F. Taylor, Ind. Eng. Chem., 40, 1076 /1948/.
18. D. S. Maisel, T. K. Sherwood, Chem. Eng. Progr., 46, 131, 172 /1950/.
19. D. R. Davies, T. S. Walters, J. Mech. Appl. Math., 4, 466 /1951/.
20. D. R. Davies, T. S. Walters, Proc. Phys. Soc., 65 B, 640 /1952/.

21. J. Ciborowski, A. Selecki, Przem. Chem., 35 , 89 /1956/.
22. P. M. Heertjes, W. P. Ringens, Chem, Eng. Sci., 5 ,
226 /1956/.
23. R. A. S. Brown, B.H. Sage, J. Chem. Eng. Data., 3 , 263 /1958/
24. O. Kirscher, G. Loos, Chem. Ing. Tech., 30 , 31 , 69 /1958/.
25. R. A. S. Brown, B. H. Sage, J. Chem. Eng. Data.,
6 , 355 /1961/.
26. A. S. Gupta, G. Thodos, A.J.Ch.E. Journal, 9/6/ , 751 /1963/.
27. E.V. Aacher, Chem. Ing. Tech., 36/3/ , 269 /1964/.
28. E. R. Gilliland, Ind. Eng. Chem., 26 , 516, 681 /1934/.
29. H. Houghton, Physics, 4 , 419 /1933/.
30. E. Frosling, Beitr. Geophysik, 52 , 170 /1938/.
31. O. A. Hougen, Trans. Am. Inst. Ch. Eng., 41 , 445 /1945/.
32. D. W. Krevelen, Chem. Eng. Progr., 44 , 529 /1948/.
33. M. Hobson, Chem. Eng. Progr., 45 , 517 /1949/.
34. R. G. Teacker, Chem. Eng. Progr., 45 , 188 /1949/.
35. H. L. Schulman, Ind. Eng. Chem., 42 , 1058 /1958/.
36. Ju. I. Ditnerskij, A. G. Kasatkin, N. W. Kochergin,
Ž. Prikl. Chim., 35 , 2701 /1962/.
37. D. Kunii, M. Suzuki, Inst. J. Heat Mass Transfer,
10/7/ , 845, /1967/.
38. C. C. Windig, A. J. Cheney, Ind. Eng. Chem., 40 , 1087 /1948/
39. R. A. De Bertoli, R. E. Grimble, J. E. Zerbe, Nucl. Sci.
Eng., 1 , 239 /1956/.
40. W. J. Christian, S. P. Kezios, A.J.Ch.E. Journal, 5 ,
61 /1959/.
41. J. Schnautz, Dechema Monograph., 32 , 107 /1959/.
42. T. K. Sherwood, J. Heat Transfer, 82 , 312 /1960/.
43. N. M. Zaworonkow, J. A. Gildenblat, S. A. Kranseninnikow
V. M. Ramm, Trudy Mosk. Chim. - Technol. Inst., 33 ,70 /1961/.

44. H. H. Sogin, V. S. Subramanian, J. Heat Transfer, 83 , 483 /1961/.
45. N. Macleod, M.D. Cox, R. B. Todd, Chem. Eng. Sci., 17 , 923 /1962/.
46. P. N. Rowe, K. T. Claxton, J. B. Lewis, Trans. Inst. Chem. Engrs. 43/1/, T-14 /1965/.
47. H. P. Harriot, R. M. Hamilton, Chem. Eng. Sci., 20/12/, 1073 /1965/.
48. J. M. R. Fred, A.J.Ch.E. Journal, 11/3/ , 481 /1965/.
49. P. Grassman, N. Ibl, J. Verb. Chem. Ing. Tech. 33 , 529 /1961/.
50. G. Schütz, Int. J. Heat Mass Transfer, 6 , 873 /1963/.
51. H. Thoma, Hochleistungskessel, Berlin 1921.
52. S. Bretsznajder, L. Leśniewicz, I. Mościcka, Przem. Chem., 39 , 75, 155 /1960/.
53. R. W. Ladenburg, Physical Measurements in Gas Dynamics and Combustion, London 1955.
54. G. S. Walbiert, N. P. Kogan, Cement, 24/1/ , 6 /1958/.
55. A. K. Martynov, Practical Aerodynamics, Oxford 1965.
56. W. Zaks, Podstawy aerodynamiki doświadczalnej, MON Warszawa 1957.
57. S. K. Djurdjevic, Gl. Chem. Drusztwa, 14 , 4 /1949/.
58. S. K. Djurdjevic, S. Joksimovic, Gl. Chem. Drusztwa, 17 , 369 /1952/.
59. S. K. Djurdjevic, Nature, 172 , 858 /1953/.
60. S. K. Djurdjevic, Chim. Ind. Gen. Cim., 75 , 5 /1956/.
61. S. K. Djurdjevic, Chim. Ind. Chim., 77 , 5 /1957/.
62. S. K. Djurdjevic, G. Popov, Gl. Chem. Drusztwa 28 , 491 /1963/.

63. S. Bretsznajder, L. Leśniewicz, I. Mościcka., Przem. Chem., 39 , 219, 283 /1960/.
64. J. P. Johnston, J. Basic Eng., 86/4/, 907 /1964/.
65. S. Bretsznajder, J. Mościcka, Chemia Stos., 5/1/ , 319 /1961/, 7/1/, 3 /1963/.
66. A. E. Cziczibabin, Podstawy chemii organicznej, Warszawa 1957.
67. J. Hallo, J. Szejtli, Brauwissenschaft, 13 , 380 /1960/.
68. S. Makherjee, S. Bhattacharya, J. Indian Chem. Soc., 23 , 121 /1946/.
69. J. Hallo, J. Szejtli, Periodica. Politech., 1 , 223 /1957/.
70. J. Hallo, J. Szejtli, Periodica. Politech., 2 , 25 /1958/.
71. C.T. Greenwood, H. Rossoti, J. Polymer. Sci., 27 , 481 /1958/.
72. J. Eliasza, M. Lewin, Nature, 201 , 1023 /1964/.
73. K. Ohashi, N. Noge, Kogaku Kaishi, 33 , 576 /1959/.
74. S. Mukherjee, S. Bhattacharya, J. Indian Chem. Soc., 23 , 459 /1946/.
75. I. G. A. Gilbert, J. V. R. Marriott, Trans. Faraday Soc., 44 , 84 /1948/.
76. T. Kuge, S. Ono, Bull, Chem. Soc. Japan, 33 , 1269 /1960/.
77. W. O. Moknach, N. M. Rusakowa, Dokł. Akad. Nauk SSSR 145 , 1290 /1962/.
78. K. B. Jatmirskij, R. P. Morozowa, Izv. Wyssz. Uczeb. Zawed., Chim. Chim. Technol., 6/6/ , 925 /1963/.
79. S. Ono, T. Watanabe, K. Ogawa, N. Okazaki, Bull. Chem. Soc. Japan, 38/4/ , 643 /1965/.
80. A. P. Kaban, O. D. Kurilenko, Dopow. Akad. Nauk Ukr. RSR, 12 , 1594 /1966/.
81. J. L. Lambert, P. Artur, T. E. Moore, Anal. Chem., 23 , 1101 /1951/.

82. J. L. Lambert, Anal. Chem., 23 , 1247, 1256 /1951/.
83. J. L. Lambert, S. K. Yasuda, Anal. Chem., 27 , 444 /1955/.
84. J. L. Lambert, S. C. Rhoads, Anal. Chem., 28 , 1629 /1956/.
85. J. L. Lambert, F. Zitomer, Anal. Chem., 34 , 1738 /1962/.
86. J. L. Lambert, F. Zitomer, Anal. Chem., 35 , 405 /1963/.
87. F. A. Loewus, D. R. Briggs, J. Am. Chem. Soc.,
79 , 1494 /1957/.
88. W. M. Kays, Convective Heat and Mass Transfer, New York 1966.
89. F. Page, W. G. Schlinger, D. K. Kreaux, B. H. Sage, Ind.
Eng. Chem., 44/2/ , 410 , 424 /1952/.
90. B. Staniszewski, Wymiana ciepła, podstawy teoretyczne, PWT
Warszawa 1963.
91. P. M. Połonskaja, J. W. Mielnikowa, Inż-fizyczny Ż.,
1 , 32 /1958/.
92. R. G. Colello, G. S. Springer, Int. J. Heat Mass Transfer,
9 , 1391 /1966/.
93. A. P. Colburn, Trans. A.J.Ch.E. Journal, 29 , 174 /1933/.
94. Ja. M. Rubinsztein, Izv. W. T. J., 35 , 1 /1935/.
95. M. A. Michiejew, Osnovy tiepłopieriedaczy, III izd.,
Goseniergo izdat, Moskwa - Leningrad 1956.
96. B. Gamson, Chem. Engrg. Progr., 47 , 19 /1951/.
97. S. Bretsznajder, Zagadnienia projektowania procesów prze-
mysłu chemicznego, PWT, Warszawa 1956.



Biblioteka Instytutu Chemii Fizycznej PAN

F-B.65/69



80000000084013