

INSTYTUT INŻYNIERII CHEMICZNEJ I URZĄDZEN CIEPLNYCH
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Komunikat nr 316/78

HYDRODYNAMIKA I WYMIANA MASY W UKŁA-
DZIE GAZ-CIECZ NA BEZPRZELEWOWYCH
PÓLKACH SITOWYCH W OBECNOŚCI ŚROD-
KÓW POWIERZCHNIOWO-CZYNNYCH.

Bogusław Kulik

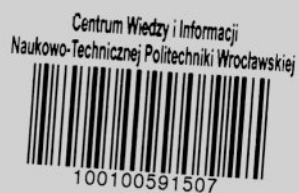
Praca doktorska

Słowa kluczowe: kolumna półkowa, środki powierzchniowo-czynne,
hydrodynamika, wymiana masy.

mgr inż. Kulik Bogusław

Instytut Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych
Politechniki Wrocławskiej
ul. Norwida 4/6
50-373 Wrocław

Komunikat wpłynął do Instytutu: 3. 03. 1978



202 663 L /
A

Wrocław 1978

Streszczenie

W pierwszej części pracy przedstawiony jest przegląd literatury na temat wpływu środków powierzchniowo-czynnych na proces odpylania gazów metodami mokrymi oraz hydrodynamikę i wymianę masy w układzie gaz-ciecz. W części drugiej przedstawiono wyniki badań wpływu niejonowych rozpuszczalnych środków powierzchniowo-czynnych na dyndrodynamikę i wymianę masy w kolumnie z bezprzelewowymi półkami sitowymi. Stwierdzono istnienie trzech zakresów pracy półki, związanych z własnościami pianotwórczymi cieczy. Wpływ środków powierzchniowo-czynnych opisano za pomocą trzech parametrów: względnego obniżenia napięcia powierzchniowego, zdolności pienienia cieczy i trwałości piany. W oparciu o dane literaturowe i opracowane korelacje własne zaproponowany został sposób obliczania odpylająco-absorpcyjnej kolumny półkowej.

SPIS TREŚCI

	str.
STOSOWANE OZNACZENIA	5
1. WSTĘP	13
2. FIZYKOCHEMICZNE PODSTAWY PROCESU ADSORPCJI NA POWIERZCHNI MIĘDZYFAZOWEJ GAZ - CIECZ	15
2.1. Napięcie powierzchniowe	15
2.2. Adsorpcja na powierzchni międzyfazowej gaz - ciecz	18
2.3. Równanie Gibbsa	21
2.4. Izotermy adsorpcji dla substancji niejonowych	28
2.5. Kinetyka tworzenia adsorpcyjnych filmów powierzchniowych	36
2.6. Piany.....	43
3. WPŁYW ŚRODKÓW POWIERZCHNIOWO-CZYNNYCH NA ODPYLANIE GAZÓW	51
4. WPŁYW ŚRODKÓW POWIERZCHNIOWO-CZYNNYCH NA HYDRODYNAMIKĘ I WYMIANĘ MASY W UKŁADZIE GAZ-CIECZ /I CIECZ-CIECZ/	59
4.1. Znaczenie zjawisk powierzchniowych w procesach wymiany masy i przepływach dwufazowych	59
4.2. Układy statyczne gaz - ciecz	68
4.3. Laminarny strumień cieczy	70
4.4. Grawitacyjny spływ cieczy po ścianie	72
4.5. Układy dynamiczne gaz - ciecz z płaską powierzchnią międzyfazową i mieszaniem w głębi fazy ciekłej	75
4.6. Pojedyncze pęcherze	78

4.7. Zbiory pęcherzy	83
4.8. Kolumny z wypełnieniem	86
4.9. Kolumny pianowe	88
4.10. Układy ciecz - ciecz	90
5. WPŁYW ŚRODKÓW POWIERZCHNIOWO-CZYNNYCH NA HYDRODYNAMIKĘ I WYMIANĘ MASY W KOLUMNACH PÓŁKOWYCH	91
5.1. Hydrodynamika półek	91
5.1.1. Wysokość piany	91
5.1.2. Spadek ciśnienia na półce	94
5.1.3. Porywanie cieczy	95
5.1.4. Powierzchnia międzyfazowa	96
5.2. Wymiana masy - opór wnikania po stronie fazy cie- kłej	97
6. WNIOSKI Z PRZEGLĄDU LITERATURY I CEL PRACY	100
7. CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA	103
7.1. Charakterystyka stosowanych środków powierzchni- wo-czynnych	103
7.1.1. Napięcie powierzchniowe	104
7.1.2. Własności pianotwórcze	108
7.2. Aparatura pomiarowa	109
7.2.1. Opis instalacji doświadczalnej	109
7.2.2. Pomiar natężenia przepływu gazu	110
7.2.3. Pomiar natężenia przepływu cieczy	111
7.2.4. Pomiar ciśnienia gazu	111
7.2.5. Pomiar wysokości warstwy piany i czystej cieczy	111
7.2.6. Pomiar i regulacja temperatury	111
7.2.7. Pomiar ilości porywanej cieczy	112
7.2.8. Pomiary stężenia	112

7.2.9. Obliczanie stałych równowagowych i własności fizykochemicznych faz	443
7.3. Zakres przebadanych zmiennych	445
7.4. Obliczanie wyników pomiarów	447
7.4.1. Obliczenia hydrodynamiczne	447
7.4.2. Obliczenia wymiany masy	448
8. OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW I WNIOSKI	421
8.1. Hydrodynamika	422
8.1.1. Obszary pracy półek	422
8.1.2. Maksymalne i minimalne obciążenia	425
8.1.3. Opór przepływu gazu, wysokość czystej cieczy, wysokość piany	428
8.1.4. Porywanie cieczy	434
8.2. Wymiana masy	436
8.2.1. Opór wnikania po stronie fazy ciekłej	436
8.2.2. Opór wnikania po stronie fazy gazowej	438
8.3. Kolumna dwupółkowa	439
8.4. Omówienie wyników	440
8.5. Obliczanie kolumny półkowej odpylająco-absorpcyjnej	441
8.6. Wnioski	443
9. LITERATURA	447
10. ZESTAWIENIE WYNIKÓW POMIARÓW I OBLICZEŃ.....	477

STOSOWANE OZNACZENIA

- A - powierzchnia, m^2
- A - współczynnik absorpcji, -
- A_1 - pole powierzchni międzyfazowej, zajęte przez jedną zaadsorbowaną cząsteczkę, m^2 , $\text{\AA}^2$
- A_p - powierzchnia półki, m^2
- A_i - współczynnik wielomianu lub wykładnik potęgowy iloczynu potęgowego, -
- C, C_M, C_i - koncentracja /składnika i /, kmol/m^3
- C_G - koncentracja w fazie gazowej, kmol/m^3
- C_L - koncentracja w fazie ciekłej, kmol/m^3
- C_s - koncentracja w fazie /warstwie/ powierzchniowej, kmol/m^3
- CMC - krytyczne stężenie micelarne, kmol/m^3
- $C_{i.j}$ - stała / $i.j$ - numer równania, w którym stała $C_{i.j}$ występuje po raz pierwszy/,
- D - współczynnik desorpcji, -
- D_i - współczynnik dyfuzji składnika i , m^2/s , cm^2/s
- D_s - współczynnik dyfuzji powierzchniowej, m^2/s , cm^2/s
- F - energia swobodna, J
- F_s - powierzchniowa energia swobodna, J
- G - entalpia swobodna /potencjał termodynamiczny/, J
- G_s - powierzchniowa entalpia swobodna, J
- $\overline{G}_s$ - aktywność powierzchniowa substancji rozpuszczalnej, Nm^2/kmol
- H - wysokość, m
- H_f - wysokość piany, m
- H_p - odstęp między półkami, m
- H_s - wysokość przestrzeni separacyjnej, m

- $H_{RM\tau}$ - wysokość piany w przyrządzie Rossa - Milesa, określona po upływie τ minut od momentu jej wytworzenia, m
- K - stała równowagi w układzie gaz - ciecz /ogólnie/, /indekсы oznaczają układ stężeń/,
- L - gęstość zraszania półki fazą ciekłą, m^3/m^2h
- L_m - masowa gęstość zraszania półki fazą ciekłą, kg/m^2s
- M - masa cząsteczkowa, $kg/kmol$
- M_S - moduł sprężystości powierzchniowej, N/m
- $\dot{M}_i$ - molowa szybkość przepływu składnika i , $kmol/s$
- N_{AV} - liczba Avogadro $/6,0225 \cdot 10^{26}/$, $1/kmol$
- N_G - liczba jednostek wnikania w fazie gazowej, -
- N_L - liczba jednostek wnikania w fazie ciekłej, -
- N_{OG} - liczba jednostek przenikania odniesiona do fazy gazowej, -
- R_m - współczynnik korelacji wielokrotnej, -
- R - stała gazowa $/8314,3/$, $J/kmol K$
- R - całkowity opór przenikania masy, s/m , s/cm
- R_G - opór wnikania masy w fazie gazowej, s/m , s/cm
- R_L - opór wnikania masy w fazie ciekłej, s/m , s/cm
- R_S - opór przenikania masy przez powierzchnię międzyfazową lub powierzchniowy film adsorpcyjny, s/m , s/cm
- SC - stopień cyrkulacji, -
- T - temperatura w skali bezwzględnej, $^{\circ}K$
- TP - trwałość piany, -
- U - energia wewnętrzna, J
- U_s - powierzchniowa energia wewnętrzna, J
- V - objętość, m^3
- V_{Le} - objętość cieczy porwanej z półki, m^3
- V_{LG} - stosunek objętościowych natężeń przepływu cieczy i gazu, m^3/m^3

- $\dot{V}_G$ - objętościowe natężenie przepływu gazu, m^3/s , m^3/h
- $\dot{V}_L$ - objętościowe natężenie przepływu cieczy, m^3/s , m^3/h
- ZP - zdolność pianotwórcza cieczy, m
- a_p - powierzchnia międzyfazowa, przypadająca na jednostkę powierzchni półki, m^2/m^2
- a_v - powierzchnia międzyfazowa, przypadająca na jednostkę objętości piany, m^2/m^3
- c_m - stężenie masowe, kg/m^3
- d - średnica, m
- d_b - średnica pęcherza, m
- d_o - średnica otworów w półce sitowej, m
- d_p - średnica /zastępcza/ cząstki pyłu, m, μm
- e - podstawa logarytmu naturalnego /2,71828/,
- e_m - szybkość porywania cieczy z półki, kg/s
- e_v - szybkość porywania cieczy z półki, m^3/s
- e_{mL} - względna szybkość porywania cieczy z półki, kg/kg cieczy
- e_{mG} - względna szybkość porywania cieczy z półki, kg/kg gazu
- e_r - stopień osiągnięcia stanu równowagi adsorpcyjnej, -
- f_s - właściwa powierzchniowa energia swobodna, J/m^2
- g_s - właściwa powierzchniowa entalpia swobodna, J/m^2
- g - przyspieszenie siły ciężkości /9,80665/ m/s^2
- h - jednostkowa wysokość wnikania masy, m
- h_o - wysokość czystej cieczy na półce, m
- j_{dyf} - dyfuzyjny strumień powierzchniowy substancji powierzchniowo-czynnej, $kmol/ms$
- j_{konw} - konwekcyjny strumień powierzchniowy substancji powierzchniowo-czynnej, $kmol/ms$.
- j_{sL} - strumień substancji powierzchniowo-czynnej między powierzchnią międzyfazową a roztworem, $kmol/m^2s$

- k - stała Boltzmana $/1,38 \cdot 10^{-23}/$ J/K
- k_G - współczynnik wnikania masy w fazie gazowej, m/s, cm/s
- k_L - współczynnik wnikania masy w fazie ciekłej, m/s, cm/s
- k_s - współczynnik przenikania masy przez powierzchnię międzyfazową lub adsorpcyjny film powierzchniowy, m/s, cm/s
- k_L^s - współczynnik wnikania masy w fazie ciekłej w obecności substancji powierzchniowo-czynnej, m/s, cm/s
- k_{OG} - współczynnik przenikania masy odniesiony do fazy gazowej, m/s, cm/s
- $\dot{m}_i$ - masowa szybkość przepływu składnika i , kg/s
- m_{LG} - stosunek masowych natężeń przepływu cieczy i gazu, kg/kg
- n - zamiennik stężeń w fazie gazowej i ciekłej,
- n_i - liczba moli składnika i ,
- n_{EO} - liczba grup tlenku etylenu,
- p - ciśnienie, N/m^2
- Δp - spadek ciśnienia, różnica ciśnień, N/m^2
- Δp_p - spadek ciśnienia gazu podczas przepływu przez otwory półki, N/m^2
- Δp_f - spadek ciśnienia gazu podczas przepływu przez warstwę piany na półce, N/m^2
- Δp_g - spadek ciśnienia gazu niezbędny na pokonanie siły napięcia powierzchniowego cieczy, N/m^2
- r_A - ułamek powierzchni półki, zajętej przez otwory, -
- r_{AL} - ułamek powierzchni otworów półki, zajętej przez spływającą ciecz, -
- r_d - promień cząstki fazy zdyspergowanej, m
- r_r - ułamek powierzchni międzyfazowej, zajętej przez zaadsorbowane cząsteczki, -

- s - szybkość odnawiania powierzchni, $1/s$
- t - temperatura, $^{\circ}C$
- t_o - podziałka rozmieszczenia otworów w półce, m
- u_s - właściwa powierzchniowa energia wewnętrzna, J/m^2
- v_t - składowa styczna prędkości płynu na powierzchni międzyfazowej, m/s
- v_n - składowa normalna prędkości płynu na powierzchni międzyfazowej, m/s
- v_M - objętość molowa, $m^3/kmol$
- w_G - prędkość gazu liczona na przekrój kolumny, m/s
- w_L - prędkość cieczy liczona na przekrój kolumny, m/s
- w_{GO} - prędkość gazu w otworach półki, m/s
- w_b - prędkość wznoszenia się pęcherza, m/s
- w_c^s - prędkość płynu na równiku pęcherza lub kropli w fazie ciągłej, m/s
- x_i - ułamek molowy składnika i w cieczy, $kmol\ i/kmol$
- y_i - ułamek molowy składnika i w gazie, $kmol\ i/kmol$
- x, y, z - współrzędne w układzie kartezjańskim, m
- Γ_i - nadmiar powierzchniowy składnika i , $kmol/m^2$
- $\Gamma_{i,1}$ - względny nadmiar powierzchniowy składnika i /dla $\Gamma_1 = 0$ /, $kmol/m^2$
- Γ^* - nadmiar powierzchniowy /stężenie powierzchniowe/ w stanie równowagi powierzchnia międzyfazowa - roztwór, $kmol/m^2$
- $\Gamma_{max}, \Gamma_{\infty}$ - maksymalna wartość stężenia /nadmiaru/ powierzchniowego, $kmol/m^2$
- θ - kąt zwilżania, rad, deg
- θ - współrzędna w układzie kulistym, rad, deg
- α - współczynnik kondensacji, -

- β - współczynnik ciśnienia statycznego na półce obciążonej gazem i cieczą, -
- γ - ciężar właściwy, N/m^3
- δ_p - grubość półki, m
- δ_s - grubość fazy powierzchniowej, m
- ε - liczba ekspansji, -
- ζ - współczynnik oporu hydraulicznego półki obciążonej fazą gazową, -
- ζ_{Lo} - współczynnik oporu przy przepływie cieczy przez otwory półki, -
- η - całkowita sprawność odpylania, -
- η_{fr} - frakcyjna sprawność odpylania, -
- μ - lepkość dynamiczna płynu, Ns/m^2
- $\bar{\mu}$ - zastępcza lepkość dynamiczna, Ns/m^2
- μ - potencjał chemiczny składnika, J/kmol
- μ° - standardowy potencjał chemiczny składnika, J/kmol
- ν - lepkość kinematyczna płynu, m^2/s
- π - wartość liczby $\pi = 3,14159$
- π - ciśnienie powierzchniowe, N/m
- π_{st} - statyczne ciśnienie powierzchniowe, N/m
- ρ - gęstość, kg/m^3
- ρ_p - gęstość płynu, kg/m^3
- σ, σ_L - napięcie powierzchniowe cieczy, N/m
- σ_o, σ_{H_2O} - napięcie powierzchniowe czystej cieczy jednoskładnikowej, wody, N/m
- σ_d^o - czyste dynamiczne napięcie powierzchniowe roztworu, N/m
- σ_d - dynamiczne napięcie powierzchniowe roztworu, N/m
- σ_{st} - statyczne napięcie powierzchniowe roztworu, N/m
- σ_{SL} - napięcie międzyfazowe ciecz - ciało stałe, N/m

- σ_s - napięcie powierzchniowe ciała stałego, N/m
 σ_R - błąd resztowy korelacji,
 τ - czas, s
 τ_a - czas adsorpcji, s
 τ_d - czas dyfuzji, s
 τ_c - czas kontaktu elementu cieczy na powierzchni międzyfazowej z gazem, s
 τ_e - czas określania porywania cieczy z półki, s
 τ_s - czas życia powierzchni międzyfazowej, s
 τ_s^* - czas ustalania się równowagi termodynamicznej powierzchni międzyfazowa - roztwór, s
 τ_r - czas wymagany do osiągnięcia określonego stopnia zbliżenia się do równowagi adsorpcyjnej, s
 τ_{Lp} - średni czas przebywania cieczy na półce, s
 τ_{Gp} - średni czas przebywania gazu na półce, s
 φ_G - stopień zatrzymania fazy gazowej, -
 φ_L - stopień zatrzymania fazy ciekłej, -

Liczby bezwymiarowe /dokładnie zdefiniowane w tekście/

- $Re = w d / \nu$ - liczba Reynoldsa
 $Sc = \nu / D$ - liczba Schmidta
 $Sh = k d / D$ - liczba Sherwooda
 $Stk = \rho_p d_p^2 w / \eta \nu d$ - liczba Stokesa
 $We = \sigma / d^2 \eta g$ - liczba Webera

Indeksy dolne

- A - składnik absorbowany /desorbowany/,
- B - składnik adsorbujący się na powierzchni międzyfazowej z roztworu,
- c - faza ciągła,
- d - faza rozproszona,
- L - ciecz,
- G - gaz,
- S - powierzchnia międzyfazowa /faza powierzchniowa/,
- b - pęcherz,
- p - półka,
- p - cząstka pyłu, pył,
- p,k- wartość początkowa, końcowa
- f - piana,
- M - wielkość molowa,
- m - wielkość masowa,
- V - wielkość objętościowa
- S - wielkość powierzchniowa
- 1,2,i - składnik 1,2,i,
- O - otwór półki,

Indeksy górne

- * - stan równowagi,
- s - roztwór substancji powierzchniowo-czynnej,

1. WSTĘP

Wzrastający stopień zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego różnymi szkodliwymi substancjami, będący ubocznym efektem szybkiego rozwoju przemysłu, zmusza konstruktorów aparatury przemysłowej do poszukiwania coraz skuteczniejszych metod oczyszczania gazów odlotowych. Zanieczyszczenia emitowane są w postaci pyłów, kropel i gazów, przy czym, w zależności od rodzaju procesu będącego ich źródłem, mogą występować razem lub osobno. Spośród wielu urządzeń służących do oczyszczania gazów z pyłu, najliczniejszą grupę stanowią mokre mechaniczne urządzenia odpylające, których charakterystyczną cechą jest to, że niezależnie od odpylania gazu, mogą one być równocześnie wykorzystywane jako absorbery toksycznych zanieczyszczeń występujących w postaci gazów, par i mgieł. Do innych zalet tego typu urządzeń zaliczyć można dużą niezawodność pracy i z reguły prostą konstrukcję. Zakres ich stosowania ograniczony jest jednak do pyłów dobrze zwilżalnych o wymiarach ziaren nie mniejszych niż ok. $2\mu\text{m}$, gdyż zwiększenie sprawności odpylania cząstek tej wielkości wymaga nieproporcjonalnego zwiększenia nakładów energetycznych.

Skuteczność oczyszczania gazów z pyłów trudno zwilżalnych poprawić można w sposób bardzo istotny przez zastosowanie wodnych roztworów środków powierzchniowo-czynnych, co znacznie rozszerza zakres stosowania mokrych odpylaczy. Należy przy tym podkreślić, że zwilżalność pyłu ma dominujący wpływ na skuteczność odpylania gazów z cząstek o wielkości od ułamka do kilku μm , a więc najbardziej szkodliwych dla organizmu

człowieka.

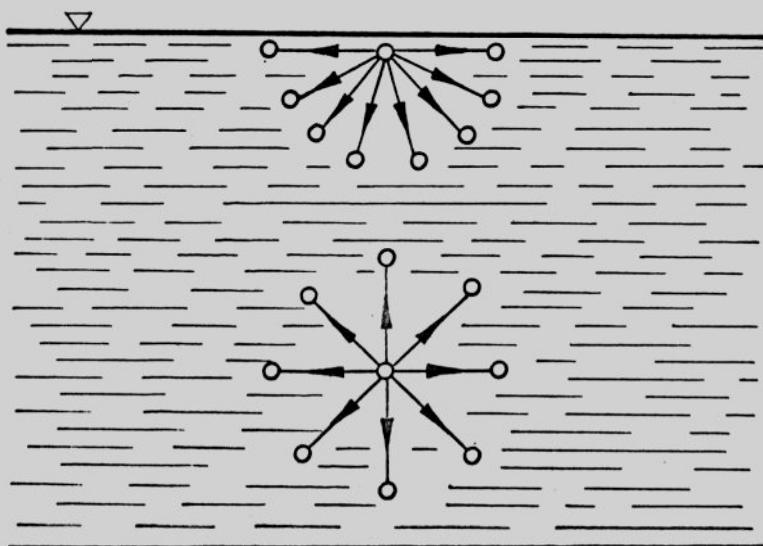
Niniejsza praca dotyczy zagadnień hydrauliki i wymiany masy w kolumnie pianowej z bezprzelewową półką sitową, na którą doprowadzane są wodne roztwory środków powierzchniowo-czynnych. Wybór tego typu urządzenia uzasadnia bardzo prosta konstrukcja, niewrażliwość na zanieczyszczenia stałe, oraz możliwość pracy w zakresie dużych obciążeń gazem przy małym zużyciu cieczy. Kolumny pianowe są często stosowane w procesach odpylania i absorpcji, jednak ich działanie w przypadku użycia wodnych roztworów środków powierzchniowo-czynnych o właściwościach pieniających jest jeszcze niedostatecznie poznane.

W rozdziale 2 przedstawiono fizykochemiczne podstawy procesu adsorpcji na powierzchni międzyfazowej gaz - ciecz oraz niektóre aspekty zjawisk powierzchniowych w układach zdyspergowanych. Rozdziały 3, 4 i 5 obejmują przegląd literatury na temat wpływu środków powierzchniowo-czynnych na proces oczyszczania gazów z pyłu, hydrodynamikę i wymianę masy w układach gaz - ciecz ze szczególnym uwzględnieniem kolumn półkowych, na podstawie czego szczegółowo sformułowano cel pracy /rozdział 6/. Omówienie części eksperymentalnej pracy, sposobu opracowania wyników pomiarów oraz wnioski zawarte są w rozdziałach 7 i 8.

2. FIZYKOCHEMICZNE PODSTAWY PROCESU ADSORPCJI NA POWIERZCHNI MIĘDZYFAZOWEJ GAZ - CIECZ

2.1. Napięcie powierzchniowe

Gdy dwie homogeniczne fazy znajdują się w kontakcie ze sobą, to granica podziałowa między nimi nie jest płaszczyzną /lub ogólniej - powierzchnią/ w sensie geometrycznym, lecz cienką warstwą o charakterystycznej grubości. Własności tej warstwy są różne od własności substancji stanowiących obydwie fazy, co wynika z różnic w oddziaływaniach międzycząsteczkowych w głębi faz i w pobliżu ich granicy. Jeżeli ograniczymy rozważania do układu gaz - ciecz, to można stwierdzić, że cząsteczki w głębi fazy ciekłej znajdują się w polu sił o symetrii kulistej, natomiast te, które znajdują się na powierzchni - podlegają oddziaływaniu tylko od strony fazy ciekłej /rys. 2.1/.



Rys. 2.1. Siły przyciągania międzycząsteczkowego w głębi fazy ciekłej i na jej powierzchni.

Na skutek takiego rozkładu sił cząsteczki znajdujące się na powierzchni międzyfazowej są niejako wciągane w głąb fazy ciekłej, co oznacza, że powiększenie swobodnej powierzchni tej fazy /czyli przeniesienie na nią pewnej liczby cząsteczek z wnętrza fazy/ będzie wymagać wykonania określonej pracy. Energia cząsteczek lub atomów na powierzchni jest większa, a ponieważ układ dąży do minimum energii, więc powierzchnia cieczy będzie zawsze miała tendencję do samorzutnego zmniejszania się. Siłę styczną do powierzchni międzyfazowej dążącą do jej zmniejszenia, odniesioną do jednostki długości przekroju powierzchni nazywa się napięciem powierzchniowym fazy /lub ogólniej - międzyfazowym/ σ . Powierzchnia międzyfazowa znajduje się w stanie równomiernego napięcia, gdy w każdym punkcie jest prostopadłe do linii przekroju i ma taką samą wartość niezależną od kierunku tej linii, oraz gdy ma taką samą wartość we wszystkich punktach na powierzchni [61].

Z rozważań termodynamicznych wynika definicja napięcia powierzchniowego cieczy jednoskładnikowej [4, 54, 61] :

$$\sigma_0 \equiv \left(\frac{\partial F}{\partial A} \right)_{T, V, n} = \left(\frac{\partial G}{\partial A} \right)_{T, p, n} \quad 2.1$$

W warunkach izotermiczno-izochorycznych napięcie powierzchniowe σ_0 równe jest liczbowo właściwej powierzchniowej energii swobodnej f_s , natomiast w warunkach izotermiczno-izobarycznych - właściwej powierzchniowej entalpii swobodnej g_s . W praktyce zmiany objętości lub ciśnienia towarzyszące zmianom powierzchni są niewielkie, więc można przyjąć, że f_s i g_s są sobie równe [54, 181] :

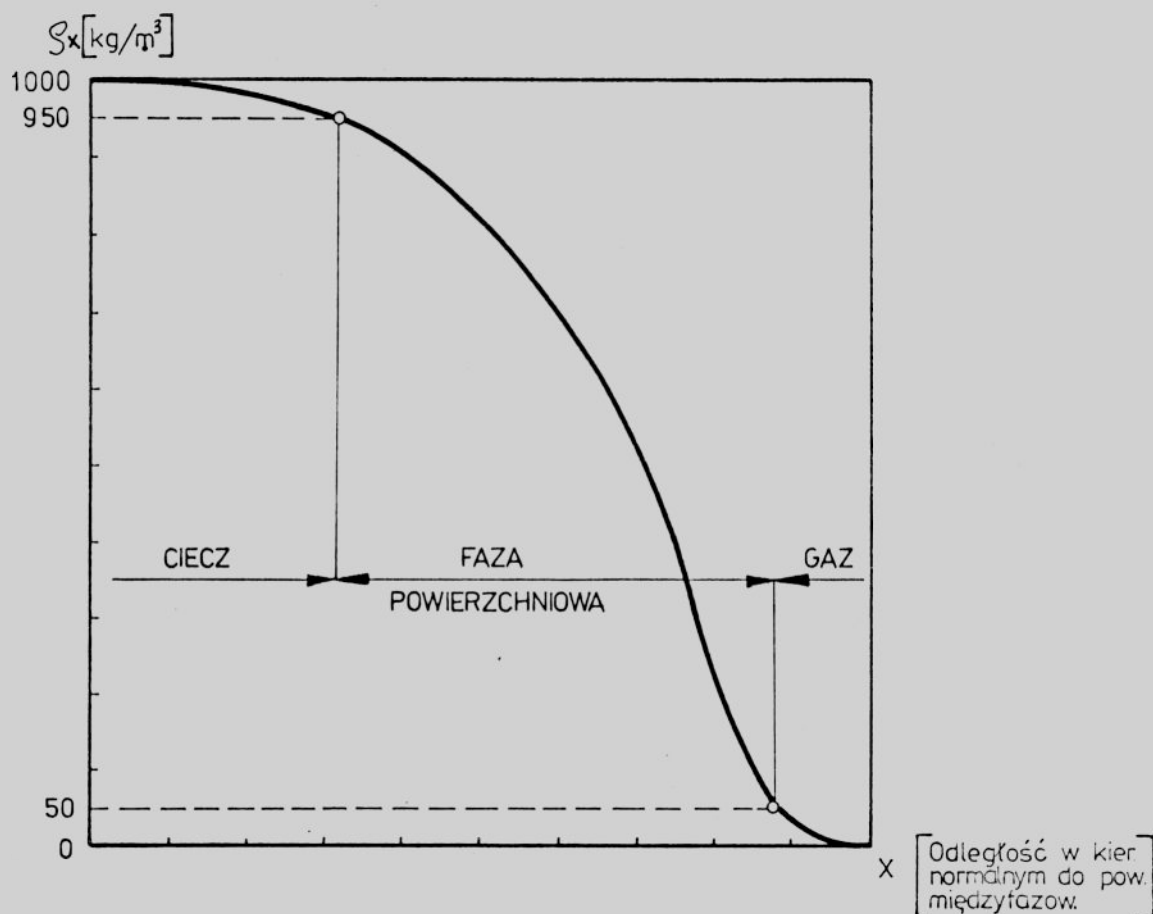
$$\sigma_0 = f_s \cong g_s$$

2.2

W układzie SI napięcie powierzchniowe mierzy się w N/m, właściwą powierzchnią energię swobodną w J/m², zatem wymiary tych dwóch wielkości fizycznych są identyczne.

Grubość warstwy powierzchniowej δ_s , w której siły międzycząsteczkowe nie równoważą się, jest rzędu kilku średnic cząsteczek. Obszar ten znajduje się ciągle w stanie molekularnej burzliwości; czas przebywania cząsteczki na powierzchni jest rzędu mikrosekundy, gdyż w warunkach równowagi między cieczą i jej parą zachodzi ciągły proces odparowania - kondensacji, oraz wymiany cząsteczek między obszarem powierzchniowym a wnętrzem fazy ciekłej. Obie fazy objętościowe nie przechodzą więc skokowo jedna w drugą, lecz w warstwie powierzchniowej gęstość, ciśnienie i inne wielkości intensywne zmieniają się w sposób ciągły. Można więc przyjąć, że warstwa /faza/ powierzchniowa zawarta jest między dwiema płaszczyznami, na których wartości pewnej wielkości intensywnej /np. gęstości/ różnią się dowolnie mało od wartości charakterystycznych dla sąsiednich faz ciągłych [169] /rys. 2.2/.

Operowanie pojęciem obszaru powierzchniowego, ze względu na dość arbitralne definiowanie jego granic nastrocza duże trudności, więc wygodnie jest założyć, że obie fazy rozdzielone są matematyczną powierzchnią międzyfazową [Gibbs, wg 4, 54, 61, i in.]. Wszelkie wielkości ekstensywne /G, F, U, i inne/ przypisuje się wówczas całej fazie objętościowej, tak jak gdyby sięgała jednolicie do powierzchni rozdziału. Rzeczywiste wartości charakteryzujące cały układ dwufazowy będą różniły się od sumy



Rys. 2.2. Określenie grubości obszaru powierzchniowego [469].

odpowiednich wartości obu faz objętościowych, a występujący nadmiar /dodatni lub ujemny/ przypisuje się obszarowi powierzchniowemu. Przyjmuje się również, że napięcie powierzchniowe działa na geometrycznej powierzchni międzyfazowej, pomijając rzeczywisty rozkład ciśnienia w warstwie powierzchniowej.

2.2. Adsorpcja na powierzchni międzyfazowej gaz - ciecz

W przypadku roztworów /cieczy dwuskładnikowych/ dążność do osiągnięcia minimum energii swobodnej przy stałej powierzchni może przejawiać się tylko poprzez zmianę napięcia powierzchniowego:

$$F_s = \sigma \cdot A \quad 2.3$$

Mieszankiny dwóch cieczy o podobnych napięciach powierzchniowych /np. ciecze organiczne/ wykazują liniową zależność napięcia powierzchniowego od stężenia, która dla roztworów regularnych ma postać:

$$\sigma = \sigma_A x_A + \sigma_B x_B + C_{2.4} x_A x_B \quad 2.4$$

Stała półempiryczna $C_{2.4}$ dla roztworów doskonałych jest równa zeru [4,61].

Jeżeli napięcia powierzchniowe obu cieczy różnią się znacznie między sobą /np. woda - alkohol/, to dodanie niewielkiej ilości cieczy o małym napięciu powierzchniowym obniża znacznie napięcie powierzchniowe roztworu w porównaniu z napięciem powierzchniowym rozpuszczalnika. Ponieważ efekt ten może być wywołany tylko obecnością cząsteczek substancji rozpuszczonej na powierzchni międzyfazowej, a obniżenie napięcia powierzchniowego jest procesem termodynamicznie korzystnym, więc można spodziewać się, że cząsteczki substancji rozpuszczonej, która powoduje obniżenie napięcia powierzchniowego będą samorzutnie adsorbować się na swobodnej powierzchni cieczy. Substancje, które przy bardzo małych stężeniach powodują duże obniżenie napięcia powierzchniowego roztworu nazywamy powierzchniowo-czynnymi lub powierzchniowo-aktywnymi, przy czym substancje takie, stanowiące jeden związek chemiczny nazywa się związkami powierzchniowo-czynnymi, a mieszaniny wielu związków - środkami powierzchniowo-czynnymi. Większość związków organicznych /alkohole, kwasy tłuszczowe, i in./ wykazuje aktywność powierzchniową względem wody, której napięcie powierzchniowe jest duże,

nie wykazuje jej jednak w stosunku do innych rozpuszczalników organicznych.

Dążenie cząsteczek związków organicznych do adsorpcji na powierzchni wody można wyjaśnić na przykładzie wodnego roztworu dowolnego alkoholu alkilowego [54]. Cząsteczki alkoholu zbudowane są z dwóch części o krańcowo różnych właściwościach: polarnej grupy alkoholowej, rozpuszczalnej w wodzie /a więc hydrofilowej/, oraz nierozpuszczalnego w wodzie /hydrofobowego/ łańcucha węglowodorowego. Cząsteczki alkoholu będą więc dążyć do powierzchni, gdzie osiągną energetycznie najkorzystniejsze położenie: grupa alkoholowa będzie znajdować się w wodzie, a łańcuch węglowodorowy - w powietrzu. Stężenie alkoholu w obszarze powierzchniowym będzie wzrastało tak długo, aż potencjały chemiczne w obszarze powierzchniowym i w głębi fazy ciekłej

$$\mu_s = \mu_s^\ominus + RT \ln C_s \quad 2.5$$

$$\mu_L = \mu_L^\ominus + RT \ln C_L \quad 2.6$$

zrównają się

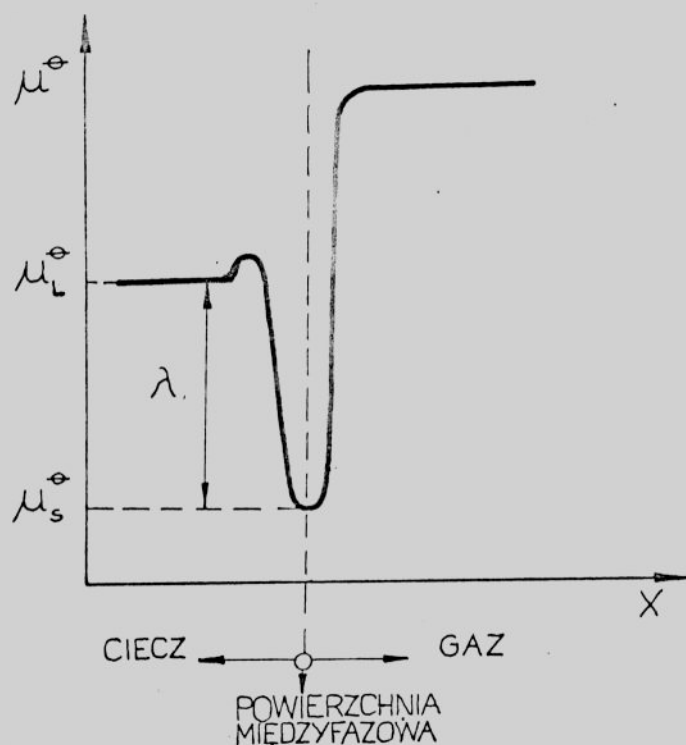
$$\mu_s = \mu_L \quad 2.7$$

co odpowiada większemu stężeniu alkoholu w obszarze powierzchniowym niż w fazie ciekłej /rys. 2.3/:

$$C_s > C_L \quad 2.8$$

/dla uproszczenia pominięte zostały aktywności/.

Cząsteczki alkoholu tworzą więc na powierzchni wody mniej lub bardziej zwartą monomolekularną warstwę adsorpcyjną, a napięcie powierzchniowe ulega obniżeniu do wartości σ :



Rys. 2.3. Standardowy potencjał chemiczny cząsteczek /np./ alkoholu w pobliżu powierzchni międzyfazowej woda - powietrze [54].

$$\sigma = \sigma_0 - \pi$$

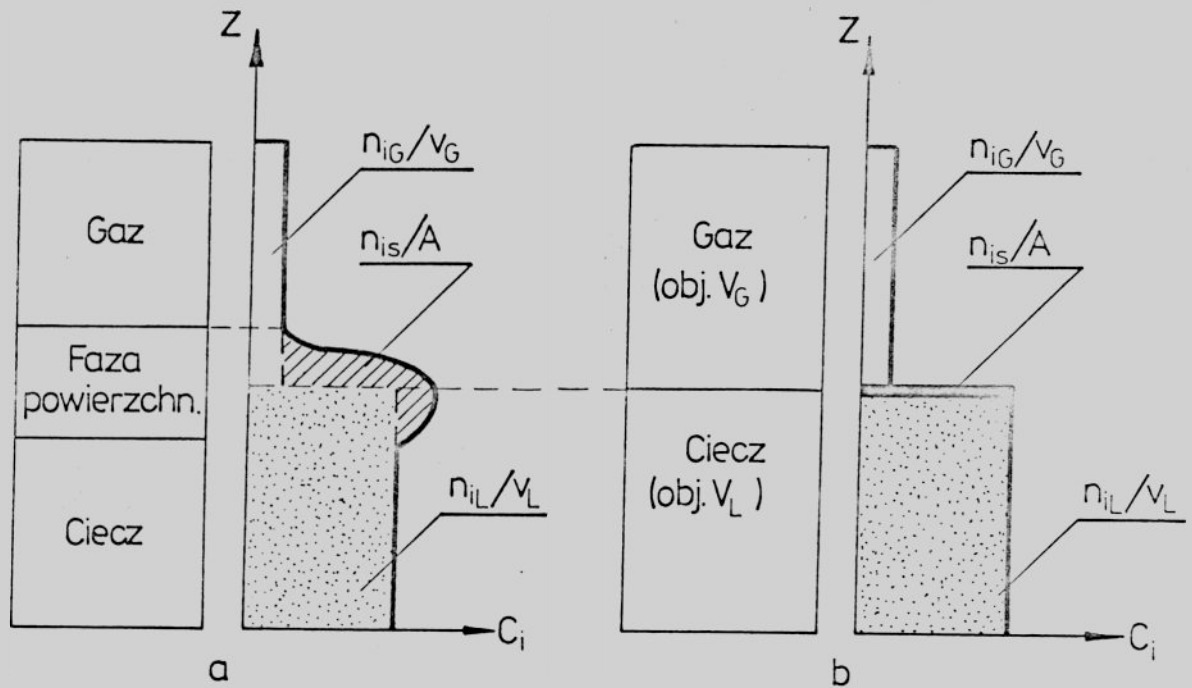
2.9

Wielkość π jest dwuwymiarowym ciśnieniem powierzchniowym, które jest zawsze dodatnie, gdy zaadsorbowane cząsteczki tworzące film powierzchniowy dążą do rozprzestrzeniania się po powierzchni wody. Zwykle $\sigma_0 > \pi$, tak, że $\sigma > 0$ i układ dąży w dalszym ciągu do zajęcia jak najmniejszej powierzchni. Gdy $\sigma_0 < \pi$, to wówczas $\sigma < 0$, co w układach ciecz - ciecz prowadzi do spontanicznej emulsyfikacji [54,55].

2.3. Równanie Gibbsa

W roku 1878 J.W. Gibbs wyprowadził termodynamicznie równanie różniczkowe opisujące równowagę adsorpcyjną na powierzchni

międzyfazowej. Punktem wyjścia było przyjęcie modelu, w którym geometryczna powierzchnia międzyfazowa reprezentuje obszar powierzchniowy o skończonej grubości /rys. 2.4/ [4 , 61 , 207].



Rys. 2.4. a/ Rzeczywisty rozkład stężenia składnika i w pobliżu powierzchni międzyfazowej gaz - ciecz,
b/ Model Gibbsa równoważny rozkładowi rzeczywistemu.

Na skutek zjawiska adsorpcji, różnica między całkowitą liczbą moli składnika i w rozważanym wycinku układu $/n_i/$ a sumą liczby moli tego składnika w fazie gazowej i ciekłej $/n_{iG} + n_{iL}/$ nie jest równa zero, lecz określa ilość tego składnika w fazie powierzchniowej $/n_{iS}/$.

$$n_i - /n_{iG} + n_{iL}/ = n_{iS} \quad 2.10$$

Jeżeli podzielimy n_{iS} przez pole powierzchni rozdziału A , to otrzymamy wielkość, którą Gibbs nazwał adsorpcją składnika i

/wymiar $[\text{kmol}/\text{m}^2]$ i oznaczył symbolem Γ_i :

$$\Gamma_i = \frac{n_{iS}}{A} \quad 2.11$$

Ponieważ wielkość ta wyraża nadmiar /dodatni lub ujemny/ stężenia danego składnika w fazie powierzchniowej w stosunku do stężeń w graniczących fazach, więc przyjęto nazywać ją nadmiarem powierzchniowym składnika i [4, 61, 207, 267].

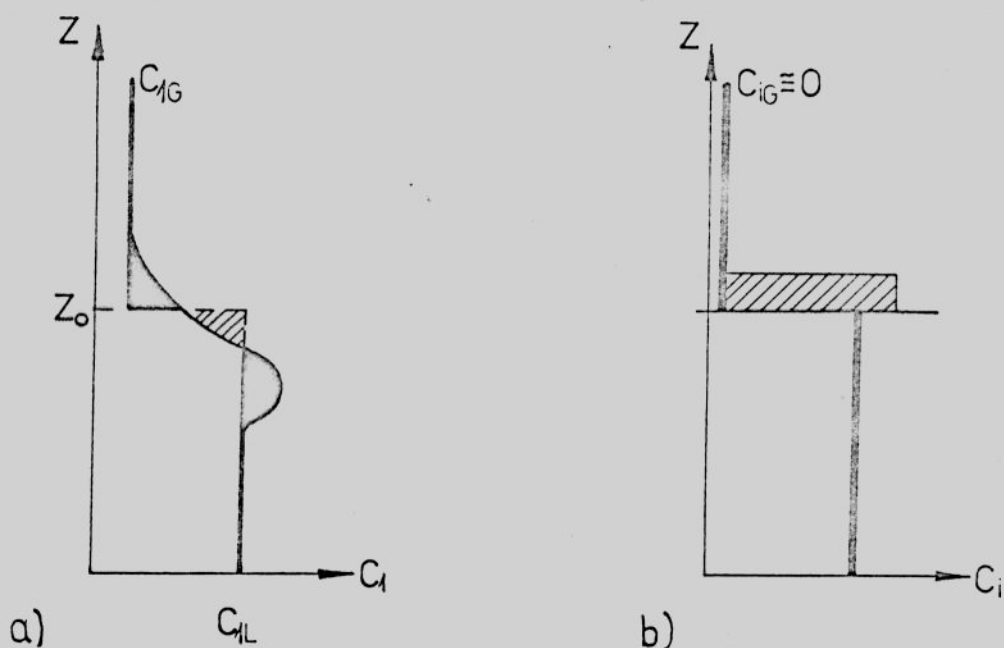
W analogiczny sposób można zdefiniować energię powierzchniową U_S , entropię powierzchniową S_S i wynikającą z tych dwóch wielkości swobodną energię powierzchniową F_S [61]. Nadmiar powierzchniowy określony równaniem /2.11/ zależy od położenia hipotetycznej powierzchni rozdziału zastępującej fazę powierzchniową. Gibbs przyjął takie jej położenie Z_0 , że nadmiar powierzchniowy rozpuszczalnika jest równy zeru /rys. 2.5a/. Nadmiar powierzchniowy Gibbsa Γ_i / Z_0 liczbowo równy jest tzw. względnemu nadmiarowi powierzchniowemu składnika i liczonemu w stosunku do rozpuszczalnika 1, przy czym wielkość ta nie zależy już od przyjętego położenia powierzchni rozdziału /Guggenheim, wg [4, 61] /:

$$\Gamma_{i,1} = \Gamma_i - \Gamma_1 \frac{C_{iG} - C_{iL}}{C_{1G} - C_{1L}} \quad 2.12$$

$$\Gamma_{i,1} = (\Gamma_i)_{Z_0} \quad 2.13$$

Dla układu gaz - ciecz dwuskładnikowa równanie /2.12/ upraszcza się /indeks 2 oznacza składnik rozpuszczony/:

$$\Gamma_{2,1} = \Gamma_2 - \Gamma_1 \frac{x_2}{x_1} \quad 2.14$$



Rys. 2.5. a/ Powierzchnia rozdziału z_0 , która daje zerową adsorpcję rozpuszczalnika
b/ Względna adsorpcja, gdy stężenie składnika i w fazie gazowej jest pomijalne

Ponieważ /2.14/ nie zależy od położenia powierzchni rozdziału, więc można założyć, że znajduje się ona między fazą powierzchniową a roztworem. Wówczas Γ_2 i Γ_1 określają wprost stężenia składnika 2 i rozpuszczalnika 1 w warstwie powierzchniowej, Γ_2^s i Γ_1^s :

$$\Gamma_{2,1} = x_2 \left(\frac{\Gamma_2^s}{x_2} - \frac{\Gamma_1^s}{x_1} \right) \quad 2.15.$$

Z równania /2.15/ wynika, że w przypadku rozcieńczonych roztworów substancji silnie adsorbujących się na powierzchni międzyfazowej $/x_1 \gg x_2$, $\Gamma_1^s \ll \Gamma_2^s$ nadmiar powierzchniowy $\Gamma_{2,1}$ określa z dobrym przybliżeniem ich stężenie powierzchniowe.

Równanie adsorpcji Gibbsa /szczegółowe wyprowadzenie podaje m.in. Adamson [4], Defay [61], Davies [54], i in./ wiąże

zmiany napięcia powierzchniowego roztworu z nadmierami powierzchniowymi i zmianami potencjałów chemicznych składników roztworu /przy stałych T i p/:

$$d\sigma = - \sum_i \Gamma_i d\mu_i \quad 2.16$$

Przy następujących założeniach:

- 1° - faza ciekła jest dwuskładnikowa /1 - rozpuszczalnik, 2 - składnik rozpuszczony ulegający adsorpcji/,
- 2° - nadmiar powierzchniowy rozpuszczalnika jest równy zeru /założenie Gibbsa/,
- 3° - substancja rozpuszczona jest niejonowym związkiem powierzchniowo-czynnym, a jego stężenie jest mniejsze od krytycznego stężenia micelnego /dla $C_2 < CMC$, aktywność rozpuszczonego składnika można zastąpić jego koncentracją, jak w roztworze doskonałym/ równanie Gibbsa przybiera postać:

$$\Gamma_{2,1} = - \frac{C_2}{RT} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial C_2} \right)_{T,p} = - \frac{1}{RT} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \ln C_2} \right)_{T,p} \quad 2.17$$

lub, uwzględniając zależność /2.9/:

$$\Gamma_{2,1} = \frac{C_2}{RT} \left(\frac{\partial \pi}{\partial C_2} \right)_{T,p} = \frac{1}{RT} \left(\frac{\partial \pi}{\partial \ln C_2} \right)_{T,p} \quad 2.18$$

W praktyce niejonowa substancja powierzchniowo-czynna nie jest chemicznie homogeniczna, lecz stanowi mieszaninę homologów o różnych długościach łańcucha hydrofobowego lub grupy hydrofilowej. Schick[267] wykazał, że w tym przypadku równanie izotermy adsorpcji Gibbsa również można stosować /indeksy pominięto/:

$$\Gamma = \frac{-1}{RT} \frac{d\sigma}{d \ln C} = \frac{-C}{RT} \frac{d\sigma}{dC} \quad 2.19$$

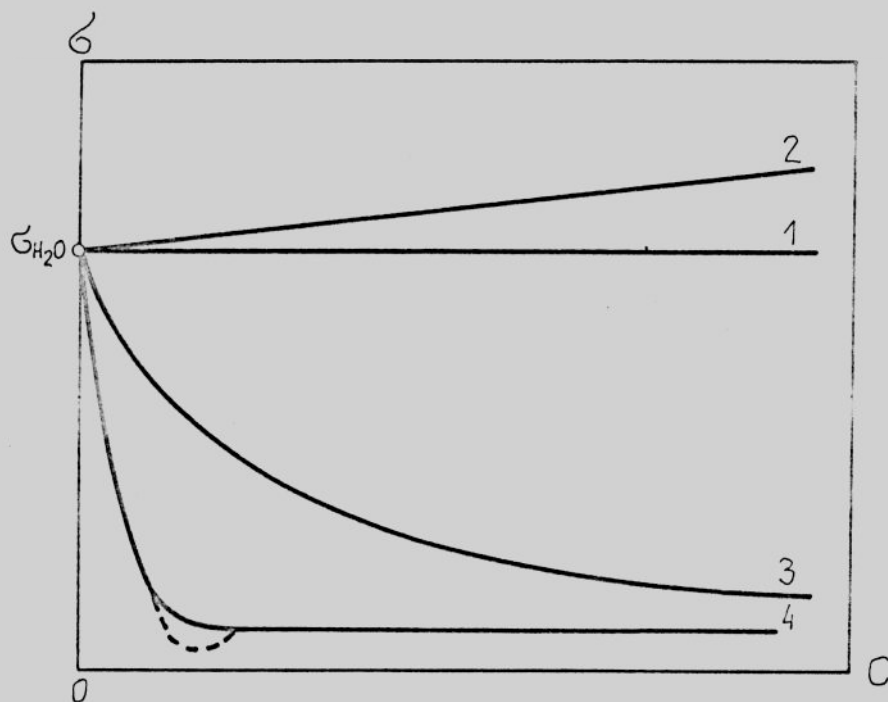
gdzie C jest sumą koncentracji poszczególnych składników:

$$C = \sum_i C_i \quad 2.20$$

a Γ stanowi całkowity nadmiar powierzchniowy wszystkich składników:

$$\Gamma = \sum_i \Gamma_{i,1} \quad 2.21$$

Substancje ulegające adsorpcji na powierzchni międzyfazowej roztwór wodny - powietrze można podzielić na trzy grupy, w zależności od wpływu ich stężenia na napięcie powierzchniowe [54,207,301] /rys. 2.6/.



Rys. 2.6. Zależność napięcia powierzchniowego wodnych roztworów różnych substancji od ich stężenia.

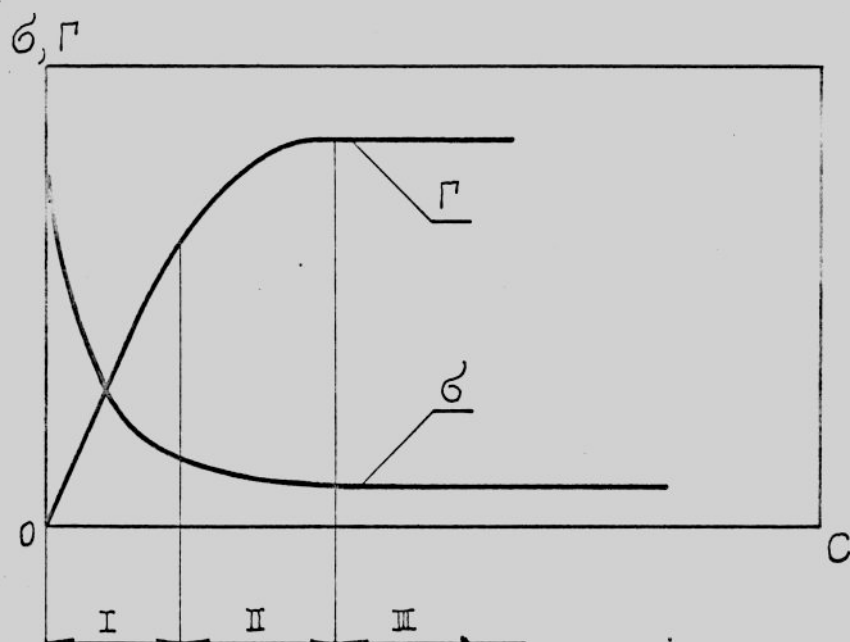
- 1° - Substancje powodujące podwyższenie napięcia powierzchniowego, np. elektrolity nieorganiczne /krzywa 2/ ulegają adsorpcji ujemnej / $\frac{d\sigma}{dC} > 0$, $\Gamma < 0$ /.
- 2° - Substancje obniżające napięcie powierzchniowe, np. alkohole i kwasy organiczne /krzywa 3/ ulegają adsorpcji dodat-

niej $\frac{d\sigma}{dC} < 0$, $\Gamma > 0$.

2a° - Substancje bardzo silnie obniżające napięcie powierzchniowe, np. polioksyetylenowane alkohole /krzywa 4/ adsorbują się na powierzchni międzyfazowej przy bardzo małych stężeniach $\frac{d\sigma}{dC} < 0$, $\Gamma > 0$, a od pewnej wartości stężenia $/C > CMC/$ napięcie powierzchniowe ustala się. Występowanie minimum na krzywej $\sigma = \sigma/C$ tłumaczy się obecnością śladowych ilości zanieczyszczeń w roztworze [54,267].

3° - Substancje nie zmieniające napięcia powierzchniowego /krzywa 1/ nie adsorbują się $\frac{d\sigma}{dC} = 0$, $\Gamma = 0$ i skład fazy powierzchniowej jest taki sam, jak reszty roztworu.

Na podstawie znanego przebiegu napięcia powierzchniowego od stężenia /lub logarytmu stężenia/ substancji powierzchniowo-aktywnej można otrzymać zależność nadmiaru powierzchniowego od stężenia. Typowe profile zależności $\sigma = \sigma/C$ i $\Gamma = \Gamma/C$ przedstawione są na rys. 2.7.



Rys. 2.7. Typowa zależność $\sigma = \sigma/C$ i $\Gamma = \Gamma/C$ dla wodnych roztworów środków powierzchniowo-czynnych.

Miarą zdolności danej substancji do adsorpcji jest jej aktywność powierzchniowa $\bar{G}_S$:

$$\bar{G}_S = \lim_{c \rightarrow 0} \left(- \frac{\partial \sigma}{\partial c} \right) \quad 2.22$$

Jeżeli przyjmiemy, że warstwa adsorpcyjna jest monomolekularnym filmem o grubości δ_S , to można określić nadmiar powierzchniowy w sposób następujący:

$$\Gamma = (c_S - c) \delta_S \quad 2.23$$

Z równań /2.19/ i /2.23/ obliczyć można stosunek stężenia substancji powierzchniowo-czynnej w warstwie powierzchniowej do jej stężenia w głębi fazy ciekłej:

$$\frac{c_S}{c} = 1 - \frac{1}{\delta_S} \frac{1}{RT} \frac{d\sigma}{dc} \quad 2.24$$

Dla niejonowych związków powierzchniowo-czynnych w obszarze liniowej zależności $\sigma = \sigma/c$ wartość c_S/c , jest rzędu $10^4 - 10^5$ /za δ_S przyjmuje się długość cząsteczki związku powierzchniowo-czynnego/ [465, 281].

2.4. Izotermy adsorpcji dla substancji niejonowych

W przypadku rozcieńczonych roztworów wodnych substancji organicznych, zależność między napięciem powierzchniowym roztworu σ , napięciem powierzchniowym rozpuszczalnika σ_0 i stężeniem substancji obniżającej napięcie C określa empiryczne równanie Szyszkowskiego [4, 54, 61, 207, 267]:

$$\pi = \sigma_0 - \sigma = c'_{2.25} \ln \left(1 + c''_{2.25} \cdot c \right) \quad 2.25$$

gdzie $C'_{2.25}$ jest stałą charakterystyczną dla danego szeregu homologicznego, a $C''_{2.25}$ charakteryzuje konkretny związek chemiczny. Jeżeli z równania Szyszkowskiego obliczy się pochodną $-d\sigma/dC$ i podstawí do równania Gibbsa, to otrzymuje się równanie analogiczne do równania izotermy adsorpcji Langmuira:

$$\Gamma = \frac{C'_{2.25}}{RT} \cdot \frac{C''_{2.25} \cdot C}{1 + C''_{2.25} \cdot C} \quad 2.26$$

Ze wzoru tego wynika, że w miarę wzrostu stężenia substancji powierzchniowo-czynnej w roztworze, jej stężenie powierzchniowe wzrasta początkowo proporcjonalnie do C /gdy $C''_{2.25} \cdot C \ll 1$ /, lecz dla wyższych stężeń /gdy $C''_{2.25} \cdot C \gg 1$ / dąży do wartości stałej. Dla obszaru I /rys. 7.2/ można więc izotermę adsorpcji przybliżyć zależnością:

$$\Gamma = C_{2.26} \cdot C \quad 2.26$$

gdzie $C_{2.26} = C'_{2.25} \cdot C''_{2.25}/RT$.

Równanie /2.26/ można również otrzymać z rozważań nad kinetyką procesów adsorpcji i desorpcji cząsteczek związku powierzchniowo-czynnego z jego rozcieńczonego roztworu wodnego [54].

W obszarze III /rys. 7.2/ stężenie powierzchniowe osiąga swą maksymalną wartość:

$$\Gamma = \Gamma_{\max} = \frac{C'_{2.25}}{RT} \quad 2.27$$

Przy niezbyt wysokich stężeniach /obszar II, rys. 7.2/ równowagę adsorpcyjną opisać można empirycznym równaniem Freundlicha [54]:

$$\Gamma = C'_{2.28} \cdot C^{1/C''_{2.28}} \quad 2.28$$

gdzie $C'_{2.28}$ i $C''_{2.28}$ są stałymi charakteryzującymi dany układ: substancja powierzchniowo-czynna - rozpuszczalnik.

Głównymi parametrami charakteryzującymi stan powierzchniowego filmu adsorpcyjnego danej substancji na powierzchni jej roztworu wodnego są:

- ciśnienie powierzchniowe - Π

$$\Pi = \sigma_0 - \sigma \quad 2.9$$

- pole powierzchni międzyfazowej przypadające na jedną zaadsorbowaną cząsteczkę - A_1

$$A_1 = \frac{1}{\Gamma_{N_{AV}}} \quad 2.29$$

- temperatura - T ,

zatem ogólne równanie:

$$\Pi = \Pi / A_1, T/ \quad 2.30$$

można nazwać równaniem stanu filmu powierzchniowego [4, 54, 267] Przy założeniu, że cząsteczki tworzące film nie oddziałują wzajemnie na siebie, Stauff [267] wyprowadził ogólne równanie stanu filmu powierzchniowego:

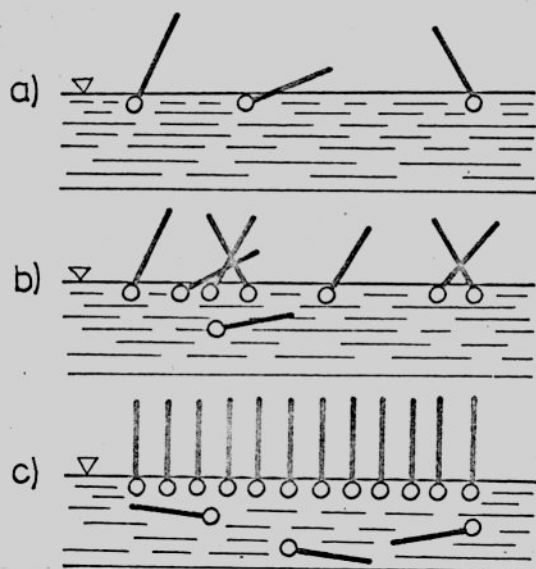
$$\Pi = \frac{1}{A_{1min}} kT \ln \frac{A_1}{A_1 - A_{1min}} \quad 2.31$$

gdzie A_{1min} jest polem powierzchni przypadającym na jedną zaadsorbowaną cząsteczkę dla $\Gamma = \Gamma_{max}$, a k jest stałą Boltzmana. Równanie /2.31/ można również otrzymać z zależności Szyzskowskiego /2.25/ i Langmuira /2.26/[267]. Dla małych wartości Π i dużych A_1 z /2.31/ otrzymuje się równanie stanu "doskonale gazowego" filmu /dwuwymiarowego/

$$\pi A_1 = kT$$

2.32

które jest analogiczne do równania stanu gazu doskonałego. Przy wyższych wartościach ciśnienia powierzchniowego π /czyli mniejszych wartościach A_1 / izotermy wykazują odstępstwa od izotermy idealnej; należy wówczas wprowadzić poprawki na powierzchnię własną zaadsorbowanych cząsteczek i wzajemne oddziaływanie między nimi /analogicznie do poprawek w równaniu van der Waalsa dla gazów rzeczywistych/. Odchylenia od prawa dwuwymiarowego gazu doskonałego rosną wraz ze wzrostem długości łańcucha wodorowęglowego, co tłumaczy się faktem, że cząsteczki związku powierzchniowo-czynnego leżą mniej lub bardziej płasko na powierzchni międzyfazowej. W miarę wzrostu stężenia substancji powierzchniowo-czynnej w roztworze zmienia się struktura filmu adsorpcyjnego /rys. 2.8/, aż osiągnięty zostanie stan maksymalnego nasycenia w warstwie powierzchniowej / $\Gamma = \Gamma_{\max}$, $A_1 = A_1 \min$ /.



Rys. 2.8. Struktura powierzchniowego filmu adsorpcyjnego w zależności od stężenia związku powierzchniowo-czynnego w roztworze

Obszerne omówienie stanów filmów powierzchniowych oraz przemian fazowych filmów dokonał Adamson [4] i Defay [61]. Filmy adsorpcyjne tworzone przez rozpuszczalne związki powierzchniowo-czynne typu oksyetylenowanych alkoholi lub alkilofenoli polegają prawu doskonałych lub niedoskonałych gazów dwuwymiarowych.

Zwiększanie stężenia substancji powierzchniowo-czynnej powoduje obniżanie napięcia powierzchniowego roztworu do pewnej granicznej wartości $\sigma_{\min}$; stężenie powierzchniowe osiąga wówczas swą wartość maksymalną $\Gamma_{\max}$. Dalsze zwiększanie stężenia w roztworze prowadzi do tego, że cząsteczki związku powierzchniowo-czynnego zaczynają zbierać się w większe skupiska, zwane micelami. Według różnych teorii [4, 5, 267] mogą to być micelle kuliste, płytkowe lub walcowe, zbudowane w ten sposób, że grupy hydrofilowe skierowane są na zewnątrz, a grupy hydrofobowe do wnętrza zbioru. W pobliżu stężenia odpowiadającego początkowi tworzenia się micel /tzw. krytycznego stężenia micelnego - CMC/ występują nagłe zmiany niektórych własności fizykochemicznych roztworu, m.in. napięcia powierzchniowego, przewodnictwa, ciśnienia osmotycznego.

Z równania izotermy adsorpcji Langmuira $\Gamma_{2.33} = 1/\Gamma_{2.25}$

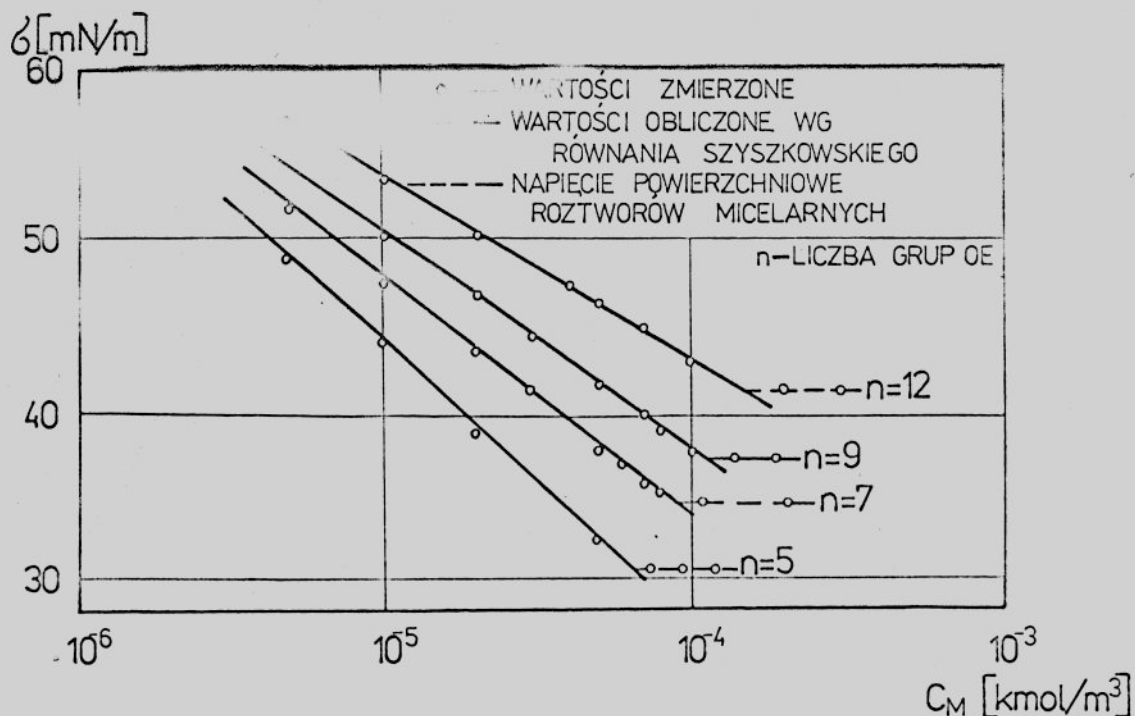
$$\Gamma = \Gamma_{\max} \frac{C}{C + C_{2.33}} \quad 2.33$$

oraz na podstawie danych eksperymentalnych $\Gamma_{2.33} \approx 2 \cdot 10^{-7}$ kmol/m³ $\ll$ CMC = 10^{-4} kmol/m³ wynika, że dla $C = \text{CMC}$:

$$\Gamma_{\text{CMC}} \approx \Gamma_{\max} \quad 2.34$$

$$A_{1\text{CMC}} = A_{1\min} \quad 2.35$$

co po uwzględnieniu równania Szyszkowskiego oznacza liniową zależność ciśnienia powierzchniowego π od logarytmu stężenia w pewnym zakresie stężeń mniejszych od CMC /rys. 2.9/.

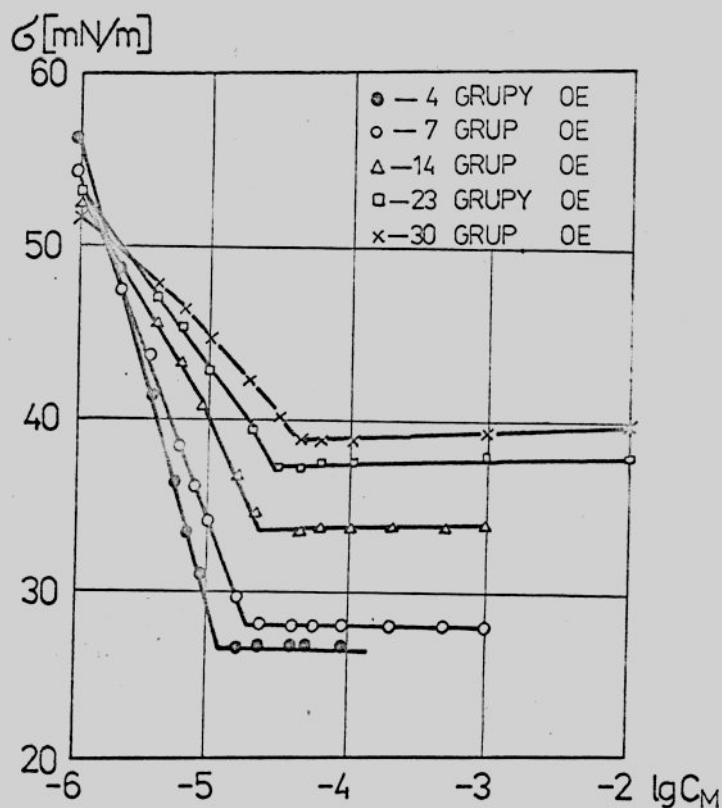


Rys. 2.9. Zależność napięcia powierzchniowego od $\lg C_M$ dla wodnych roztworów homogenicznych oksyetylenowanych n-dodekanoli

Wpływ struktury molekularnej cząsteczek niejonowych związków powierzchniowo-czynnych na ich aktywność powierzchniową należy rozpatrywać poprzez zależność aktywności powierzchniowej /rozumianej tu jako przebieg funkcji $\sigma = \sigma/C//$ od rodzaju i wielkości grupy hydrofobowej oraz rodzaju i wielkości grupy hydrofilowej.

Najczęściej spotykaną grupą hydrofilową jest grupa alkoholowa - CH_2OH , która nadaje cząsteczce niewielką rozpuszczalność, więc w przypadku dłuższych łańcuchów wodorowęglowych grupę tę rozbudowuje się w łańcuch przez przyłączenie tlenku etylenu:

- $/CH_2 - CH_2O/n$ H. Typowy przykład wpływu liczby grup tlenku etylenu /EO/ na zmianę napięcia powierzchniowego podany jest na rys. 2.10 [267]:



Rys. 2.10. Zależność napięcia powierzchniowego wodnych roztworów polioksyetylenowanych n-dodekanoli od logarytmu stężenia C_M [kmol/m³]

Zwiększenie liczby grup EO powoduje wzrost CMC /stężenie odpowiadające załamaniu krzywej $\sigma = \sigma / \lg C //$, zmniejszanie się wartości π_{max} oraz zmniejszanie się pochylenia krzywej dla $C \leq CMC$. Oznacza to, że stężenie powierzchniowe Γ maleje, czyli zwiększa się pole powierzchni międzyfazowej przypadające na jedną cząsteczkę A_1 . Z przeliczeń otrzymuje się, że dla danej długości łańcucha wodorowęglowego

$$A_1 n_{EO}^{-1/2} = \text{idem}, \quad 2.36$$

zatem A_1 jest proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego z liczby grup EO. Wynika stąd wniosek, że hydrofilowe łańcuchy oksyetylenowe zanurzone są w fazie wodnej tworząc spirale, których wielkość rośnie ze wzrostem liczby grup EO [267].

Wpływ długości łańcucha wodorowęglowego na przebieg izoterm $\pi = \pi/A_1/T$ nie został jeszcze dokładnie ustalony, chociaż już od roku 1891 znana jest reguła Traubego: dla zachowania danej wartości napięcia powierzchniowego zmniejszenie liczby grup CH_2 o jedną wymaga ok. 3,2 - krotnego zwiększenia stężenia danego związku [4, 54, 61, 267]. Reguła Traubego dotyczy rozcieńczonych roztworów w zakresie liniowej zależności $\sigma = \sigma/C$.

Przebieg izotermy $\sigma = \sigma/C$ dla niejonowych związków powierzchniowo-czynnych w dużym stopniu zależy od obecności nieorganicznych elektrolitów w roztworze. Krzywa napięcie powierzchniowe - stężenie przesuwają się w kierunku niższych stężeń /CMC maleje/, zatem obecność elektrolitów powoduje zwiększenie ciśnienia powierzchniowego π przy danym stężeniu związku powierzchniowo-czynnego [54, 267].

Wpływ temperatury na napięcie powierzchniowe określa równanie Eötvösa zmodyfikowane przez Ramsaya i Shieldsa [4, 207, 301]:

$$\sigma_0 v_M^{2/3} = C_{2.37} / T_c - T - 6/ \quad 2.37$$

gdzie v_M jest objętością molową cieczy, T_c jej temperaturą krytyczną, a $C_{2.37}$ stałą charakterystyczną dla danej cieczy.

Dla temperatur odległych od temperatury krytycznej obowiązuje prostsza zależność [5] :

$$\sigma_t = \sigma_{20} + \left(t - 20 \right) \frac{d\sigma}{dt} \quad 2.38$$

w której współczynnik temperaturowy $d\sigma/dt$ jest dla danej cieczy stały i ma wartość ujemną. W przypadku wodnych roztworów niejonowych związków powierzchniowo-czynnych napięcie powierzchniowe również maleje z temperaturą, lecz współczynnik $d\sigma/dt$ jest zależny od stężenia. Wzrost temperatury powoduje obniżenie CMC i zwiększenie nachylenia krzywej $\sigma = \sigma/C$ lub $\ln C/$. Z równania Gibbsa /2.19/ wynika, że stężenie powierzchniowe, w zależności od zmian temperatury T i związanej z tym zmianą aktywności $d\sigma/dC$ może zwiększyć się lub zmniejszyć [267].

2.5. Kinetyka tworzenia adsorpcyjnych filmów powierzchniowych

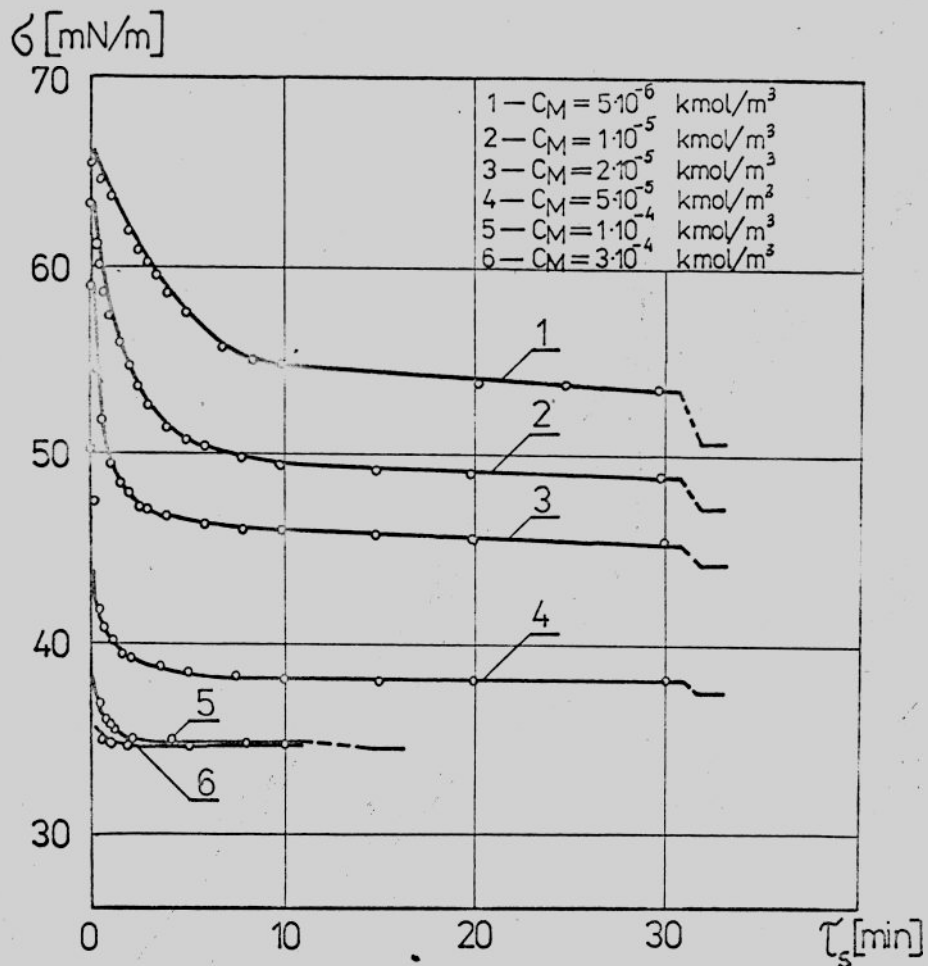
Liczne dane wskazują na to, że czas niezbędny dla osiągnięcia równowagi adsorpcyjnej na powierzchni międzyfazowej gaz - wodny roztwór substancji powierzchniowo-czynnej zmienia się w zależności od szeregu czynników od tysięcznych części sekundy do wielu godzin. W związku z tym należy rozróżnić trzy postacie napięcia powierzchniowego [61, 115, 136, 267]:

σ^0 - czyste dynamiczne napięcie powierzchniowe - σ_d^0 - jest napięciem powierzchniowym świeżo utworzonej powierzchni, mierzonym w momencie jej utworzenia / $\tau_s = 0$ /. Skład powierzchni w chwili $\tau_s = 0$ jest taki sam, jak całego roztworu, zatem względny nadmiar powierzchniowy składnika ulegającego adsorpcji jest równy zeru / $\Gamma_{2,1} = 0$ />.

2° - dynamiczne napięcie powierzchniowe - σ_d - jest napięciem powierzchniowym zmieniającym się w przedziale czasu $0 < \tau_s < \tau_s^*$ w zakresie $\sigma_{st} < \sigma_d < \sigma_d^0$.

3° - statyczne napięcie powierzchniowe - σ_{st} - jest napięciem powierzchniowym odpowiadającym stanowi równowagi termodynamicznej między powierzchnią międzyfazową a roztworem, wynikającemu z równania Gibbsa / $\tau_s \geq \tau_s^*$ /.

Określanie zależności napięcia powierzchniowego od "czasu życia" powierzchni międzyfazowej znajduje zastosowanie w eksperymentalnych badaniach kinetyki adsorpcji. Przykład takiej zależności przedstawiony jest na rys. 2.11 [267].



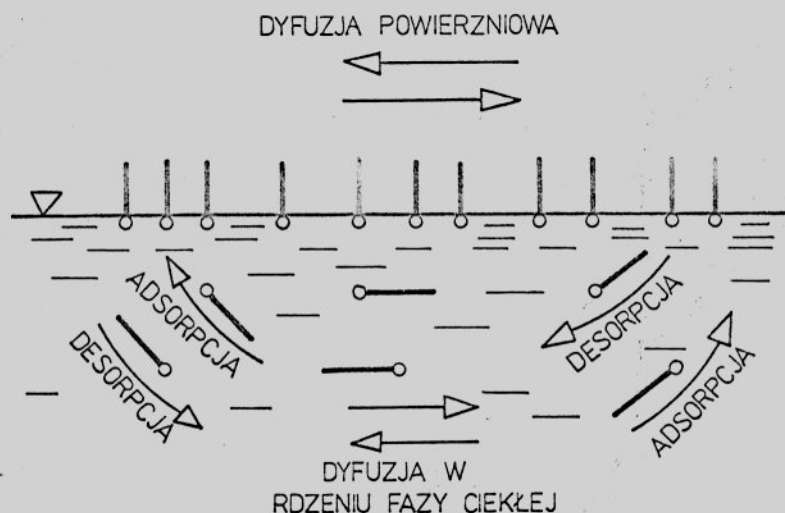
Rys. 2.11. Wpływ stężenia n-dodekanolu + 7EO w wodzie na dynamiczne napięcie powierzchniowe

Z przebiegu krzywych $\sigma_d = \sigma_d / \tau_s$ przedstawionych na wykresie, oraz z innych danych przytoczonych przez Schicka [267] wyciągnąć można następujące wnioski:

- 1° - dla danego związku powierzchniowo-czynnego szybkość osiągnięcia równowagi adsorpcyjnej jest tym mniejsza, im mniejsze jest stężenie tego związku w roztworze,
- 2° - przy równej liczbie grup EO i takich samych ciśnieniach powierzchniowych π , równowaga ustala się szybciej w roztworach związków powierzchniowo-czynnych o krótszym łańcuchu wodowęglowym,
- 3° - przy takich samych grupach hydrofobowych szybkość ustalenia się równowagi powierzchniowej rośnie ze wzrostem liczby grup EO.

W ogólnym przypadku można założyć, że proces adsorpcji z roztworu cząsteczek związku powierzchniowo-czynnego na powierzchni międzyfazowej odbywa się w dwóch etapach [54, 66, 123, 137, 165, 219, 267, 300]:

- 1° - ruch cząsteczek związku powierzchniowo-czynnego w głębi roztworu do podpowierzchniowej warstwy na drodze dyfuzji /i konwekcji/ w czasie τ_d /czas dyfuzji/,
- 2° - ruch cząsteczek z obszaru podpowierzchniowego do warstwy powierzchniowej /rzeczywista adsorpcja/ w czasie τ_a /rzeczywisty czas adsorpcji/. Szczegółowa analiza procesu ustalania się równowagi powierzchniowej wymaga dodatkowego uwzględnienia dwóch czynników [54, 246]:
- 3° - desorpcji cząsteczek związku powierzchniowo-czynnego z powierzchni międzyfazowej do roztworu,
- 4° - dyfuzji i konwekcji powierzchniowej zaadsorbowanych cząsteczek.



Rys. 2.12. Ruch cząsteczek związku powierzchniowo-czynnego w pobliżu powierzchni międzyfazowej

W wielu przypadkach szybkość jednego z dwóch podstawowych etapów /1^o lub 2^o/ jest znacznie większa od szybkości drugiego i wówczas procesem limitującym jest proces przebiegający wolniej.

Ward i Tordai [300] rozpatrywali kinetykę adsorpcji przy założeniu, że równowaga termodynamiczna między warstwą podpowierzchniową /o grubości rzędu kilku średnic cząsteczek/ a warstwą powierzchniową /monomolekularną/ ustala się natychmiast, a stężenie w warstwie podpowierzchniowej zmienia się od wartości stężenia w głębi roztworu C_L do zera na skutek adsorpcji, tuż po utworzeniu nowej powierzchni. Powstała różnica stężeń w roztworze i warstwie podpowierzchniowej jest siłą napędową dyfuzji cząsteczek związku powierzchniowo-czynnego w kierunku warstwy podpowierzchniowej. Dla bardzo krótkich czasów, gdy stężenie w warstwie podpowierzchniowej jest pomijalne, otrzymano równanie pozwalające wyznaczyć stężenie powierzchniowe Γ/τ w czasie τ po utworzeniu powierzchni:

$$\Gamma(\tau) = 2 C_L \left(\frac{D_L \tau}{\pi} \right)^{0,5} \quad 2.39$$

gdzie D_L jest współczynnikiem dyfuzji cząsteczek związku powierzchniowo-czynnego w wodzie, a $\pi = 3,14$.

Dla dłuższych czasów, gdy stężenie w warstwie podpowierzchniowej C_{SL} nie jest pomijalne, otrzymano równanie ogólniejsze uwzględniające dyfuzję wsteczną:

$$\Gamma(\tau) = 2 \left(\frac{D_L}{\pi} \right)^{0,5} \left[C_L \tau^{0,5} - \int_0^{\tau^{0,5}} C_{SL}(\theta) d(\tau - \theta)^{0,5} \right] \quad 2.40$$

gdzie θ zmienia się w przedziale $\langle 0, \tau \rangle$.

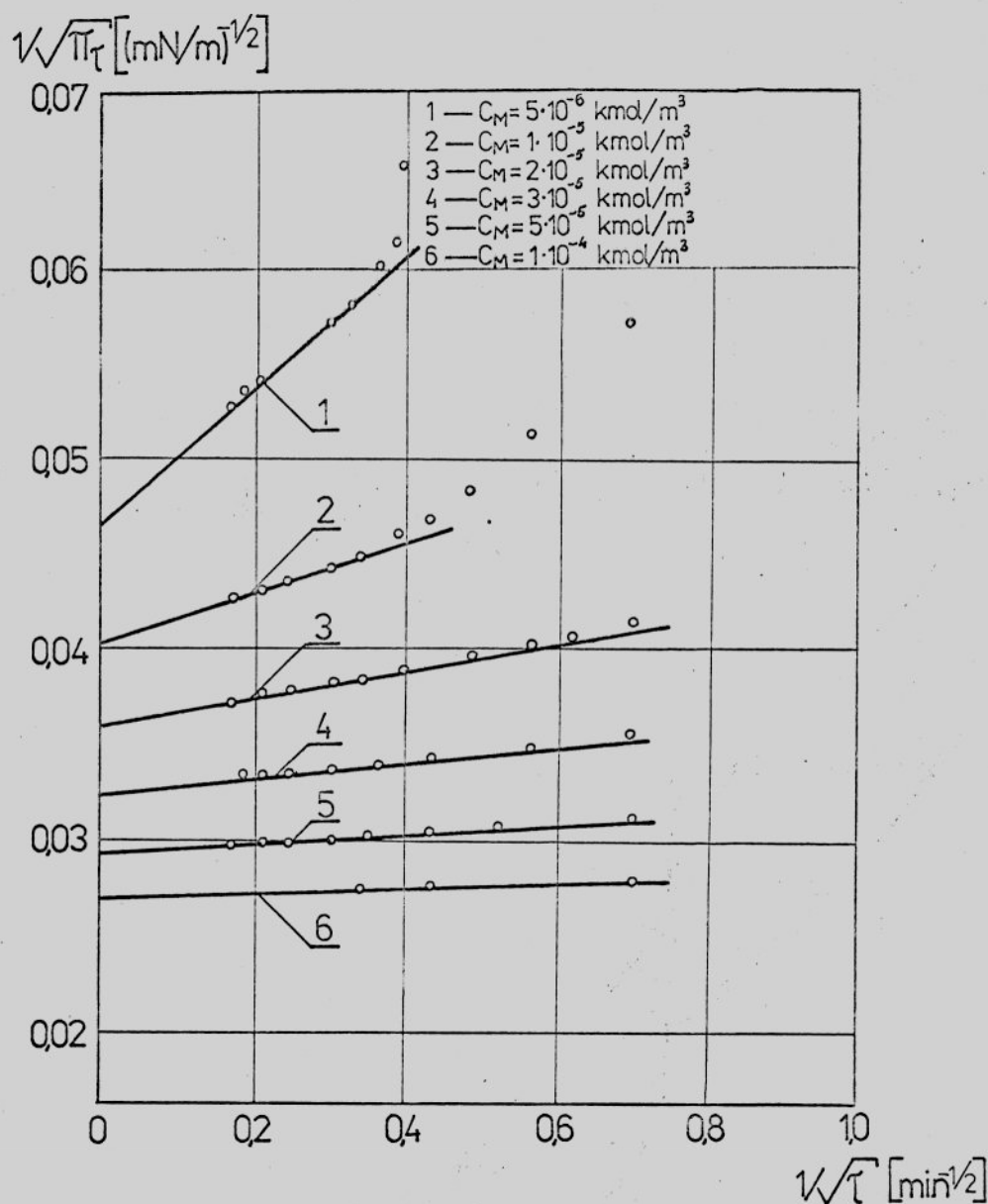
Bartholome i Schafer [267] wyprowadzili teoretycznie zależność napięcia powierzchniowego od czasu, zakładając, że szybkość adsorpcji limitowana jest procesem dyfuzji cząsteczek związku powierzchniowo-czynnego z głębi roztworu do powierzchni:

$$\frac{1}{\pi(\tau)} = \frac{C'_{2.41}}{C''_{2.41}} \cdot \frac{1}{\tau^{0,5}} + \frac{1}{C''_{2.41}} \quad 2.41$$

Wynika stąd wniosek, że zależność $1/\pi(\tau)$ od $1/\tau^{0,5}$ powinna być liniowa i przecinać oś rzędnych w punkcie $1/C''_{2.41} = 1/\pi/\tau \rightarrow \infty$. Dzięki temu możliwe staje się określenie równowagowych /statycznych/ wartości π_{st} poprzez ekstrapolowanie do $1/\tau^{0,5} = 0$ /rys. 2.13/.

Posner i Alexander [219] założyli, że szybkość ustalenia się równowagi między warstwą podpowierzchniową i adsorpcyjną jest znacznie mniejsza od szybkości dopływu cząsteczek związku powierzchniowo-czynnego do warstwy podpowierzchniowej $/C_{SL} = C_L/$ i w oparciu o model adsorpcji Langmuira otrzymali równanie:

$$\frac{\Gamma(\tau)}{\Gamma^*} = 1 - \exp \left[- \left(k_a C_L + k_d \frac{\Gamma_{\max}}{\delta_s} \right) \tau \right] \quad 2.42$$



Rys. 2.13. Określanie Π_{st} metodą ekstrapolacji /wodne roztwory n-dodekanolu + 7EO/.

gdzie: k_a - współczynnik szybkości adsorpcji [m³/kmol.s],
 k_d - współczynnik szybkości desorpcji [m³/kmol.s],
 Γ^* - stężenie powierzchniowe, równowagowe względem C_L ,
 [kmol/m²]

Wartość wyrażenia $\Gamma/\tau // \Gamma^*$, określająca stopień zbliżenia do równowagi adsorpcyjnej maleje w miarę zmniejszania stężenia

C_L ; jednak gdy $k_d \Gamma_{\max} / \delta_s \gg k_a C_L$ /co odpowiada obszarowi liniowej zależności $\Gamma = \Gamma / C_L //$, stopień zbliżenia do równowagi nie zależy od stężenia.

Gdy stężenie w roztworze C_L jest stałe i niezależne od czasu na skutek mieszania lub konwekcji, a warstwę adsorpcyjną oddziela od roztworu laminarna warstwa graniczna o grubości $\delta_L \gg \delta_s$, wówczas szybkość adsorpcji netto podaje zależność [54]:

$$\frac{d\Gamma(\tau)}{d\tau} = C'_{2.43} \left(1 - \frac{\Gamma(\tau)}{\Gamma_{\max}}\right) C_L - \Gamma(\tau) C''_{2.43} \exp\left(-\frac{W_d}{RT}\right) \quad 2.43$$

w której pierwszy człon określa szybkość adsorpcji, a drugi - desorpcji. Stałe $C_{2.43}$ zależą od warunków hydrodynamicznych i rodzaju adsorbowanej substancji, W_d jest energią desorpcji łańcucha wodorowęglowego. Współczynnik

$$r_r = \frac{\Gamma(\tau)}{\Gamma_{\max}} \quad 2.44$$

równy ułamkowi powierzchni międzyfazowej zajętej przez zaadsorbowane cząsteczki uwzględnia prawdopodobieństwo odbicia dyfundującej cząsteczki bez zaadsorbowania. Równanie /2.43/ jest ważne dla $r_r < 0,3$.

Hansen [137] badał dynamiczne napięcie powierzchniowe wodnych roztworów różnych kwasów organicznych metodą oscylującego strumienia i skorelował wyniki swoich badań równaniem empirycznym:

$$\left(\frac{\pi_{st}}{\pi(\tau)} - 1\right) C'_{2.45} \pi_{st}^2 = \exp\left(-C''_{2.45} \frac{\pi(\tau)}{\pi_{st}}\right) \quad 2.45$$

w którym stałe $C_{2.45}$ zależą od długości łańcucha wodorowęglowego. Równanie /2.45/ jest spełnione również dla wodnych roztworów alkoholi.

Warto podkreślić, że niezależnie od przyjętego modelu, przytoczone wyżej zależności są jakościowo zgodne ze sobą. Oznaczając przez e_r stopień zbliżenia się do równowagi adsorpcyjnej

$$e_r = \frac{\Gamma}{\Gamma^*} \quad 2.46$$

można obliczyć z równań /2.39/ i /2.42/ czas potrzebny do osiągnięcia danego ułamka równowagowego stężenia powierzchniowego:

$$\tau_r = \frac{4}{D_L} e_r^2 \left(\frac{\Gamma^*}{C_L} \right)^2 \quad 2.47$$

$$\tau_r = - \frac{\ln(1 - e_r)}{k_a C_L + k_d \frac{\Gamma_{\max}}{\delta_s}} \quad 2.48$$

Czas ustalania się równowagi jest dłuższy dla związków powierzchniowo-czynnych o dużej aktywności powierzchniowej $\tau_r \sim \Gamma / C_L / 2$, a dla danego związku czas ten wydłuża się wraz ze zmniejszaniem się jego stężenia w roztworze $\tau_r \sim (1 / (C_{2.48}' + C_{2.48}''))$. Stwierdzono dobrą zgodność modelu Warda i Fordai z wynikami eksperymentalnymi otrzymanymi dla homogenicznych n-dodekanoli + 7 - 9 EO [267].

2.6. Piany

Piana jest dwufazowym układem, w którym fazą ciągłą jest ciecz, a rozproszoną - gaz. Całkowita energia wewnętrzna układu dwufazowego równa jest sumie energii związanych z objętością faz i powierzchnią międzyfazową [73,200,207]:

$$U = u_v V + u_s A \quad 2.49$$

skąd po podzieleniu przez V otrzymujemy:

$$u = u_V + u_S a_V \quad 2.50$$

gdzie a_V jest wielkością powierzchni międzyfazowej przypadającą na jednostkę objętości układu /tzw. powierzchnia właściwa/. Energia wewnętrzna układu dwufazowego jest więc tym większa, im większy jest stopień rozproszenia jednej fazy w drugiej $/a_V/$, więc piana jest układem termodynamicznie niestabilnym. Pęcherze piany utworzonej z czystej cieczy rozpadają się natychmiast, natomiast piany powstałe z wodnych roztworów środków powierzchniowo-czynnych wykazują "czas życia" od kilku sekund do kilku dni [4, 12, 190, 251, 281]. Trwałość piany związana jest ściśle z jej strukturą i rodzajem środka powierzchniowo-czynnego.

Dowolny układ pianowy /ciecz pianotwórczą i powstałą z niej pianę/ charakteryzują następujące własności:

- 1/ Zdolność pianotwórcza roztworu.
- 2/ Zawartość cieczy w pianie
- 3/ Trwałość piany
- 4/ Stopień rozproszenia gazu

Biorąc pod uwagę zawartość cieczy w pianie

$$\varphi_L = \frac{V_L}{V_f} = 1 - \varphi_G \quad 2.51$$

oraz wynikający stąd kształt pęcherzy, rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje pian [4, 12, 54, 168, 222, 281]:

1° - piany kuliste zawierające stosunkowo dużo cieczy

$\varphi_G = 0,65 - 0,8/$, w których pęcherze mają kształt zbliżony do kuli i wykazują ruchliwość względem siebie,

2° - piany komórkowe zawierające bardzo mało cieczy $\varphi_G > 0,9$, w których pęcherze mają kształt wielościanów oddzielonych od siebie cienkimi warstewkami cieczy.

W miarę upływu czasu piana kulista przechodzi w pianę komórkową na skutek grawitacyjnego odpływu cieczy i hydrostatycznego wyporu pęcherzy. Proces odpływu cieczy z piany komórkowej odbywa się nadal, jednak mechanizm zjawiska jest w tym przypadku inny i odbywa się to znacznie wolniej niż w pianach kulistych. Wychodząc z warunku minimalizacji powierzchni pęcherzy wielościenne, Plateau sformułował dwa prawa określające strukturę pian komórkowych [4, 173, 222, 281]:

- 1/ Tylko trzy ściany pęcherzy piany komórkowej mogą tworzyć wspólną krawędź, a kąty nachylenia tych ścian względem siebie wynoszą 120° .
- 2/ Tylko cztery krawędzie mogą przeciąć się w jednym punkcie, a kąty między tymi krawędziami wynoszą $109^\circ 28' 16''$.

Warunki te spełniają z dobrym przybliżeniem dwunastościany pięcioboczne, zapewniając równocześnie maksymalne wypełnienie przestrzeni. Eksperymentalnie stwierdzono największą częstość występowania pęcherzy o ścianach pięciobocznych [118, 123, 168, 173, 222, 243].

Różnicę ciśnień panujących po obu stronach zakrzywionej powierzchni międzyfazowej określa równanie Younga - Laplacea:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad 2.52$$

gdzie r_1 i r_2 oznaczają promienie południkowe i równoleżnikowe krzywizny powierzchni. Z równania /2.52/ wynikają dwa ważne wnioski:

- 1/ Gdy dwa pęcherze o promieniach r_1 i r_2 / $r_1 < r_2$ / zetkną się ze sobą, to rozdziela ją ścianka uzyska promień krzywizny

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad 2.53$$

i będzie skierowana wypukłością w stronę pęcherza większego. Ciśnienie w mniejszym pęcherzu będzie większe niż w większym / $p_1 > p_2$ /, a różnica tych ciśnień wyniesie:

$$\Delta p_{1,2} = 2\sigma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad 2.54$$

Różnica ciśnień Δp_{12} powoduje dyfuzję gazu z pęcherza mniejszego do większego przez rozdziela ją film ciekły, co jest przyczyną zmiany rozkładu wielkości pęcherzy piany w czasie jej życia [42,168,173,281].

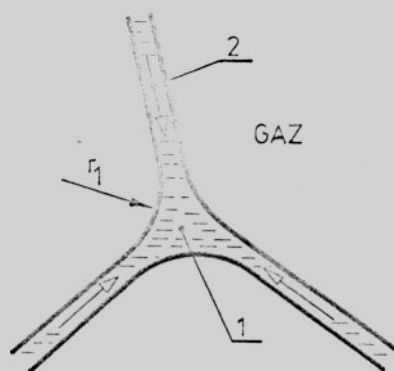
- 2/ Ciśnienie w krawędzi Plateau jest niższe, niż w filmie ciekłym /rys. 2.14/

$$p_2 - p_1 = \frac{\sigma}{r_1} \quad 2.55$$

i na skutek tego ciecz jest wysysana ze ścianek pęcherzy do krawędzi Plateau, skąd odpływa grawitacyjnie. W granicznym przypadku ścianki pęcherzy stanowią dwa filmy adsorpcyjne rozdzielone warstwą roztworu o grubości $10^{-5} - 10^{-6}$ cm, a w krawędziach Plateau znajduje się ok. 90 % całej ilości cieczy zawartej w pianie.

Szybkość wyciekania roztworu z pian kulistych daje się opisać półempirycznym równaniem wykładniczym [42,54]

$$\frac{V_L(\tau)}{V_{Lo}} = 1 - \exp(-C_{2.56}) \quad 2.56$$



Rys. 2.14. Przekrój przez krawędź Plateau.

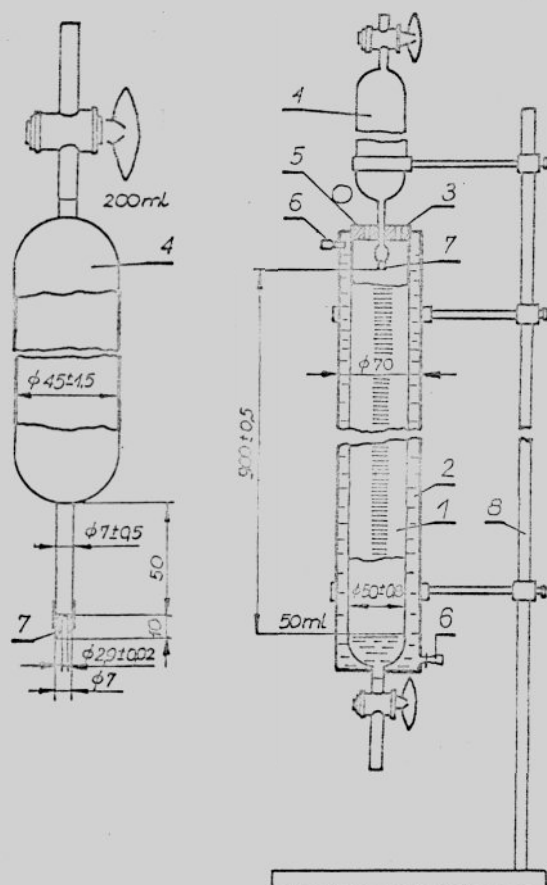
gdzie V_L/τ / oznacza ilość cieczy zawartą w pianie w chwili τ ,
gdy początkowa zawartość cieczy wynosiła V_{Lo} .

Ociekanie pian komórkowych również było przedmiotem wielu
prac teoretycznych i eksperymentalnych [8 , 118 , 123 , 144 , 170 , 171 ,
173 , 244] .

Zdolność pianotwórczą roztworu definiuje się przeważnie
jako ilość piany powstałej z danej ilości roztworu w określo-
nych warunkach, natomiast trwałość piany można określić przez
czas życia piany, czas połowicznego zaniku piany lub ilość
piany, która pozostanie z jej ilości początkowej po upływie
pewnego czasu. Dotąd nie udało się ustalić bezwzględnych kry-
teriów oceny zdolności pianotwórczej i trwałości piany, stosu-
je się więc szereg metod porównawczych, które różnią się spo-
sobem wytwarzania piany i przyjętym parametrem charakteryzują-
cym jej własności [54 , 154 , 209 , 287] .

Najpowszechniej stosowaną metodą oznaczania równocześnie
własności pianotwórczych oraz trwałości piany jest metoda
Rossa-Milesa, którą cechuje prosty sposób przeprowadzania pomia-
ru i duża powtarzalność wyników [54 , 267 , 287] . Zdolność piano-
twórczą badanego roztworu określa wysokość słupa piany powsta-

żej po wypływie 200 ml roztworu z wysokości 900 mm na zwierciadło 50 ml tego samego roztworu, mierzona po upływie 1 minuty od chwili wytworzenia piany. Wskaźnikiem trwałości piany jest iloraz wysokości słupa piany zmierzonej po 10 minutach i wysokości zmierzonej po 1 minucie [218].



Rys. 2.15. Przyrząd Rossa - Milesa

Według Daviesa [54] na trwałość pian otrzymanych z wodnych roztworów niejonowych środków powierzchniowo-czynnych mają wpływ następujące czynniki:

- 1° - Szybkość wyciekania roztworu z piany
- 2° - Dyfuzja gazu między pęcherzykami
- 3° - Lepkość powierzchniowa i elastyczność powierzchniowa

4° - Szybkość ustalania się napięcia powierzchniowego zdeformowanej powierzchni międzyfazowej /na drodze dyfuzji powierzchniowej i adsorpcji cząsteczek związku powierzchniowo-czynnego/

Ilościowe ujęcie wpływu tych czynników jest możliwe tylko w przypadku pojedynczego filmu lub pęcherzyka i nie wiadomo jeszcze, w jaki sposób wiąże się to z trwałością piany [54,251, 281]. Z tego względu badano obszernie wpływ innych, łatwo mierzalnych wielkości na własności pianotwórcze roztworów i trwałość piany. Z wyników tych badań, zebranych przez Tichomirowa wynika, że zależność zdolności pianotwórczej i trwałości piany od takich parametrów jak:

- struktura chemiczna cząsteczek związku powierzchniowo-czynnego /rodzaj i długość grupy hydrofobowej i hydrofilowej/,
- stężenie substancji powierzchniowo-czynnej w roztworze,
- temperatura roztworu,
- pH roztworu,
- napięcie powierzchniowe roztworu,
- obecność innych składników w roztworze

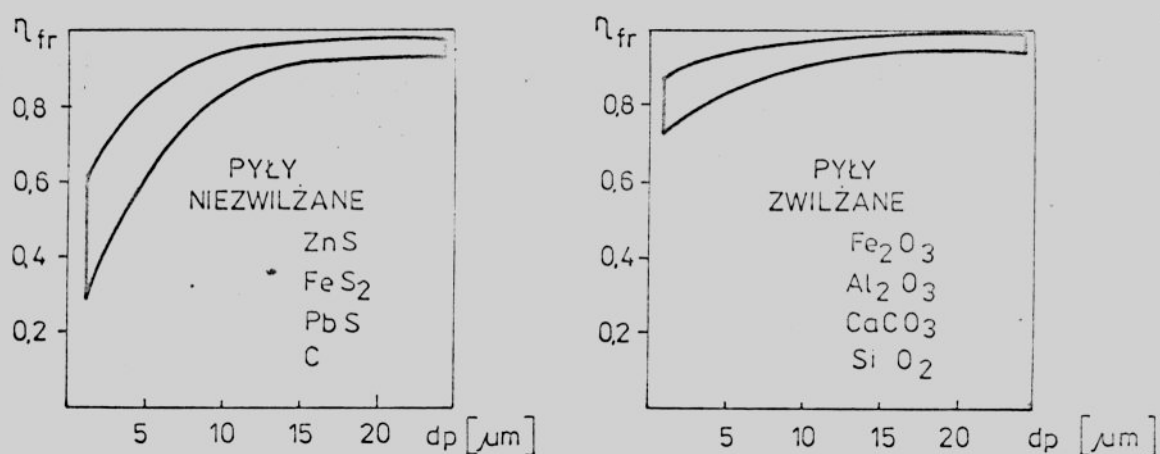
bardzo rzadko ma monotoniczny charakter i jest na tyle złożona, że praktycznie uniemożliwia określenie z góry własności danego roztworu lub utworzonej z niego piany. Obserwuje się niekiedy znaczne różnice między własnościami roztworów homogenicznych i heterogenicznych substancji powierzchniowo-czynnych, a także roztworów tych samych środków, lecz pochodzących z różnych partii w procesie ich wytwarzania.

Piany znajdują zastosowanie w wielu procesach, z których można wymienić oczyszczanie gazów [143,146,221,281], flotację [115,165,173,281], frakcjonowanie pianowe [8,117,123,170,173], i inne. W wielu przypadkach piana trwała stanowi

pewien produkt pośredni, w związku z czym notuje się rozwój badań nad jej niszczeniem, głównie metodami mechanicznymi [99, 123, 173, 224, 302].

3. WPŁYW ŚRODKÓW POWIERZCHNIOWO-CZYNNYCH NA ODPYLANIE GAZÓW

Oczyszczanie gazów z pyłu w mokrych urządzeniach odpylających jest na ogół bardzo skuteczne, zawodzi jednak w przypadku pyłów źle zwilżalnych /wodą/ o wielkości cząstek $d_p < 5 \mu m$ [6, 150, 217, 221]. Rys. 3.1 przedstawia w sposób poglądowy wyniki obszernych badań nad wpływem zwilżalności pyłu przez wodę na frakcyjną sprawność odpylania w jednopółkowej kolumnie pianowej [217].



Rys. 3.1. Sprawność frakcyjna odpylania jako funkcja wielkości cząstek i stopnia zwilżalności pyłu przez wodę

Zwilżalność pyłu ma więc decydujący wpływ na skuteczność odpylania najbardziej szkodliwych dla zdrowia człowieka drobnych cząstek. Ziarno pyłu zostanie tylko wtedy wytrącone z gazu, gdy po zderzeniu z elementem cieczy zostanie z nim związane. O tendencji cieczy do zwilżania ciała stałego decyduje praca adhezji i praca kohezji. Praca adhezji przedstawia pracę konieczną do oderwania cieczy od jednostki powierzchni ciała stałego, z równoczesnym utworzeniem dwóch nowych powierzchni o tej samej wielkości: powierzchni ciecz - gaz i ciało stałe - gaz. Praca adhezji określona jest prawem Dupree [4, 147, 309, 310] :

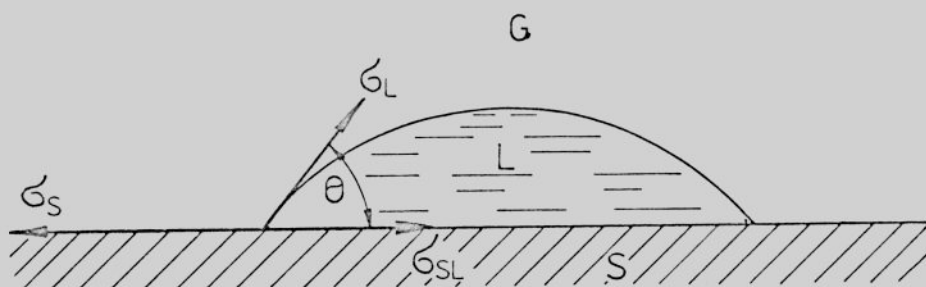
$$W_{adh} = \sigma_L + \sigma_s - \sigma_{SL} \quad 3.1$$

Podobnie definiuje się pracę kohezji, jako pracę rozzerwania słupa cieczy o powierzchni jednostkowej z utworzeniem dwóch powierzchni swobodnych:

$$W_{koh} = 2 \sigma_L \quad 3.2$$

W układzie trójfazowym gaz - ciecz - ciało stałe, stan równowagi energetycznej określony jest równaniem Younga /rys. 3.2/

$$\sigma_s = \sigma_{SL} + \sigma_L \cos \theta \quad 3.3$$



Rys. 3.2. Kropla cieczy na powierzchni ciała stałego

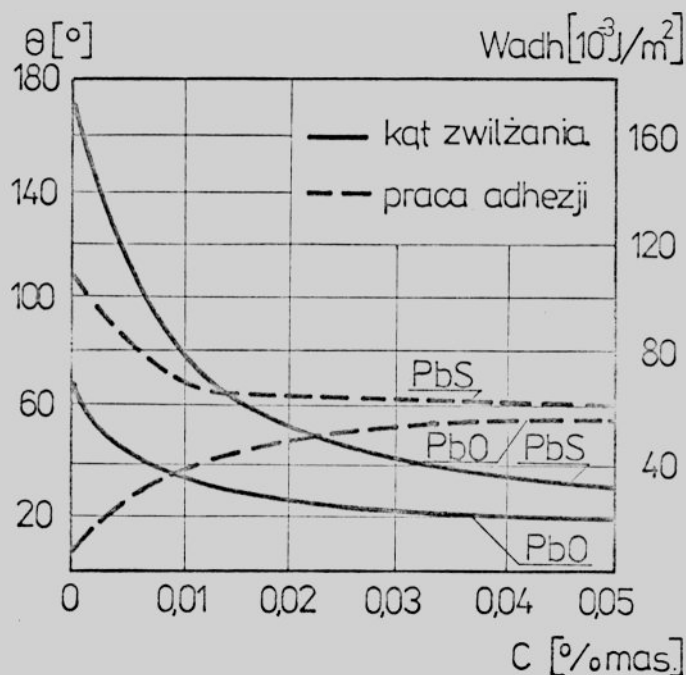
gdzie kąt θ nosi nazwę kąta zwilżania i stanowi miarę zwilżania ciała stałego przez ciecz. Uwzględniając /3.2/ i /3.3/ można przedstawić równanie /3.1/ w postaci:

$$W_{adh} = \sigma_L /1 + \cos \theta/ = 0,5 W_{koh} /1 + \cos \theta/ \quad 3.4$$

czyli wyrazić pracę adhezji za pomocą wielkości mierzalnych - napięcia powierzchniowego cieczy i kąta zwilżania. Andrzejewski [6] proponuje dokonanie podziału ciał stałych na dwie klasy w zależności od wartości kąta θ /mierzonego względem wody/:

- a/ ciała zwilżalne /hydrofilowe/, gdy $0 < \theta < 90^\circ$
- b/ ciała niezwilżalne /hydrofobowe/, gdy $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$

Zwilżalność ciał stałych można znacznie polepszyć, jeżeli zamiast wody zastosuje się wodne roztwory środków powierzchniowo-czynnych. Obserwuje się wówczas obniżenie napięcia powierzchniowego σ_L i zmniejszenie kąta zwilżania θ . W zależności od tych zmian praca adhezji może się zwiększyć lub zmniejszyć [4, 6, 162], zatem z punktu widzenia zjawisk statycznych w układzie gaz - ciecz - ciało stałe, istnieje pewne graniczne stężenie środka powierzchniowo-czynnego w roztworze, którego nie warto przekraczać, gdyż nie polepszy to skuteczności odpylania związanej ze zwilżalnością.



Rys. 3.3. Zależność kąta zwilżania i pracy adhezji pyłów PbS i PbO od stężenia alkiloarylosulfonianu sodu w wodzie [6].

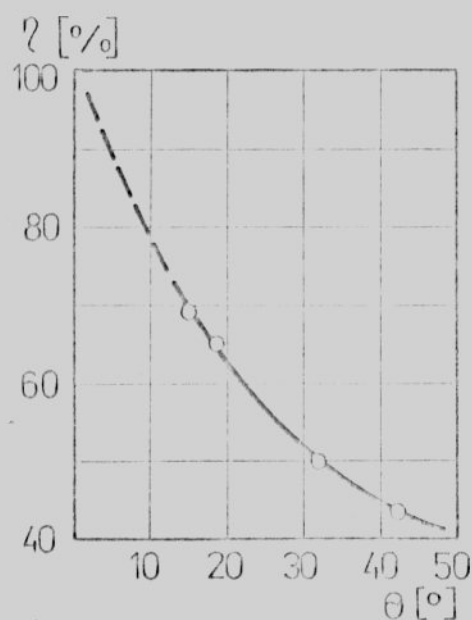
Ilościowe określenie wpływu środków powierzchniowo-czynnych na skuteczność oczyszczania gazów z pyłów hydrofobowych napotyka na duże trudności, spowodowane głównie tym, że:

- nie opracowano jeszcze metod wyznaczania kąta zwilżania dla pojedynczych ziaren pyłu [6, 162].

- nie można przewidzieć, jaką wartość napięcia powierzchniowego /dynamicznego/ ma powierzchnia cieczy w warunkach panujących w odpylaczu,
- zdolność pianotwórcza wodnych roztworów środków powierzchniowo-czynnych staje się przyczyną zmiany warunków hydrodynamicznych w odpylaczu /w porównaniu z czystą wodą/.

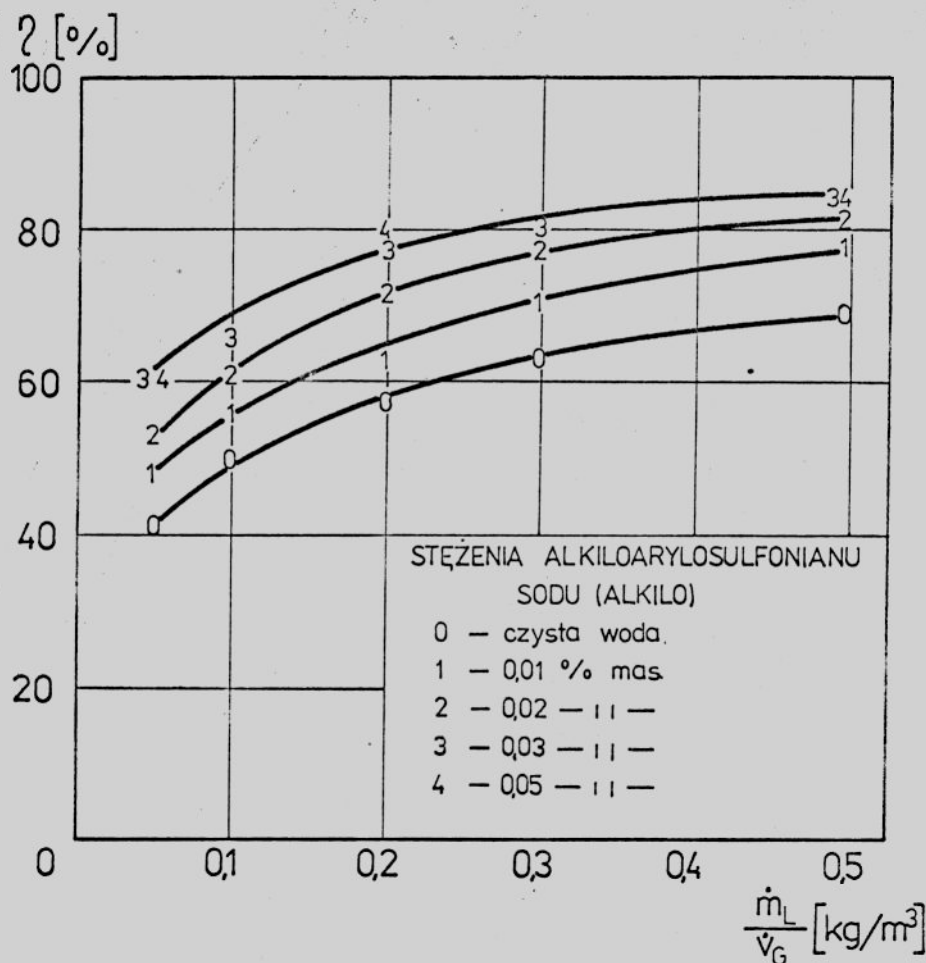
Dotychczasowe badania wpływu zwilżalności pyłów na skuteczność mokrego odpylania nie miały charakteru kompleksowego, lecz ich wyniki, niezależnie od siebie, wskazują jednoznacznie na zwiększenie sprawności odpylania przez użycie wodnych roztworów środków - powierzchniowo-czynnych zamiast wody [6].

Ciborowski i Iwiński [47] badali oddzielenie pyłu siarkowego w skruberze Venturiego zmieniając własności zwilżające wody przez dodawanie do niej różnych ilości mydła /0,2-1,2 kg/m³/. Uzyskano prawie dwukrotny wzrost sprawności odpylania /r/c. %/.



Rys. 3.4. Wpływ kąta zwilżania na całkowitą sprawność odpylania w skruberze Venturiego [47].

Badania prowadzone przez Gutowskiego[201] nad oddzielaniem pyłu siarki w skruberze natryskowym przy użyciu wodnych roztworów alkioloarylosulfonianu sodu wykazały, że dla uzyskania określonej sprawności, zużycie roztworu może być kilkakrotnie mniejsze od zużycia czystej wody /rys. 3.5/



Rys. 3.5. Zależność całkowitej sprawności odpylania pyłu siarki w skruberze natryskowym od zużycia cieczy i stężenia alkilo[201].

Pozin [217,221] stwierdził, że wpływ zwilżalności na skuteczność odpylania maleje ze wzrostem wielkości ziaren i prędkości gazu w kolumnie półkowej. Wyniki swoich badań uogólnił w postaci korelacji pozwalających określić frakcyjną sprawność odpylania na jednej półce w zależności od liczby Stokesa

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 w_G}{\rho_G v_G d_o} \quad 3.5$$

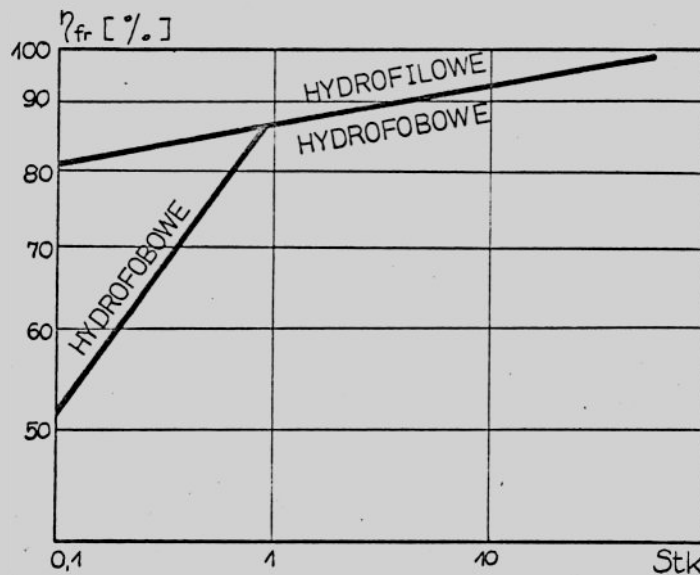
Dla pyłów zwilżalnych i niezwilżalnych /gdy $Stk > 1/$:

$$\eta_{fr} = 0,862 Stk^{0,037} \quad 3.6$$

dla pyłów niezwilżalnych /gdy $Stk < 1/$:

$$\eta_{fr} = 0,862 Stk^{0,235} \quad 3.7$$

Zależności te przedstawione są graficznie na rys. 3.5.

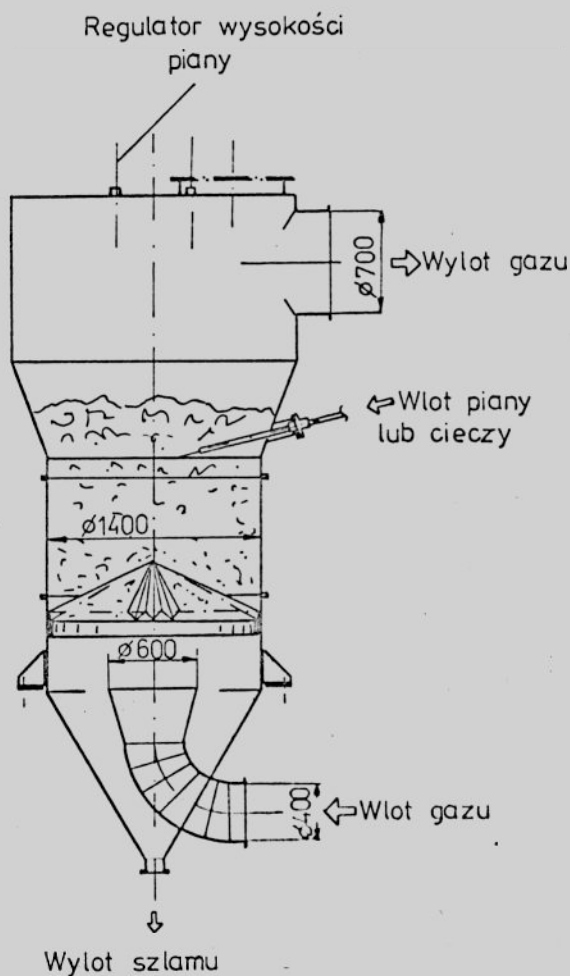


Rys. 3.6 Zależność skuteczności odpylania od wartości liczby Stokesa dla pyłów hydrofobowych i hydrofilowych [217].

Kaldor [167] zastosował kolumnę, w której zapyłone powietrze przepływając przez dystrybutor $/d_o = 0,33 \text{ mm}/$ zanurzony w wodnym roztworze związku powierzchniowo-czynnego $/0,3 \text{ kg } C_{20}H_{41}NH_3Br/m^3/$ wytwarzało pianę, która u szczytu kolumny kierowana była do destruktoru. Mimo, że taki sposób prowadzenia procesu nie może znaleźć zastosowania na skalę przemysłową ze względu na małą przepustowość $/w_G < 0,05 \text{ m/s}/$ i możliwość zatkania

otworów dystrybutora, to jednak warto odnotować wysokie sprawności odpylania: dla $d_p > 2 \mu\text{m}$ - $\eta_{fr} = 100 \%$, $d_p = 1 - 2 \mu\text{m}$ - $\eta_{fr} = 50 \%$, $d_p = 0,5 - 1 \mu\text{m}$ - $\eta_{fr} = 30 \%$.

W ostatnich latach szwedzka firma Alfa-Laval szeroki reklamuje urządzenia^{do} odpylania o nazwie Centrifoam [143, 242]. Odpylacz działa na zasadzie kolumny półkowej, z tą różnicą, że na półkę podawana jest nie ciecz, lecz piana wytworzona z wodnego roztworu bliżej nieokreślonego środka powierzchniowo-czynnego. Autorzy podają, że skrubler "Centrifoam" o przepustowości $\dot{V}_G = 10000 \text{ m}^3/\text{h}$ / $w_G = 1 - 1,5 \text{ m/s}$ przy wysokości złoża piany $H_f \approx 1 \text{ m}$ zapewnia całkowitą sprawność odpylania



Rys. 3.7. Skrubler "Centrifoam" firmy Alfa-Laval.

$\eta = 97 \% / \eta_{fr} = 100 \%$ dla $d_p > 8 \mu m$ / przy spadku ciśnienia gazu $\Delta p < 500 \text{ N/m}^2$ i zużyciu cieczy $\dot{m}_L / \dot{V}_G \approx 0,02 \text{ kg/m}^3$.

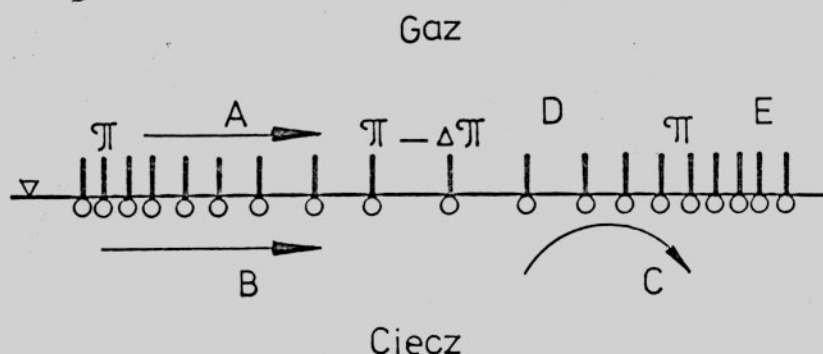
W Instytucie Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej prowadzone były badania eksperymentalne nad oczyszczaniem gazów w urządzeniach półkowych z kolumną poziomą i pionową z zastosowaniem wodnych roztworów niejonowych środków powierzchniowo-czynnych. Badania wykazały możliwość stosowania tych urządzeń do oczyszczania gazów przemysłowych [141, 142].

4. WPŁYW ŚRODKÓW POWIERZCHNIOWO-CZYNNYCH NA HYDRODYNAMIKĘ I WYMIANĘ MASY W UKŁADZIE GAZ - CIECZ /I CIECZ-CIECZ/

4.1. Znaczenie zjawisk powierzchniowych w procesach wymiany masy i przepływach dwufazowych.

Duże zainteresowanie wpływem substancji wykazujących pewną aktywność powierzchniową na hydrodynamikę i wymianę masy w układach wielofazowych wynika przede wszystkim z faktu, że w praktyce laboratoryjnej i przemysłowej prawie nigdy nie mamy do czynienia z idealnie czystymi cieczami. Śladowe ilości zanieczyszczeń powierzchniowo-aktywnych stają się przyczyną dużych rozbieżności między założonymi modelami a uzyskanymi wynikami lub między wynikami eksperymentów prowadzonych na takich samych układach przez różnych badaczy. Drugą przyczyną jest to, że w wielu procesach obecność środków powierzchniowo-czynnych staje się celowa lub nawet niezbędna. Po trzecie, z aktywnością powierzchniową składnika przenikającego z jednej fazy do drugiej wiąże się cała klasa zjawisk Marangoniego^[20,22,78,70]

Wpływ adsorpcyjnej warstwy substancji powierzchniowo-czynnej na hydrodynamikę można przeanalizować na najprostszym przykładzie swobodnej powierzchni międzyfazowej gaz - ciecz /rys. 4.1/ [54, 55, 58, 59].



Rys. 4.1. Wpływ warstwy adsorpcyjnej na hydrodynamikę w pobliżu swobodnej powierzchni cieczy.

Na skutek nierównomiernego stężenia powierzchniowego monowarstwa przesuwa się w kierunku A, a ruch ten wywołuje przepływ cieczy w kierunku B /na głębokości rzędu 10^{-3} cm/. Zjawisko odwrotne przedstawia prawa strona rysunku 4.1. Jeżeli ciecz przepływa w kierunku C /na skutek mieszania w głębi fazy ciekłej/, to następuje częściowe oczyszczenie powierzchni z zaadsorbowanych cząsteczek /D/ i skoncentrowanie się ich w obszarze E. W ten sposób powstaje gradient ciśnienia powierzchniowego przeciwstawiający się ruchowi cieczy. Opór stawiany przez monowarstwę sprężaniu jej określa wprowadzony przez Daviesa moduł sprężystości powierzchniowej

$$M_s = - A_1 \left(\frac{\partial \pi}{\partial A_1} \right)_{T,p} \quad 4.1$$

który z definicji jest równy zeru dla czystej powierzchni,

π - dla filmów doskonałych /równanie 2.32/, a dla filmów bardziej skondensowanych osiąga wartości kilkuset mN/m [54].

W ogólnym przypadku, gdy gaz i ciecz poruszają się względem siebie, nadmiar powierzchniowy substancji adsorbującej się /rozumiany jako stężenie powierzchniowe, wg /2.15// nie będzie rozłożony równomiernie na powierzchni międzyfazowej, lecz:

$$\Gamma = \Gamma(x, y, z) \quad 4.2$$

gdzie x, y, z związane są ze sobą równaniem powierzchni.

Napięcie powierzchniowe, które zależy wprost od stężenia powierzchniowego również przyjmie różne wartości, co zmienia warunki graniczne [91, 92, 174]. Dodatkową składową naprężeń normalnych /ciśnienie kapilarne/ określić można zgodnie z równaniem Younga - Laplacea /2.52/:

$$p_n = \frac{2\sigma(\Gamma)}{r} \quad 4.3$$

a dodatkowa składowa naprężeń stycznych zależy od stopnia nierównomierności rozkładu stężenia powierzchniowego:

$$p_t = \text{grad} \sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial \Gamma} \text{grad} \Gamma \quad 4.4$$

Na skutek istnienia pewnego rozkładu prędkości w cieczy, na powierzchni międzyfazowej powstaje konwekcyjny strumień substancji powierzchniowo-czynnej:

$$j_{\text{konw}} = \Gamma v_t \quad 4.5$$

gdzie v_t jest styczną składową prędkości na powierzchni międzyfazowej. Nierównomierny rozkład stężenia powierzchniowego wywołuje dyfuzyjny strumień zaadsorbowanych cząsteczek:

$$j_{\text{dyf}} = -D_s \text{grad} \Gamma \quad 4.6$$

gdzie D_s jest współczynnikiem dyfuzji powierzchniowej. W przypadku rozpuszczalnego związku powierzchniowo-czynnego należy dodatkowo uwzględnić jego strumień z głębi fazy ciekłej do powierzchni międzyfazowej lub w kierunku przeciwnym /rys. 2.12/. Wielkość tego strumienia $|j_{sL}|$ określona jest szybkością wolniejszego spośród dwóch etapów:

- dyfuzji z głębi fazy ciekłej do warstwy podpowierzchniowej,
- adsorpcji z warstwy podpowierzchniowej na powierzchnię międzyfazową.

Można więc napisać ogólny bilans /równanie ciągłości/ substancji powierzchniowo-czynnej [174]:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \tau} + \text{div} [j_{\text{konw}} + j_{\text{dyf}}] + j_{sL} = 0 \quad 4.7a$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \tau} + \text{div} (\Gamma v_t - D_s \text{grad} \Gamma) + j_{sL} = 0 \quad 4.7b$$

Rozkład stężenia powierzchniowego substancji adsorbującej się można wyznaczyć, gdy znany jest rozkład prędkości w fazie ciekłej. Rozkład prędkości można określić w oparciu o warunki graniczne, które z kolei zależą od rozkładu $\Gamma /X,y,z/$. W niektórych szczególnych przypadkach zagadnienie to zostało rozwiązane [54, 91 , 92 , 93 , 101, 128 , 174].

Rozważając proces przenikania składnika A z jednej fazy do drugiej /np. proces absorpcji lub desorpcji/ opisany równaniem ogólnym

$$\dot{M}_A = k_{oG} \cdot A \cdot \overline{\Delta C}_A \quad 4.8$$

można uznać, że wpływ substancji powierzchniowo-czynnej na szybkość wymiany masy $\dot{M}_A$ sprowadza się do zmiany współczynnika przenikania k_{oG} /lub $k_{oL}/$, wielkości powierzchni międzyfazowej A lub średniego modułu napędowego procesu $\overline{\Delta C}_A$.

Zmiana modułu napędowego może nastąpić z dwóch przyczyn:

- 1^o - zmiana stanu równowagi /rozpuszczalność gazu w cieczy/,
- 2^o - zmiana rodzaju przepływu dwufazowego gaz - ciecz /rozkład stężeń w wymienniku/.

Wykazano [75], że w zakresie stężeń $C < CMC \ll 1 \%$ mas. niejonowe środki powierzchniowo-czynne nie zmieniają w sposób mierzalny równowagi w układach gaz - ciecz i ciecz - ciecz. O zmianie rodzaju przepływu można mówić wówczas, gdy w wymienniku jedna faza jest dyspergowana w drugiej. Nie znaleziono żadnych danych literaturowych dotyczących wpływu środków powierzchniowo-czynnych na przemieszanie. Jedynie Elenkow [81,82] zaobserwował, że obecność środków powierzchniowo-czynnych w wodzie powoduje przesunięcie punktu inwersji faz w kolumnie

z wypełnieniem w kierunku mniejszych prędkości gazu /Anwersja faz łączy się również ze zmianą wielkości powierzchni międzyfazowej/.

Środki powierzchniowo-czynne sprzyjają rozwinięciu dużej powierzchni międzyfazowej, gdy gaz rozpraszany jest w cieczy w postaci pęcherzy. Podczas przepływu gazu przez pojedynczy otwór o średnicy d_o średnica powstających pęcherzy d_b zależy od napięcia powierzchniowego cieczy tylko w warunkach przepływu swobodnego [139, 155]:

$$d_b = \left(\frac{6 d_o \sigma}{g(\rho_L - \rho_G)} \right)^{1/3} \quad 4.9$$

Oczywiście w tym przypadku $\sigma = \sigma_d / \tau$, więc wielkość pęcherzy zależy od stopnia ustalenia się równowagi adsorpcyjnej w czasie ich tworzenia się. W zakresie przepływu łańcuchowego przez pojedynczy otwór, średnica pęcherza zależy od szybkości jego wznoszenia się w cieczy i od natężenia przepływu gazu [139, 155, 239].

W tym przypadku /jak również podczas przepływu gazu przez wiele otworów/ pęcherze oddziałują wzajemnie na siebie, następuje ich koalescencja i ponowne rozbijanie dużych pęcherzy na mniejsze. Obecność substancji powierzchniowo-czynnych hamuje ten proces bardzo silnie, w wyniku czego otrzymuje się większą liczbę mniejszych pęcherzy [54, 55]. Przy stałym stopniu zatrzymania gazu w cieczy - φ_G , wielkość powierzchni międzyfazowej odniesiona do jednostki objętości dyspersji

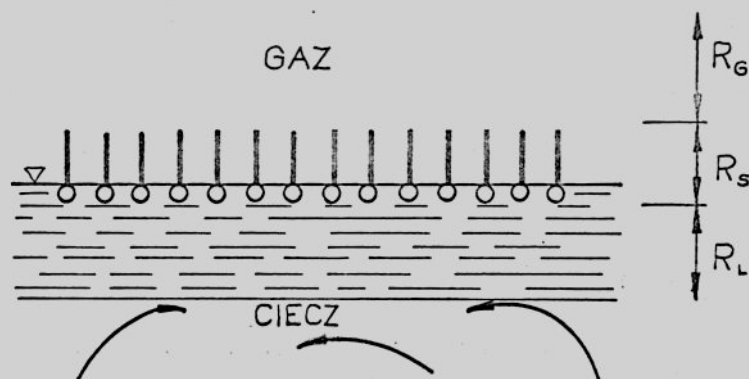
$$a_v = \frac{6 \varphi_G}{d_b} \quad 4.10$$

wzrasta, lecz nie świadczy to jednoznacznie o zwiększeniu się szybkości wymiany masy w rozpatrywanym układzie gaz - ciecz.

Nie występuje tu efekt zwiększenia się szybkości wymiany masy przez nowo utworzoną podczas koalescencji i redyspergowania powierzchnię międzyfazową, a ponadto współczynniki wnikania masy od małych pęcherzy są mniejsze niż od pęcherzy dużych [41, 52, 54].

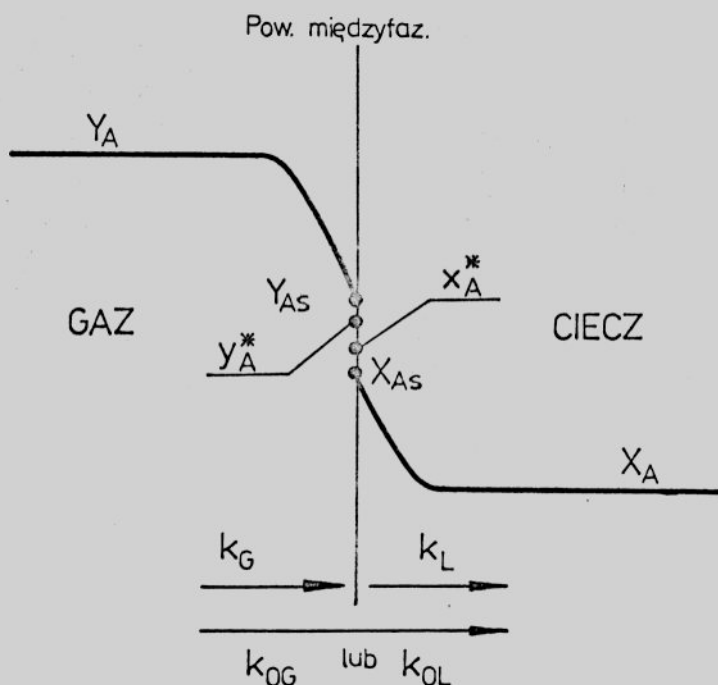
Całkowity opór przenikania cząsteczek substancji A z fazy gazowej do ciekłej /lub w kierunku przeciwnym/ stanowią opory wnikania w obu fazach, R_G i R_L oraz opór przenikania przez powierzchnię międzyfazową R_S [3, 52, 54, 55, 139, 239]:

$$R = R_G + R_S + R_L \quad 4.11$$



Rys. 4.2. Addytywność oporów występujących podczas przenikania masy

Przy obliczaniu wymienników masy z reguły przyjmuje się brak oporu R_S , co jest równoznaczne z założeniem, że stężenia w obu fazach na powierzchni międzyfazowej związane są ze sobą stałą równowagi. W rzeczywistości równowaga na powierzchni międzyfazowej nie jest osiągnięta, zatem stężeniu y_{AS} w gazie na powierzchni odpowiada równowagowe stężenie w cieczy x_A^* , a stężeniu x_{AS} w cieczy - równowagowe stężenie w gazie y_A^* /rys. 4.3/. Różnica stężeń $/y_{AS} - y_A^*/$ lub $/x_A^* - x_{AS}/$ jest siłą napędową przenikania masy przez powierzchnię międzyfazową:



Rys. 4.3. Przenikanie masy z uwzględnieniem oporu międzyfazowego

$$\dot{M}_A = k_{sy} A (y_{AS} - y_A^*) = k_{sx} A (x_A^* - x_{AS}) \quad 4.12$$

więc równanie /4.11/ można zapisać z uwzględnieniem zdefiniowanego powyżej współczynnika przenikania masy przez powierzchnię międzyfazową w dwóch równoważnych postaciach [3,84,104,106,235,239] :

$$\frac{1}{k_{OG}} = \frac{1}{k_G} + \frac{n}{k_{SL}} + \frac{n}{k_L} \quad 4.13a$$

$$\frac{1}{k_{OL}} = \frac{1}{k_G} + \frac{1}{k_{SG}} + \frac{n}{k_L} \quad 4.13b$$

W układzie spełniającym prawo Henry'ego wartość współczynnika k_s można oszacować na podstawie równania otrzymanego z kinetyczno-molekularnej teorii gazu:

$$k_{SL} = \alpha K_{pc} \left(2\pi RT M_G \right)^{-1/2} \quad 4.14$$

gdzie α - współczynnik kondensacji, określający udział cząstek przechodzących do fazy ciekłej w całkowitej liczbie cząstek zderzających się z powierzchnią międzyfazową $\alpha < 1$. W układzie, w którym wyeliminuje się opory wnikania w fazie gazowej i ciekłej, szybkość przenikania masy limitowana będzie współczynnikiem k_s .

Występowanie filmu adsorpcyjnego na powierzchni międzyfazowej stwarza dodatkowy opór dyfuzyjny cząsteczek przenikającym z jednej fazy do drugiej, a w przypadku filmów bardziej skondensowanych należy się liczyć z tym, że stanowią one będą dodatkową barierę energetyczną [16, 17, 18, 30, 124, 188, 211, 214].

Całkowity opór przenikania przez warstwę powierzchniową będzie więc sumą oporów: wynikającego ze skończonej szybkości przenikania cząsteczek przez powierzchnię międzyfazową $1/k_{s\alpha}$ i oporu dyfuzyjnego $1/k_{SD}$:

$$R_S = \frac{1}{k_S} = \frac{1}{k_{s\alpha}} + \frac{1}{k_{SD}} \quad 4.15$$

Na podstawie równania /4.13a/ można zdefiniować współczynnik wnikania masy w fazie ciekłej w obecności substancji powierzchniowo-czynnych:

$$\frac{1}{k_L^s} = \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_L} \quad 4.16$$

Ponieważ k_L zależy tylko od warunków hydrodynamicznych, które ulegają zmianie na skutek wzajemnego oddziaływania warstwy adsorpcyjnej i fazy ciekłej, więc współczynnik k_L^s ujmuje sumarycznie wpływ substancji powierzchniowo-czynnych na kinetykę wymiany masy [33, 85, 258]:

- a/ wpływ bezpośredni /stworzenie dodatkowego oporu dyfuzyjnego lub bariery energetycznej/.
- b/ wpływ pośredni /zmiana warunków hydrodynamicznych/.

Obniżenie szybkości wymiany masy może być interpretowane w oparciu o jeden z tych efektów tylko w szczególnych przypadkach. Nierozpuszczalne środki powierzchniowo-czynne tworząc skondensowane filmy powierzchniowe stanowią rzeczywistą barierę energetyczną dla cząsteczek przenikających z jednej fazy do drugiej. Przejście przez monowarstwę odbywa się wówczas, gdy cząsteczka ma energię kinetyczną na tyle dużą, aby utworzyć "otwór" w monowarstwie lub gdy trafi na "otwór" powstały w wyniku lokalnych fluktuacji gęstości filmu powierzchniowego [16, 17, 18, 30, 184]. W praktyce znalazło to zastosowanie m. in. w ograniczaniu szybkości parowania wody ze zbiorników /o ok. 50 %/ przez pokrycie jej powierzchni heksadekanolem [54, 55, 58, 184].

Najbardziej kontrowersyjny pozostaje wpływ rozpuszczalnych /adsorbujących się/ substancji powierzchniowo-czynnych na wymianę masy. Zahamowanie szybkości wymiany masy z powodzeniem tłumaczono istnieniem dodatkowego oporu dyfuzyjnego [14, 126, 202, 211, 247, 277, 285], efektem bariery energetycznej [104, 106, 214], jednak najczęściej przyjmuje się różne modele zmiany warunków hydrodynamicznych [54, 55, 57, 58, 59, 75, 85, 231, 258, i in.]. Branie pod uwagę tylko efektów bezpośrednich dopuszczalne jest wówczas, gdy istnieje pewność, że nie zmieniają się warunki hydrodynamiczne, lecz mimo wszystko budzi to zastrzeżenia z następujących względów:

- 1^o - Rozpuszczalne związki powierzchniowo-czynne tworzą filmy adsorpcyjne typu "gazowego", w których na skutek hydratacji części hydrofilowej powierzchnia przypadająca na jedną cząsteczkę A_{1min} jest kilkakrotnie większa od powierzchni przekroju cząsteczki [24, 267]. Jeżeli nawet przyjmiemy stosowalność prawa Ficka dla uwodnionej monowarstwy o grubości kilkudziesięciu Å, to trudno przewidzieć wartość współczynnika dyfuzji w tym obszarze.
- 2^o - Teoria bariery energetycznej przewiduje zmniejszanie się współczynnika k_s ze wzrostem wielkości przenikających cząsteczek, lecz z danych eksperymentalnych wynika brak jakiegokolwiek związku między tymi wielkościami [241].

Opór przenikania masy przez czystą powierzchnię międzyfazową jest pomijalny w porównaniu z oporami wnikania w obu fazach $/R_s = 0,002 - 2 \text{ s/cm/}$ [49, 52, 58, 235]. W przypadku obecności filmów adsorpcyjnych wartości R_s zmieniają się w granicach $0,01 - 10 \text{ s/cm}$ [38, 241, 235, 266].

Gdy w warunkach eksperymentalnych środki powierzchniowo-czynne zmieniają hydrodynamikę badanego układu, obserwuje się obniżenie wartości współczynnika k_L^s w porównaniu z k_L , co jest oczywiste, lub co nie jest do tej pory wytłumaczone - wartości k_L^s przewyższają k_L . Omówione to zostanie w dalszej części rozdziału.

4.2. Układy statyczne gaz - ciecz

W układach statycznych z płaską powierzchnią międzyfazową wyeliminowane są efekty hydrodynamiczne /pod warunkiem, że nie występują zjawiska Marangoniego/, więc przez porównanie wyników

nieustalonej absorpcji lub desorpcji otrzymanych na takich samych układach gaz - ciecz z udziałem i bez udziału substancji powierzchniowo-czynnych otrzymuje się informacje o ich wpływie na szybkość przenikania masy przez powierzchnię międzyfazową.

Harvey [432] badał szybkość absorpcji CO_2 w wodzie destylowanej i wodnych roztworach Lissapolu N /polioksyetylenowany alkilofenol [267] i Teepolu /mieszanina alkilowych siarczanów sodu [45] metodą refraktometryczną i stwierdził brak mierzalnego oporu powierzchniowego w przypadku czystej wody. W zakresie stężeń Lissapolu i Teepolu wynoszącym 0,08 - 1 % mas. współczynnik przenikania k_s praktycznie nie zmieniał się /0,025 - 0,035 cm/s/, co można wyjaśnić tym, że eksperymenty prowadzono w obszarze $C_B > \text{CMC}$ / $\Gamma = \Gamma_{\text{max}}$ /, a więc przy stałym stężeniu powierzchniowym.

Większość badań prowadzonych na układach statycznych dotyczyła nierozpuszczalnych związków powierzchniowo-czynnych [14, 15, 126, 247, 277], gdzie opór powierzchniowy jest stosunkowo duży i łatwiejszy do zmierzenia. Wyniki są zgodne jakościowo tylko w dwóch przypadkach: stwierdzono wzrost oporu R_s wraz ze wzrostem długości łańcucha wodorowęglowego i ciśnienia powierzchniowego, co jest intuicyjnie zrozumiałe. Wpływ rodzaju grupy hydrofilowej jest przedstawiany następująco: wg Blanka [14] opór powierzchniowy rośnie w kolejności $\text{NH}_2 > \text{OH} > \text{COOH}$, natomiast wg Burnetta [29] - $\text{OH} > \text{NH}_2 > \text{ONH}_2$. Wyznaczone wartości R_s zgadzają się z dokładnością do rzędu wielkości, np. dla układu $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{OH}$, $t = 20 \pm 2^\circ \text{C}$, $\pi \approx 40 \text{ mN/m}$ otrzymano:

- Blank [14] - $R_s = 220 - 392 \text{ s/cm}$

- Hawke [126] - $R_s = 770 \text{ s/cm}$

- Sada [247] - $R_s = 200 - 330 \text{ s/cm}$

Chen[44] uogólnił zależność współczynnika przenikania k_{SL} od promienia cząsteczki gazu r_A i pola powierzchni przypadającego na jedną cząsteczkę związku tworzącego monowarstwę A_1 korelacją empiryczną

$$k_{SL} = K_{pC} a r_A^b e^{cA_1} \quad 4.17$$

gdzie a , b , c są stałymi zależnymi od rodzaju związku powierzchniowo-czynnego /kwas lub alkohol/ i długości łańcucha wodorowęglowego.

Plevan[242] wykazał brak oporu powierzchniowego podczas absorpcji SO_2 w wodnych roztworach kilku związków powierzchniowo-czynnych, natomiast Burnett[29] stwierdził zwiększenie szybkości absorpcji NH_3 w roztworach alkoholi nasyconych o długości łańcucha $C_4 - C_{10}$ i aminy o łańcuchu C_6 , przy czym przyrost szybkości malał ze wzrostem długości łańcucha.

Autor tłumaczy to zjawiskiem Marangoniego związanym z desorpcją alkoholu z wody do amoniaku.

4.3. Laminarny strumień cieczy

Układy statyczne pozwalają mierzyć opory powierzchniowe przenikania masy nie mniejsze niż ok. 20 s/cm ; znacznie dokładniejsze wyniki można uzyskać stosując laminarny strumień cieczy o płaskim profilu prędkości przy krótkich czasach kontaktu τ_c . Jeżeli strugę cieczy umieści się w atmosferze czystego absorbowanego gazu $/R_G = 0/$, to w oparciu o teorię penetracji Higbiego można wyznaczyć współczynnik k_{SL} wykorzystując równanie /4.16/:

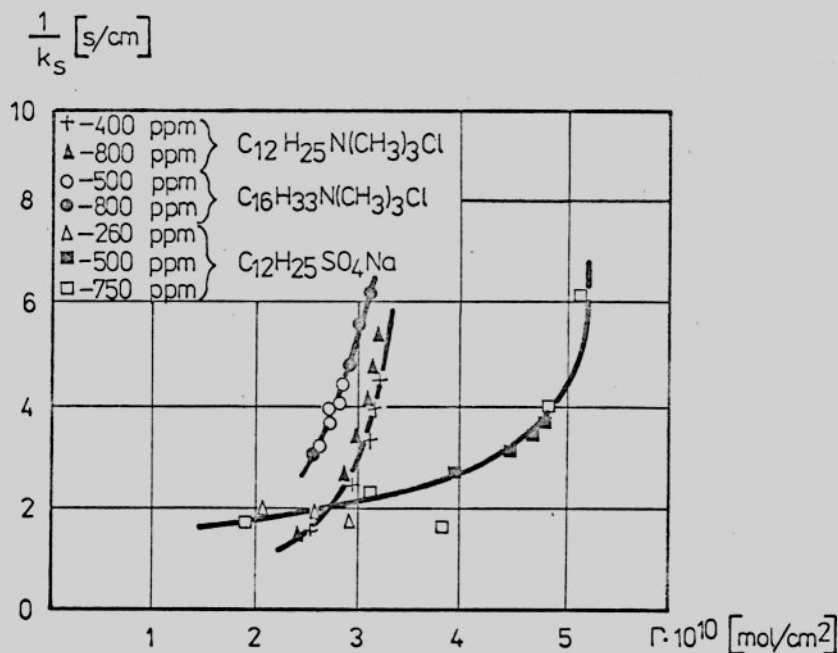
$$\frac{1}{k_L^s} = \frac{1}{k_{SL}} + \frac{1}{2 \left(D_{AL} / \pi \tau_c \right)^{1/2}} \quad 4.18$$

Wartość $1/k_{SL} = R_s$ znajduje się z wykresu w układzie współrzędnych $1/k_L^s - \tau_c^{1/2}$ przez ekstrapolację do osi rzędnych $\tau_c = 0$. W ten sposób znaleziono dla układów: $O_2 - H_2O$, $k_{SL} = 0,6$ cm/s [49], $CO_2 - H_2O$, $k_{SL} = 2,6 - 11,8$ cm/s [235]. Gdy czas kontaktu powierzchni cieczy z gazem przekracza 10^{-6} s, opór powierzchniowy można całkowicie zaniedbać [52,266].

Obecność rozpuszczalnych środków powierzchniowo-czynnych w laminarnej strudze wywołuje efekty bezpośrednie i pośrednie. Stężenie powierzchniowe zmienia się od zera przy dyszy wylotowej do wartości Γ_{max} przy odbieralniku, gdzie tworzy się nieruchoma warstwa adsorpcyjna /prędkość cieczy na powierzchni jest tam równa zero [48,235]. Średnia szybkość absorpcji CO_2 w wodnych roztworach Petrowetu /mieszanina siarczanów węglowodorów nasyconych [45]/ o stężeniach 0,1 - 0,5 % mas. nie różniła się od szybkości absorpcji w czystej wodzie dla czasów kontaktu $\tau_c < 0,002$ s, natomiast obniżyła się o ok. 10 % przy $\tau_c = 0,01$ s, praktycznie niezależnie od stężenia [235].

Badania Caskeya [38] nie potwierdziły obserwacji Cullena i Raimondiego, choć prowadzone były przy dłuższych czasach ekspozycji $\tau_c = 0,01 - 0,025$ s/. Autor wykazał, że dla danego związku powierzchniowo-czynnego chwilowa wartość oporu powierzchniowego w dowolnej odległości od dyszy nie zależy od stężenia w głębi roztworu, lecz od chwilowej wartości stężenia powierzchniowego określonego z równania Gibbsa przy znajomości dynamicznego napięcia powierzchniowego /rys. 4.4/. Opór powierzchniowy zwiększał się ze wzrostem liczby atomów węgla w łańcuchu hydrofobowym

i zmniejszaniem się masy cząsteczkowej grupy hydrofilowej.



Rys. 4.4. Zależność oporu powierzchniowego od stężenia powierzchniowego /absorpcja CO_2 / [38].

4.4. Grawitacyjny spływ cieczy po ścianie

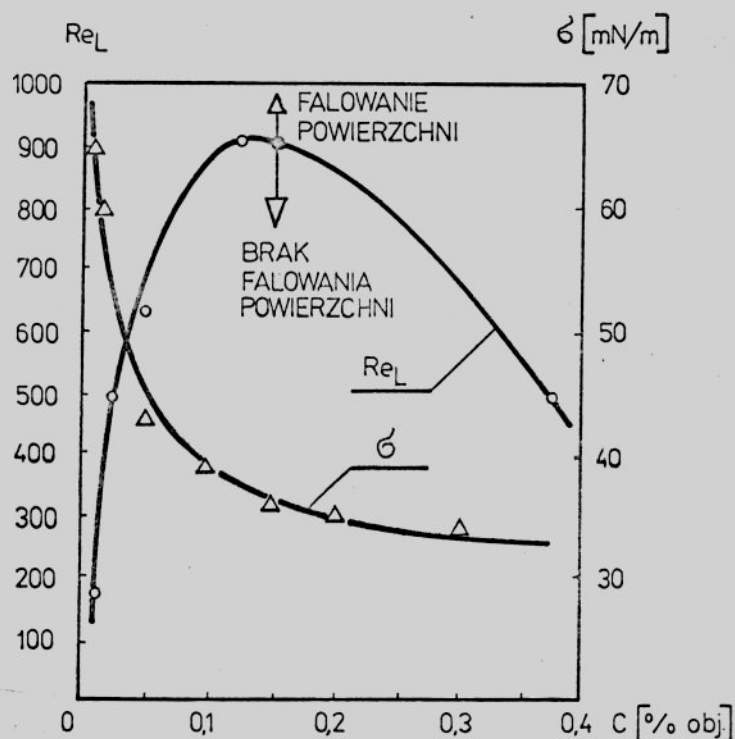
Teoretyczne rozważania nad wpływem substancji powierzchniowo-czynnych na hydrodynamikę grawitacyjnego spływu cienkiej warstwy cieczy po ścianie dotyczyły dwóch zagadnień:

- 1^o - zmiany rozkładu prędkości w cieczy i grubości filmu ciekłego w zakresie przepływu laminarnego [27, 35, 75, 85, 174],
- 2^o - tłumienia falowania powierzchniowego [174, 245, 282, 297],

Rozkład prędkości został określony dla stałego i zmiennego gradientu napięcia powierzchniowego na długości spływającego filmu w dwóch przypadkach: gdy proces tworzenia warstwy adsorpcyjnej limitowany jest szybkością adsorpcji i dyfuzji [27, 35, 85]. Wykorzystując znalezione rozkłady prędkości Bojadżijew [11, 36, 85] rozwiązał konwekcyjne równanie wnikania masy i wykazał, że za-

leżność szybkości wnikania w fazie ciekłej od stężenia substancji powierzchniowo-czynnej może przechodzić przez minimum, co znacznie wcześniej stwierdzono eksperymentalnie [45, 84, 86, 196].

Spływ cienkiego filmu czystej cieczy po gładkiej pionowej ścianie jest laminarny dla $Re_L \leq 7$, a przy wyższych wartościach liczby Reynoldsa pojawia się falowanie powierzchni [237, 282]. Dodanie rozpuszczalnych środków powierzchniowo-czynnych do cieczy może rozszerzyć zakres ruchu laminarnego nawet do $Re_L \leq 900$ /rys. 4.5/ [282]. Maksymalne tłumienie burzliwości zachodzi przy

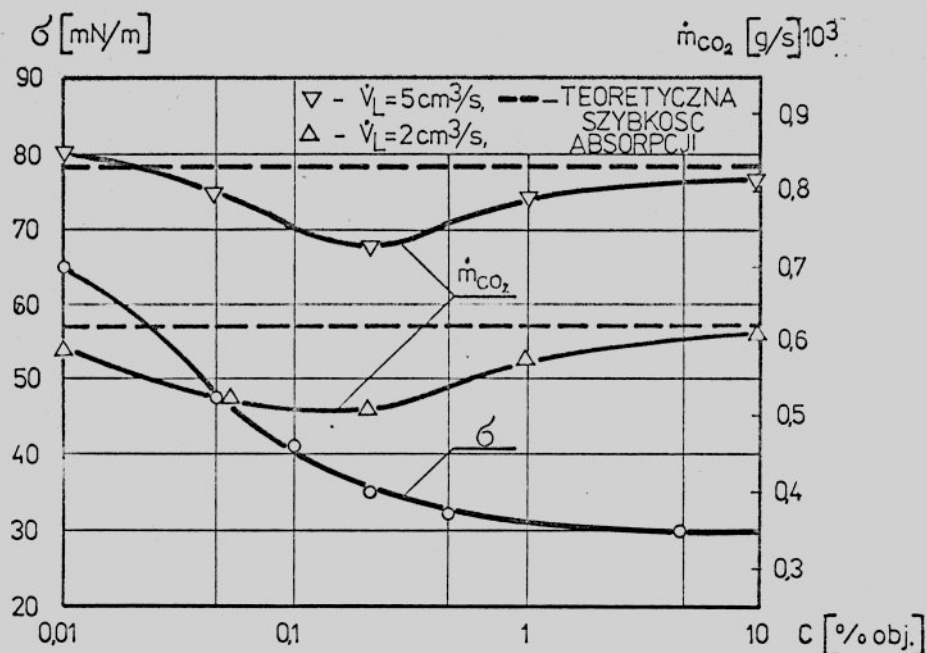


Rys. 4.5. Wpływ stężenia Teepolu L na hydrodynamikę grawitacyjnego spływu wody po ścianie pionowej [282].

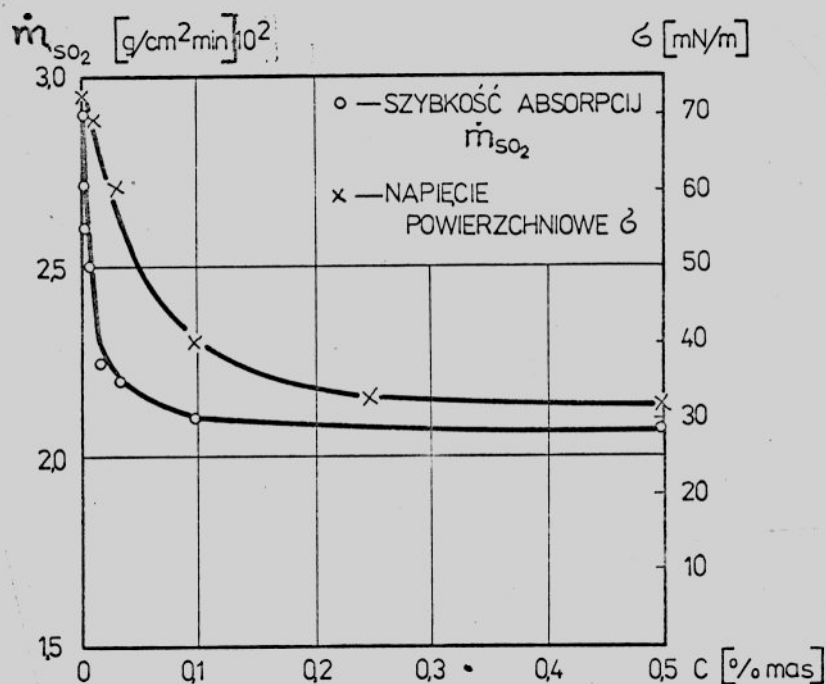
$C_B \cong CMC$ i w tym zakresie stężeń szybkość wnikania masy w fazie ciekłej osiąga swą najmniejszą wartość [45, 84, 196, 275, 276].

Dalsze zwiększanie stężenia może prowadzić do wzrostu szybkości wnikania masy /rys. 4.6/ [45], lub pozostać bez wpływu /rys. 4.7/ [275].

Wzrost szybkości wnikania masy po przekroczeniu CMC wyjaśnić można w oparciu o efekt hydrodynamiczny [85, 90, 237]. Przy stężeniach mniejszych od CMC $\Gamma < \Gamma_{\max}$ burzliwość powierzch-



Rys. 4.6. Wpływ stężenia Teepolu na szybkość absorpcji CO₂ wodą przy opływie kuli [45].



Rys. 4.7. Wpływ stężenia Sulfanolu na szybkość absorpcji SO₂ wodą przy grawitacyjnym spływie cieczy w rurze pionowej [275].

niowa tłumiona jest przez gradienty napięcia powierzchniowego /rys. 4.1/, co zmniejsza szybkość wnikania masy. Gdy stężenie powierzchniowe osiągnie wartość maksymalną $C_B \geq C_{MC}$, $\Gamma = \Gamma_{max}$, obszar powierzchniowy może częściowo odzyskać ruchliwość dzięki równomiernemu rozkładowi napięcia powierzchniowego.

Warto również odnotować, że w kilku przypadkach stwierdzono brak wpływu środków powierzchniowo-czynnych na szybkość wnikania masy [183] /układ $SO_2 - H_2O - Teepol$ /, [205] /układ $CO_2 - H_2O - Lubrol W$ /, [45] /układ $CO_2 - H_2O - siarczan sodowy dodecylu$ /.

4.5. Układy dynamiczne gaz - ciecz z płaską powierzchnią międzyfazową i mieszaniem w głębi fazy ciekłej

Zgodnie z teorią Lewicza [174] współczynnik wnikania masy od swobodnej czystej powierzchni międzyfazowej do burzliwej fazy ciekłej określony jest zależnością:

$$k_L = D_{AL}^{0,5} v_L^{1,5} \rho_L^{0,5} \sigma^{-0,5} \quad 4.19$$

gdzie v_L jest charakterystyczną szybkością wiru w cieczy, zależną od liczby Reynoldsa Re_L . Iloczyn $v_L^3 \rho_L \sigma^{-1}$ ma wymiar $[T^{-1}]$, jest więc odpowiednikiem szybkości odnawiania powierzchni S w modelu Danckwertsa:

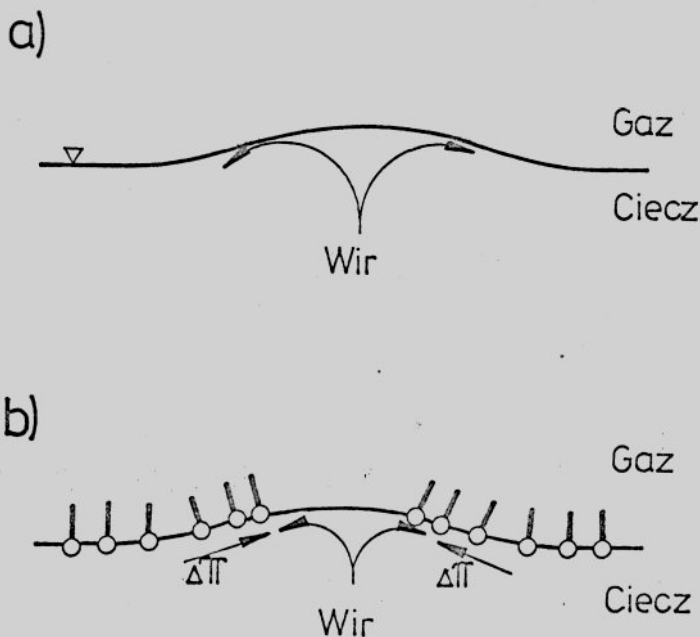
$$k_L = (D_{AL} S)^{0,5} \quad 4.20$$

Davies [54, 55, 58, 69] rozszerzył teorię Lewicza dla przypadku powierzchni międzyfazowej pokrytej filmem adsorpcyjnym i otrzymał równanie:

$$k_L^S = D_{AL}^{0,5} v_L^{1,5} \rho_L^{0,5} \left[\frac{\sigma(\sigma + C_{4.21}\pi)}{\sigma + 0,5 C_{4.21}\pi} \right]^{-0,5} \quad 4.21$$

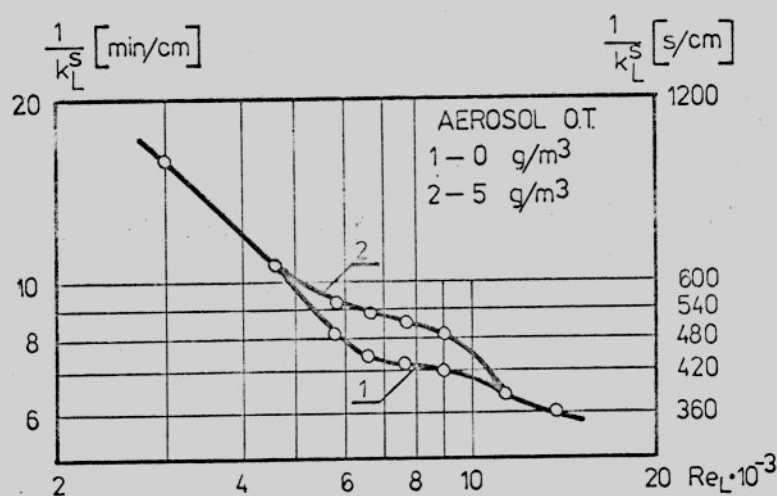
w którym wyrażenie w nawiasie można traktować jako zastępcze napięcie powierzchniowe. Gdy $\pi \rightarrow 0$ /czysta powierzchnia międzyfazowa/, równanie /4.21/ przechodzi w /4.19/, a gdy $C_{4.21}\pi > \sigma$, wówczas

$$k_L^s = C_{4.22} k_L \quad 4.22$$



Rys. 4.8. Tłumienie burzliwości cieczy przez film adsorpcyjny.

gdzie $C_{4.22} \approx 0,7$. Liczne dane eksperymentalne wskazują na istnienie minimum w zależności współczynnika $C_{4.22}$ od stopnia burzliwości fazy ciekłej [63, 64, 104, 186, 192, 250]. Aby nastąpiło skuteczne tłumienie turbulencji w pobliżu powierzchni międzyfazowej, ciśnienie powierzchniowe musi osiągnąć pewną krytyczną wartość π_{kr} /rzędu od ułamka do kilku mN/m/ [64, 69]. Jeżeli czas przebywania elementów cieczy na powierzchni jest krótszy od czasu potrzebnego do osiągnięcia stopnia adsorpcji odpowiadającego $\pi > \pi_{kr}$, to $k_L^s \rightarrow k_L$ /rys. 4.9/ [192]/.



Rys. 4.9. Zależność oporu wnikania masy /absorpcja O_2 / od intensywności mieszania cieczy [192] .

W zakresie słabego mieszania cieczy, gdy jej powierzchnia jest praktycznie w stagnacji, obecność rozpuszczalnych substancji powierzchniowo-czynnych również nie wpływa na wartość współczynnika wnikania masy. Maksymalne obniżenie szybkości wnikania masy zachodzi więc w pewnym przedziale wartości liczby Reynoldsa i może osiągać 80 % [26, 63, 285].

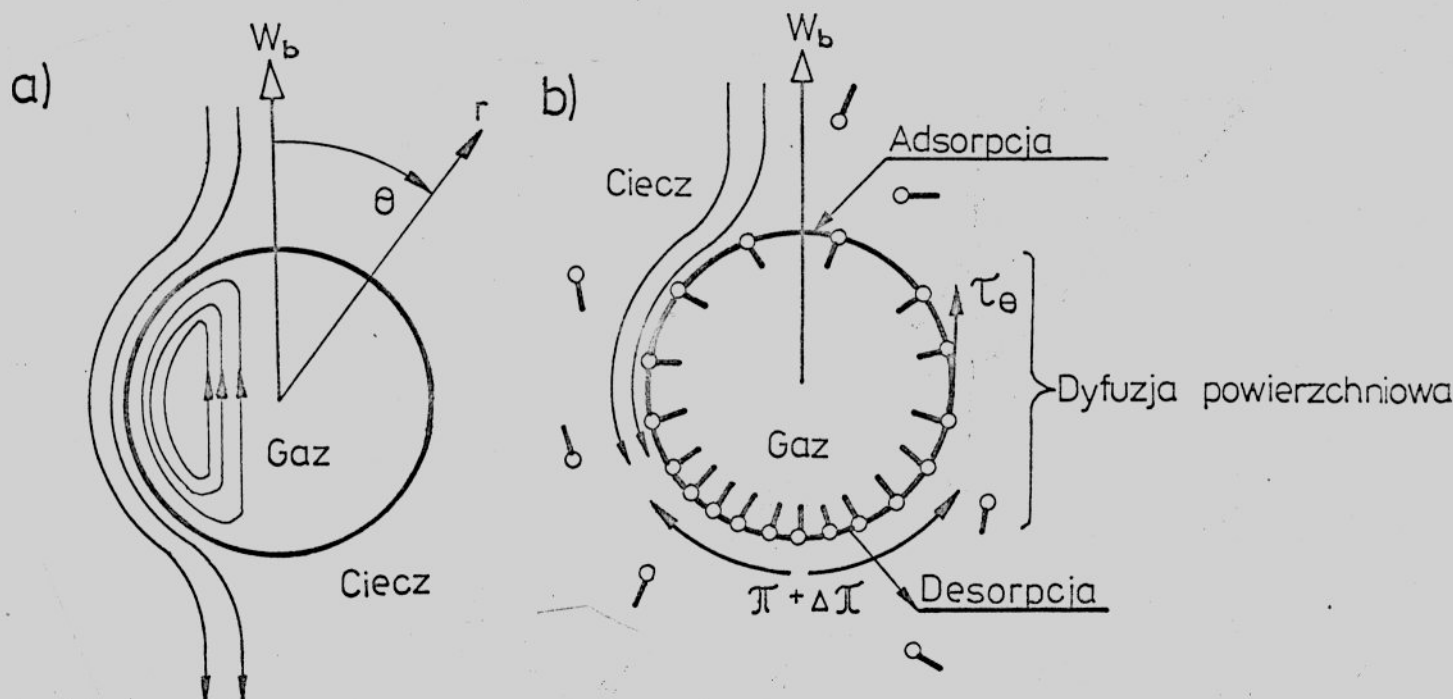
Kontrowersyjne pozostaje stosowanie teorii penetracji lub odnawiania powierzchni, co według Daviesa [53] i Goodridge'a [104, 106], nie ma fizycznego sensu. Wydaje się, że zastrzeżenie takie można mieć tylko dla przypadku skondensowanych filmów na powierzchni słabo mieszanej cieczy. Ostatnio Springer [250] wykazał, że obecność warstwy adsorpcyjnej nie zmienia postaci funkcji rozkładu Danckwertsa, a zmniejszenie się współczynnika wnikania masy spowodowane jest obniżeniem szybkości odnawiania powierzchni S i wielkości odnawianej powierzchni.

Nieliczne dane [85, 88] wskazują na zwiększenie się szybkości absorpcji w roztworze w porównaniu z czystą wodą w miarę

wzrostu burzliwości fazy ciekłej /układ $\text{SO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{Nekal BX}$, $k_L^S/k_L = 1 - 1,5/$, co jest zupełnie niezrozumiałe,

4.6. Pojedyncze pęcherze

Substancje powierzchniowo-czynne zmniejszają cyrkulację gazu we wnętrzu pęcherza i obniżają jego szybkość wznoszenia się w roztworze [65, 109, 111, 113, 129, 174, 263, 295]. W krańcowym przypadku cyrkulacja może zostać zahamowana zupełnie i pęcherz zachowuje się jak sztywna kula /prędkość cieczy na powierzchni

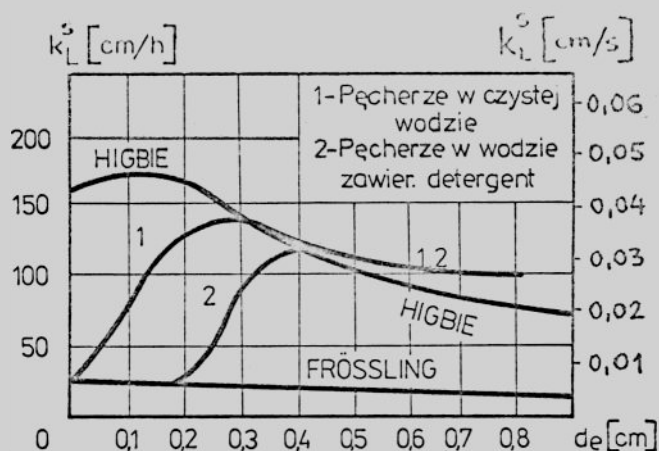


Rys. 4.10. Hamowanie cyrkulacji we wnętrzu pęcherza poruszającego się w wodnym roztworze substancji powierzchniowo-czynnej [54].

międyfazowej staje się równe zero/. Davies [54, 57, 58] wypro-
wadził zależność na stopień cyrkulacji w pęcherzu:

$$SC = \frac{1}{1 + 1,5 \frac{\mu_d}{\mu_c}} \left(1 - \frac{C_{4.23} M_s}{r_b^2 g \Delta \rho} \right) \quad 4.23$$

z której wynika, że najbardziej wrażliwe na zanieczyszczenia powierzchniowe są małe pęcherze /rys. 4.11 [127] /.



Rys. 4.11. Zależność współczynnika wnikania masy od wielkości pęcherza i czystości powierzchni międzyfazowej [127].

Lewicz [91 ,93 ,174] zakłada, że stężenie powierzchniowe jest funkcją ciągłą współrzędnej θ /rys. 4.10/ i przyjmuje wartości ekstremalne dla $\theta = 0$ i $\theta = \pi$. Alternatywny model, oparty na obserwacjach poczynionych w układach ciecz - ciecz, zaproponował Savic [268]. Według niego istnieje pewna krytyczna wartość kąta θ , powyżej której cała tylna część kropli pokryta jest równomiernie warstwą adsorpcyjną, podczas gdy część przednia powierzchni pozostaje czysta.

W oparciu o swój model rozkładu stężenia powierzchniowego Lewicz wprowadził współczynnik poprawkowy $\bar{\mu}$ do równania Hadamarda - Rybczyńskiego na końcową prędkość ruchu kulistego pęcherza /lub kropli/ w zakresie $Re < 1$

$$w_d = \frac{2(\rho_c - \rho_d)g r_d^2}{3 \mu_c} \cdot \frac{\mu_c + \mu_d + \bar{\mu}}{2 \mu_c + 3 \mu_d + 3 \bar{\mu}} \quad 4.24$$

którego wartość obliczyć można następująco:

1° - gdy szybkość tworzenia warstwy adsorpcyjnej limitowana jest procesem adsorpcji - desorpcji:

$$\bar{\mu}_1 = \frac{2}{3} \frac{\Gamma^*}{\alpha r_d} \left| \frac{\partial \sigma}{\partial \Gamma} \right| \quad 4.25$$

gdzie

$$\alpha = \frac{\partial P}{\partial \Gamma} - \frac{\partial Q}{\partial \Gamma} \quad 4.26$$

P, Q - szybkość desorpcji i adsorpcji [kmol/m²s],

2° - gdy szybkość tworzenia warstwy adsorpcyjnej określa szybkość dyfuzji:

$$\bar{\mu}_2 = \frac{2}{3} \frac{\Gamma^* \delta_N}{D_{BL} r_d} \left| \frac{\partial \sigma}{\partial C_B} \right| \quad 4.27$$

gdzie δ_N jest grubością warstwy dyfuzyjnej Nernsta,

3° - gdy substancja powierzchniowo-aktywna jest słabo rozpuszczalna w fazie ciągłej:

$$\bar{\mu}_3 = \frac{1}{3} \frac{\Gamma^* r_d}{D_{BS}} \left| \frac{\partial \sigma}{\partial \Gamma} \right| \quad 4.28$$

Obszerną dyskusję rozwiązania Lewicza, pewne jego modyfikacje i rozszerzenie na różnego rodzaju szczególne przypadki /w zależności od aktywności powierzchniowej, stężenia, właściwości faz i rodzaju substancji powierzchniowo-czynnej/ podają: Duchin [67, 68, 71], Griffith [109], Harper [128, 129, 138], Wasserman [295], Saville [263], Newman [204], Schechter [258, 261] i Ruckenstein [236, 238].

Prędkość płynu na powierzchni międzyfazowej na równiku pęcherza / $\theta = \pi/2$ / określa równanie:

$$w_c^s = \frac{1}{3} \frac{(\rho_c - \rho_d) g r_d^2}{2\mu_c + 3\mu_d + 3\bar{\mu}} \quad 4.29$$

Gdy $\bar{\mu} \gg \mu_c + \mu_d$, wówczas równanie /4.24/ przechodzi w równanie Stokesa i $w_c^s \ll w_b$ /pęcherz zachowuje się jak sztywna kula/. Współczynnik wnikania masy obliczyć można w takim przypadku z zależności Frösslinga [127], Lochiela [180] lub Ruckenstein [236, 238]. Problem sprowadza się więc do ustalenia á priori czy w pęcherzu o danej wielkości znajdującym się w roztworze określonego związku powierzchniowo-czynnego cyrkulacja zostanie zahamowana.

Prędkość wznoszenia się pęcherzy dużych $/d_b = 0,2 - 1 \text{ cm}/$ maleje nieznacznie w obecności substancji powierzchniowo-czynnych w roztworze, natomiast nie zmienia się zupełnie, gdy $d_b > 1 \text{ cm}$ [19, 56, 108, 113, 127, 176] pod warunkiem, że lepkość roztworu pozostaje stała. Współczynniki wnikania masy w czystej wodzie są porównywalne lub wyższe od obliczonych na podstawie teorii penetracji, natomiast w przypadku roztworów wyniki eksperymentów podsumować można następująco: [19, 55, 56, 58, 108, 159, 160, 176, 180, 189, 231, 236, 238, 288, 289, 296].

- 1° - współczynnik wnikania masy k_L^s maleje w porównaniu z czystą wodą średnio o ok. 10 - 70 %, lub nie zmienia się wcale,
- 2° - im większa jest aktywność powierzchniowa dodatku, tym silniej hamuje szybkość wymiany masy,
- 3° - obniżenie szybkości wymiany masy maleje ze wzrostem średnicy pęcherza /dla dużych liczb Reynoldsa $k_L^s \rightarrow k_L/$,
- 4° - w miarę wzrostu stężenia szybkość wnikania maleje monotonicznie lub przechodzi przez minimum, które wypada w pobliżu CMC.

Istnienie minimum funkcji $k_L^s = k_L^s / C_B$ zostało przewidziane przez Ruckensteina [231, 236, 238] i Vogtländera [189, 288, 289], przy założeniu, że substancje powierzchniowo-czynne wpływają tylko na hydrodynamikę powierzchni międzyfazowej. Vogtländer przyjął, że miarą wpływu dodatków powierzchniowo-aktywnych na szybkość wnikania masy jest iloczyn $C_B (d\sigma/dC_B)^2$ i otrzymał półempiryczną zależność w oparciu o teorię penetracji:

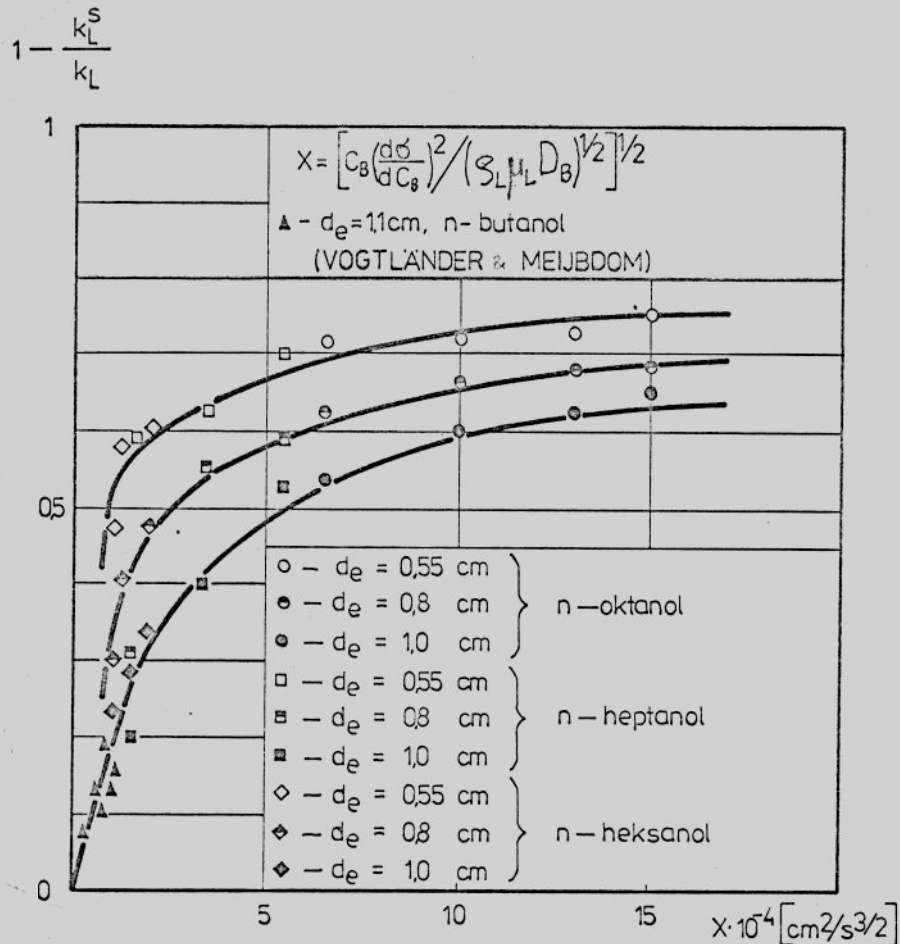
$$1 - \frac{k_L^s}{k_L} = C_{4.30} \left[C_B \left(\frac{d\sigma}{dC_B} \right)^2 / (\rho_L \mu_L D_{BL})^{0,5} \right]^{0,5} \quad 4.30$$

gdzie $C_{4.30}$ zależy od wielkości i kształtu pęcherza. Koide [159, 160] wykazał, że $C_{4.30}$ jest również funkcją stężenia i aktywności powierzchniowej /rys.4.12/ i zaproponował inny sposób obliczenia k_L^s :

$$\frac{k_L^s}{k_L^o} = \left(1 + 1,9 \frac{w_c^s}{1,5 w_b} \right)^{0,5} Sc_{AL}^{0,167} \frac{w_c^s}{1,5 w_b} \quad 4.31$$

gdzie k_L^o jest współczynnikiem wnikania od cząstki ciała stałego o takim samym kształcie i wielkości jak pęcherz.

Równania /4.30/ i /4.31/ mogą być stosowane tylko wtedy, gdy czas przebywania pęcherzy w cieczy jest większy od czasu wymaganego do ustalenia się równowagi adsorpcyjnej /równ. /2.47/ i /2.48//. W przeciwnym przypadku można stosować równanie Higbiego [189], co wydaje się być zbyt uproszczonym podejściem do zagadnienia, o czym świadczy znacznie większa zmienność wartości chwilowych współczynników wnikania w czasie wznoszenia się pęcherzy w roztworach niż w czystej wodzie [160].



Rys. 4.12. Eksperymentalna weryfikacja równania Vogtlandera [159]

4.7. Zbiory pęcherzy

Całkowita szybkość wymiany masy między cieczą zawierającą substancję powierzchniowo-czynną a gazem rozpraszonym w niej w postaci pęcherzy może wzrastać lub zmniejszać się na skutek równoczesnego wpływu tej substancji na współczynnik przenikania masy i powierzchnię międzyfazową /równania /4.8/ - /4.16//.

Próby teoretycznego ujęcia wpływu substancji powierzchniowo-czynnych na hydrodynamikę i wymianę masy w układach zdyspergowanych podejmował Gal-Or [98, 100, 101, 102, 103, 233], Ishii [140] i Ruckenstein [231, 236, 238]. W zakresie małych liczb Reynoldsa

/Re < 1/ i stopnia zatrzymania $\varphi_d < 0,5$ / końcową prędkość zespołu kulistych pęcherzy /lub kropelek/ określa zależność [101]:

$$w_{zb} = \frac{2}{9} \frac{(\rho_c - \rho_d) g r_d^2}{\mu_c} \frac{3 \mu_c (1 - \varphi_d^{1/3}) (1 - \varphi_d^{5/3}) + (3 - 4,5 \varphi_d^{1/3} + 4,5 \varphi_d^{5/3} - 3 \varphi_d^2) (\mu_d + \bar{\mu})}{2 \mu_c (1 - \varphi_d^{5/3}) + (3 + 2 \varphi_d^{5/3}) (\mu_d + \bar{\mu})} \quad 4.32$$

gdzie:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{3} K \left| \frac{\partial \phi}{\partial \Gamma} \right| \quad 4.33$$

$$K = \frac{2 \Gamma^* r_d}{2 D_{BS} + \left(\frac{\alpha_o}{1 - \Gamma^* / \Gamma_\infty} \right) D_{BL} r_d^2} \quad 4.34$$

$$D_{BS} + \delta_N \beta_o (1 - \Gamma^* / \Gamma_\infty)$$

α_o, β_o - stałe szybkości desorpcji i adsorpcji.

Równanie /4.32/ ma bardzo ogólny charakter: gdy $\varphi_d \rightarrow 0$, otrzymuje się równanie Lewicza /4.24/, gdy $\varphi_d \rightarrow 0$ i $\bar{\mu} \rightarrow 0$, równanie Hadamarda - Rybczyńskiego, gdy $(\mu_d + \bar{\mu}) \rightarrow \infty$, równanie Happela na szybkość opadania zespołu cząstek stałych, a dla $\varphi_d \rightarrow 0$ i $(\mu_d + \bar{\mu}) \rightarrow \infty$ - równanie Stokesa. Współczynnik opóźnienia $\bar{\mu}$ /4.33/ w szczególnych przypadkach redukuje się do zależności /4.25/ - /4.28/.

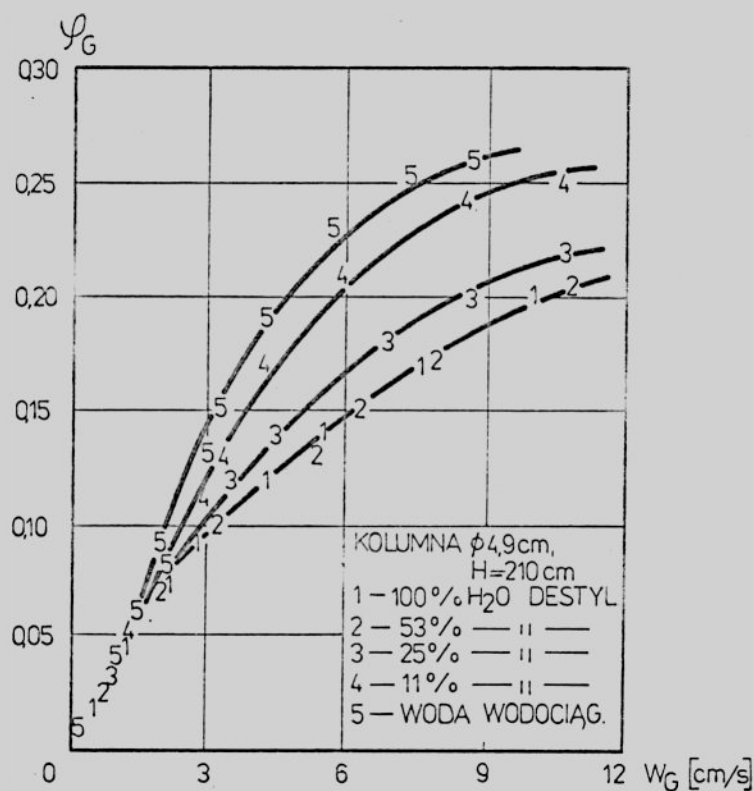
Dla pęcherzy o wielkości $d_b < 2$ mm rozproszonych w roztworze substancji powierzchniowo-aktywnej przy stopniu zatrzymania $\varphi_G \leq 0,8$ Ruckenstein [236] wyznaczył zależność:

$$k_L^s = C_{4.35} \left(\frac{(\rho_L - \rho_G) \mu_L g}{\rho_L^2} \right)^{1/3} Sc_{AL}^{-2/3} \quad 4.35$$

gdzie $C_{4.35} = 0,26 - 0,38$. Równanie /4.35/ jest identyczne z em-

pirycznym równaniem Calderbanka [41], wyznaczonym na podstawie licznych danych otrzymanych w czystych układach gaz - ciecz i ciecz - ciecz, gdzie wartość stałej wynosi 0,31.

O bardzo dużym wpływie śladowych ilości zanieczyszczeń na hydrodynamikę układów dwufazowych świadczą m.in. wyniki badań Andersona [2] /rys. 4.13/.



Rys. 4.13. Wpływ stopnia czystości wody na wielkość stopnia zatrzymania fazy gazowej podczas barbotażu [2] .

Wyznaczenie wartości współczynnika k_L^S na podstawie iloczynu $k_L^S a_V^S$ wymaga dokładnej znajomości właściwej powierzchni międzyfazowej /4.10/, której pomiar może być obarczony dużym błędem. Tylko błędami pomiarów wielkości pęcherzy można wytłumaczyć zwiększanie się współczynnika wnikania k_L^S w porównaniu z k_L wraz ze wzrostem stężenia alkoholu w wodzie [307]. Przy małej intensywności barbotażu przyrost powierzchni międzyfazowej jest

niewielki i notuje się spadek wartości objętościowego współczynnika wnikania k_L^s a_v^s [77, 199]. Zwiększenie prędkości przepływu gazu lub zastosowanie mniejszych otworów w urządzeniu dyspergującym zwiększa kilkakrotnie szybkość wymiany masy [51, 130, 234, 304]. Podobny efekt obserwuje się w przypadku pęcherzy w wodnych roztworach elektrolitów nieorganicznych [177, 306].

Gal-Or [100, 102, 103] proponuje stosowanie równania Higbiego przy założeniu, że czas penetracji równy jest czasowi przebywania pęcherza w cieczy, co jednak daje zaniżone wartości współczynnika k_L^s w porównaniu z wynikami eksperymentów [234, 280], które wskazują na częściowe zahamowanie cyrkulacji $/k_L^s /$ Frossling, $<k_L^s < k_L^s /$ Higbie//.

4.8. Kolumny z wypełnieniem

Elenkow [75, 80, 85] badając wpływ różnych środków powierzchniowo-czynnych /Nekal BX, Primazol PF, OP-10, Peregal ON, Sandozin NJ/ na hydrodynamikę kolumn z wypełnieniem wykazał, że zmniejszają one znacznie przepustowość kolumn. Polepszenie zwilżalności wypełnienia cieczą, zwiększenie grubości spływającego filmu oraz pienienie powoduje znaczny wzrost stopnia zatrzymania cieczy, zwiększenie spadku ciśnienia oraz przesunięcie punktów inwersji faz i zalania w kierunku mniejszych obciążeń gazem i cieczą. Elenkow wprowadził pojęcie równoważnego natężenia przepływu cieczy czystej L_{me} , które powoduje taki sam spadek ciśnienia gazu, jaki wystąpi przy natężeniu przepływu cieczy pieniącej, wynoszącym L_m^s :

$$L_{me} = L_m^s \left(1 + v_f / C_{4.36} \varepsilon L_m^s \right)^{0,71} 1,41 \quad 4.36$$

gdzie V_f jest objętością powstałej piany /wielkość bliżej nieokreślona/, ε - porowatością wypełnienia, a $C_{4.36}$ - stałą zależną od rodzaju wypełnienia. W zakresie stężeń $C_B \leq 0,1$ % mas. stwierdzono, że $L_{me} \leq 5 L_m^s$.

Badania kinetyki wymiany masy w fazie ciekłej [75, 81, 85] wykazały zmniejszanie się objętościowego współczynnika wnikania masy wraz ze wzrostem stężenia dodatku w obszarze $Re_L < Re_{Linw.f.}$

$$k_L^s a_V^s = k_L a_V / 10^{(C_{4.37} C_{Bm}^{0,25} / Re_L)} \quad 4.37$$

gdzie $C_{4.37}$ zależy od rodzaju substancji powierzchniowo-czynnej. Powyżej punktu inwersji faz wartości współczynnika $k_L^s a_V^s$ przewyższają $k_L a_V$.

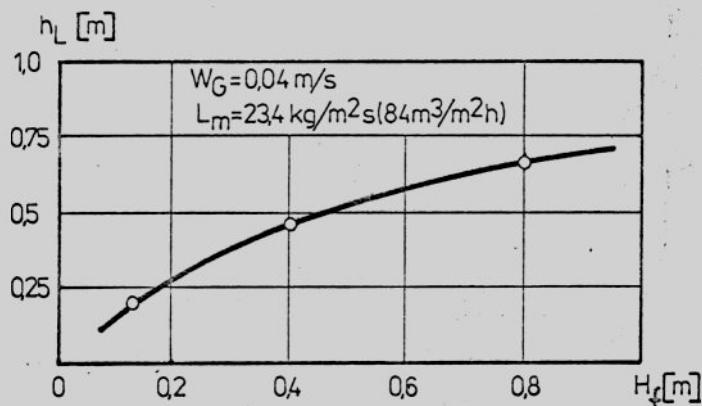
Sherwood [254] stwierdził, że zależność $k_L^s a_V^s$ od stężenia Ultrawetu i W-70 wykazuje minimum przy $C_B = 0,005 - 0,02$ % mas $< CMC$.

Wyniki badań kinetyki wymiany masy w fazie gazowej [82] są zupełnie analogiczne do otrzymanych przez Elenkova dla fazy ciekłej. Poniżej punktu inwersji faz $k_G^s a_V^s$ jest mniejsze od $k_G a_V$ o ok. 20 %, a następnie wzrasta. Niestety, Elenkow nie podaje sposobu określenia obciążeń odpowiadających inwersji faz i zalaniu kolumny.

W przeciwieństwie do Elenkova, Smith [253] uzyskał monotoniczny wzrost współczynnika $k_G^s a_V^s$ /o ok. 30 %/ przy zwiększaniu stężenia siarczanu laurylu od 0 do 0,5 kg/m³.

4.9. Kolumny pianowe

Badania nad wymianą masy w pianie trwałej podjął w 1956 roku Metzner[187]. Piana wytwarzana była strumieniem powietrza przepływającym przez porowatą płytkę węglową zanurzoną w roztworze Naconolu lub Glimu $/C_B < 0,33 \text{ \% mas.}/$ i wznosiła się do szczytu kolumny, gdzie niszczona była rozpylanym roztworem. Taki sposób prowadzenia procesu pozwolił na uzyskanie prędkości gazu $w_G \leq 0,1 \text{ m/s}$ przy stosunkowo dużych obciążeniach cieczą $L = 80 - 160 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Stwierdzono znaczne zmniejszenie się szybkości wnikania masy /o ok. 50 %/ ze wzrostem stężenia detergentów i wystąpienie maksimum szybkości w zależności od prędkości gazu przy $w_G = 0,04 \text{ m/s}$ /rys. 4.14/.

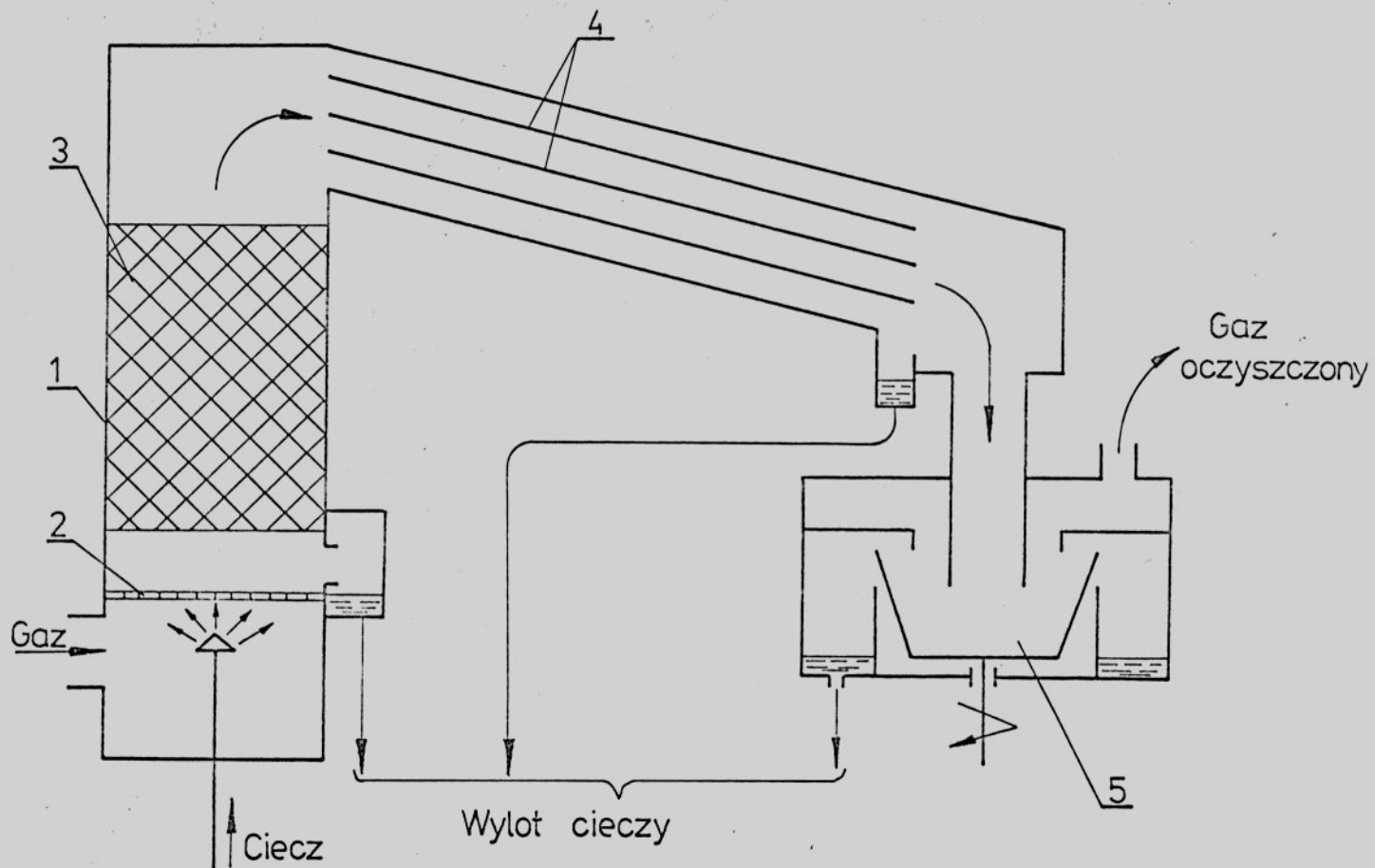


Rys. 4.14. Zależność jednostkowej wysokości wnikania masy od wysokości piany przy optymalnej prędkości gazu [187].

Hydrodynamika tego typu kolumn była przedmiotem badań Rubina [120, 223]. Dają one stosunkowo wysokie względne spadki ciśnienia gazu rzędu $3000 - 6000 \text{ N/m}^2\text{m}$ wys. piany.

Nieco większą przepustowość $w_G < 0,3 \text{ m/s}$ uzyskał Weissman [291, 292] w urządzeniu z poziomym kanałem o długości $0,8 \text{ m}$, gdzie piana wytwarzana była na pochyłej płycie perforowanej o

powierzchni swobodnej $r_A = 0,01 - 0,03$. Przy użyciu wodnych roztworów saponinu $/C_B = 0,1 - 0,75 \% \text{ mas.} \leq \text{CMC}/$ otrzymano wyniki badań nad szybkością wymiany masy porównywalne z wynikami Metznera, lecz przy znacznie mniejszych spadkach ciśnienia gazu, $400 - 600 \text{ N/m}^2 \text{ m}$ długości kanału.



Rys. 4.15. Absorber Huppkego [146].

1 - kolumna, 2 - półka sitowa, 3 - wypełnienie,
4 - pochyły kanał, 5 - urządzenie do niszczenia piany

Badano również wpływ Nekalu BX $/C_B = 0,001 - 0,1 \% \text{ mas.}/$ na hydrodynamikę i wymianę masy w absorberze Venturiego [74, 89], lecz różnice mieściły się w granicach błędu pomiaru.

W ostatnich latach opatentowano kilka rozwiązań konstruk-

cyjnych urządzeń do absorpcji przy użyciu roztworów środków powierzchniowo-czynnych [7, 116, 145, 153].

4.10. Układy ciecz - ciecz

Ponieważ w rzeczywistości prawie nigdy nie mamy do czynienia z czystymi układami dwufazowymi ciecz - ciecz, podejmowano więc liczne prace teoretyczne i eksperymentalne dotyczące wpływu substancji powierzchniowo-czynnych na hydrodynamikę i kinetykę wymiany masy /ekstrakcji/. Wielu autorów omawia to zagadnienie ogólnie [33, 34, 54, 55, 57, 58, 75, 85, 148, 258] lub prezentuje próby teoretycznego rozwiązania niektórych problemów z tym związanych [54, 55, 58, 91, 93, 109, 166, 174, 179, 180, 204; 261, 263, 295]. Obniżenie szybkości wymiany masy tłumaczy się efektem bariery energetycznej [107, 110, 133, 178, 298], hydrodynamicznym [31, 32, 54, 55, 62, 83, 112, 198, 206, 284] lub jednym i drugim [125, 134, 164, 262]. W układach zdyspergowanych obserwuje się wzrost całkowitej szybkości wymiany masy [54, 55, 60, 85, 216].

5. WPŁYW ŚRODKÓW POWIERZCHNIOWO-CZYNNYCH NA HYDRODYNAMIKĘ I WYMIANĘ MASY W KOLUMNACH PÓŁKOWYCH

Pienienie się cieczy może znacznie ograniczyć przepustowość kolumny półkowej lub doprowadzić do zalania przestrzeni międzypółkowej i przelewu. W kolumnie może być ono spowodowane własnościami cieczy wynikającymi z jej składu chemicznego lub zjawiskiem Marangoniego, w efekcie którego występuje stabilizacja pęcherzy gazu, gdy na skutek wymiany masy napięcie powierzchniowe cieczy wzrasta w kierunku dołu kolumny [9, 54, 55, 58, 185, 305]. W pierwszym przypadku, do zależności na dopuszczalną prędkość fazy gazowej w kolumnie wprowadza się współczynniki określające skłonność układu do pienienia, których wartości ustala się przez porównanie własności pianotwórczych danej cieczy z cieczami wzorcowymi [439, 185, 273]. Projektowanie przelewu wymaga uwzględnienia trwałości piany powstałej na półce [185, 273].

Badania nad wpływem środków powierzchniowo-czynnych tworzących roztwory o własnościach pianotwórczych na hydrodynamikę i wymianę masy w kolumnach półkowych prowadzone są od początku lat sześćdziesiątych przez Rodionowa i Elenkova.

5.1. Hydrodynamika półek

5.1.1. Wysokość piany

Na bezprzelewowych półkach sitowych wysokość piany jest monotonicznie rosnącą funkcją stężenia substancji powierzchniowo-czynnej, prędkości gazu i cieczy [40, 28, 75, 76, 85, 228, 229].

Rodionow [229] ustalił prostą zależność między wysokością piany H_f a równoważną wysokością cieczy h_0 :

$$H_f^s = 4 h_o^s$$

5.1

co oznacza, że w przebadanym zakresie zmiennych stopień zatrzymania gazu jest stały i wynosi 0,75.

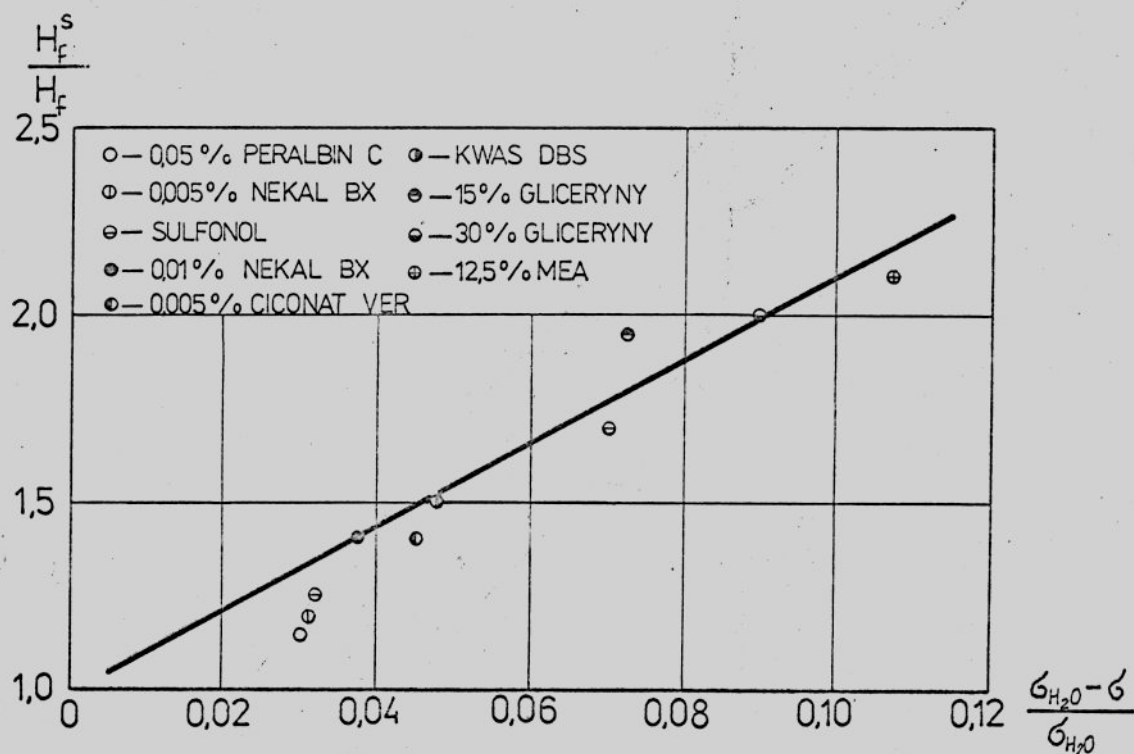
Proponowany przez autora sposób obliczenia wysokości piany i spadku ciśnienia na półce wymaga uprzedniej znajomości wielkości h_o , gdyż danych jest 5 równań /5.1, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6/ a wyznaczyć trzeba 6 niewiadomych. Równanie /5.1/ jest ważne w następującym zakresie zmiennych:

- średnica kolumny $D_k = 50 \text{ mm}$
- średnica otworów półki $d_o = 6 \text{ mm}$
- podziałka rozmieszczenia otworów $t = 10 \text{ mm}$
- powierzchnia swobodna półki $r_A = 0,317$
- grubość półki $\delta_p = 5 \text{ mm}$
- prędkość gazu w kolumnie $w_G = 0,5 - 1,5 \text{ m}$
- gęstość zraszania półki $L_m = 0,55 - 3,9 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- środki powierzchniowo-czynne
 - Nektal $C_B = 0 \text{ i } 0,15 \text{ \% mas.}$
 - Sulfanol, $C_B = 0 \text{ i } 0,02\% \text{ mas.}$
- napięcie powierzchniowe $\sigma = 72,75 - 40 \text{ mN/m}$

Ogólniejszą zależność na obliczenie wysokości piany podał Elenkow[76]. Jeżeli znana jest wysokość piany na danej półce / d_o, t, r_A, δ_p / przy danej szybkości gazu w kolumnie / w_G / i czystej wodzie, to wysokość piany w takich samych warunkach, lecz przy użyciu wodnego roztworu o napięciu powierzchniowym σ określa zależność

$$H_f^s = H_f \cdot 9,8 \left(\frac{\sigma_{H_2O} - \sigma}{\sigma_{H_2O}} + 1 \right) \quad 5.2$$

którą opracowano na podstawie eksperymentów prowadzonych w następującym zakresie zmiennych: $D_k = 83 - 160$ mm, $d_o = 2 - 9$ mm, $r_A = 0,102 - 0,38$, $\delta_p = 2$ mm, $w_G = 0,2 - 1,6$ m/s, $L_m = 1,4 - 11$ kg/m²s, $\sigma = 72,3 - 39$ mN/m², $\mu_L = 1 - 2,82$ mNs/m², $\rho_L = 962 - 1000$ kg/m³, przy użyciu wody i wodnych roztworów Nekalu BX, Peralbinu C, Ciconatu VER, kwasu DBS, MEA, gliceryny i C₂H₅OH.



Rys. 5.1. Zależność przyrostu wysokości piany od względnej zmiany napięcia powierzchniowego

Badając wpływ środków powierzchniowo-czynnych na powierzchnię międzyfazową na przelewowych półkach sitowych, Rodionow [227,230] stwierdził zmniejszenie się wysokości piany ze wzrostem prędkości gazu od 0,6 do 1,8 m/s. Wyniki badań Elenkova [87] nad porywaniem cieczy z przelewowych półek sitowych wskazują jednak na wyraźny wzrost wysokości piany w zakresie prędkości gazu od 0,53 do 1,44 m/s.

5.1.2. Spadek ciśnienia na półce

Podobnie, jak wysokość piany, również całkowity spadek ciśnienia na bezprzelewowych i przelewowych półkach sitowych zwiększa się wraz ze wzrostem stężenia dodatku, prędkości gazu i cieczy [10, 23, 75, 76, 85, 227, 228, 229, 230].

Rodionow [229] proponuje znaną metodę obliczania poszczególnych składników całkowitego spadku ciśnienia za pomocą równań:

$$\Delta p = \Delta p_p + \Delta p_f + \Delta p_g \quad 5.3$$

$$\Delta p_p = \zeta \frac{w_{Go}^2 \rho_G}{2} \quad 5.4$$

$$\Delta p_f = \rho_L g h_o \quad 5.5$$

$$\Delta p_g = \frac{4 \sigma}{d_o + 0,08 d_o^2} \quad 5.6$$

nie precyzując jednak, według jakiej zależności należy obliczyć współczynnik oporu ζ /5.4/. Wielkość h_o związana jest z wysokością piany równaniem /5.1/. Według Elenkova [76] całkowity spadek ciśnienia na półce obliczyć można, jeżeli znany jest względny przyrost wysokości piany /równanie /5.2// i spadek ciśnienia na tej samej półce przy takiej samej prędkości gazu i czystej wody / Δp /:

$$\Delta p^s = \Delta p \left(H_f^s / H_f \right)^{0,69} \quad 5.7$$

Zależność /5.7/ opracowano na podstawie badań prowadzonych w zakresie zmiennych, podanym dla równania /5.2/

5.1.3. Porywanie cieczy

Wpływ środków powierzchniowo-czynnych na porywanie cieczy z przelewowych półek sitowych i kołpakowych był przedmiotem badań Elenkova [75, 87, 290]. Ustalono, że porywanie zwiększa się tylko na skutek zwiększenia się wysokości piany /zmniejszenia się wysokości przestrzeni separacyjnej przy danym odstępnie między półkami/. Stwierdzono, że w zakresie przebadanych zmiennych /podanym poniżej/ wyróżnić można trzy obszary pracy półek: barbotażowy, pianowy i strumieniowy, dla których ilość porywanej cieczy e_{mG}^s /w kg/kg gazu/ obliczyć można z następujących zależności [87]:

a/ obszar barbotażowy:

$$e_{mG}^s = 0,445 \cdot 10^{-4} \frac{w_G^{3,69}}{H_p^{4,36}} \left(\frac{H_f^s}{H_f} \right)^{2,05} \quad 5.8$$

b/ obszar pianowy

$$e_{mG}^s = 0,282 \cdot 10^{-4} \frac{w_G^{3,69}}{H_p^{4,36}} \left(\frac{H_f^s}{H_f} \right)^{1,31} \quad 5.9$$

c/ obszar strumieniowy

$$e_{mG}^s = 0,263 \cdot 10^{-4} \frac{w_G^{3,69}}{H_p^{4,36}} \left(\frac{H_f^s}{H_f} \right)^{1,02} \quad 5.10$$

Badania prowadzono w następującym zakresie zmiennych: $D_k = 190$ mm, $\delta_p = 5$ mm, $d_o = 3$ mm, $r_A = 0,105$, wysokość progu przelewowego $h_w = 40$ mm, $L_m = 2,53$ kg/m²s, $w_G = 0,53 - 1,44$ m/s, $H_p = 150 - 410$ mm. Środki powierzchniowo-czynne: alkohol amylový - $C_B = 0,005 - 0,05$ % mas., Diazopal - $C_B = 0,0005 - 0,001$ %, Peregal KS - $C_B = 0,001 - 0,004$ %, Nekał BX - $C_B = 0,001 - 0,003$ %.

MEA - $C_B = 2 - 8 \%$. Zakresu zmienności napięcia powierzchniowego nie podano.

Z zależności /5.8/ - /5.10/ można skorzystać, jeżeli znany jest względny przyrost wysokości piany H_f^s/H_f i obszar pracy półki, lecz autor nie podał żadnych wskazówek na ten temat.

Podobne równania otrzymano dla półek kołpakowych[290].

5.1.4. Powierzchnia międzyfazowa

Rodionow[227,230] zastosował metodę depolaryzacji światła do pomiaru wielkości powierzchni międzyfazowej na przelewowej półce sitowej w obecności niejonowych, anionowych i kationowych środków powierzchniowo-czynnych. Autor stwierdził, że anionowe substancje powierzchniowo-czynne nie wywierają żadnego wpływu na wielkość powierzchni kontaktu faz, którą można w tym przypadku obliczać z zależności opracowanych dla czystej wody. Związki kationowe i niejonowe powodują znaczny wzrost powierzchni międzyfazowej /z 400 do ok. 1400 m²/m³/, co zachodzi przy nie zmieniającym się stopniu zatrzymania gazu $\varphi_G = \varphi_G^s$, zatem jedynie na drodze zmniejszenia się wielkości pęcherzyków. Wyniki badań autor opracował w postaci korelacji:

a/ dla $w_G \leq 1,2$ m/s

$$a_v^s = 2740 \left(\Delta\sigma/\sigma_{H_2O} \right)^{0,45} \varphi_G^{0,3} \quad 5.11$$

b/ dla $w_G > 1,2$ m/s

$$a_v^s = 3288 \left(\Delta\sigma/\sigma_{H_2O} \right)^{0,45} \varphi_G^{0,3} w_G^{-1,15} \quad 5.12$$

Zmniejszanie się właściwej powierzchni międzyfazowej wraz ze wzrostem prędkości gazu ponad 1,2 m/s autor tłumaczy zwię-

szeniem się szybkości koalescencji pęcherzy.

Badania prowadzone były w kolumnie prostokątnej 50 x 200 mm z półką sitową o parametrach konstrukcyjnych: $d_o \approx 2$ mm; $r_A = 0,06$, $h_w = 40$ mm w zakresie obciążeń: $w_G = 0,6 - 1,8$ m/s, $L_m = 0,11 - 1,4$ kg/ms przy użyciu następujących środków powierzchniowo-czynnych.

- anionowe: Smačivatel NB, Sulfoolein SK, Sulfanol NP-1
 $/C_B = 0,001 - 0,02$ % mas, $\zeta = 71,6 - 36$ mN/m/,
- kationowe: Alkamon N, Alkamon DS, Vyravnyvatel A
 $/C_B = 0,001 - 0,02$ % mas, $\zeta = 71,6 - 38$ mN/m/,
- niejonowe: OP-7, OP-10 $/C_B = 0,001 - 0,025$ % mas,
 $\zeta = 69,5 - 30$ mN/m/.

5.2. Wymiana masy - opór wnikania po stronie fazy ciekłej

Całkowitą szybkość wnikania masy na bezprzelewowej półce sitowej opisać można za pomocą objętościowego współczynnika wnikania $k_L a_v$, lub współczynnika wnikania odniesionego do jednostki powierzchni półki $k_L a_p$. Drugi sposób jest dogodniejszy, gdyż nie wprowadza błędu wynikającego z oszacowania wysokości piany:

$$\dot{M}_A = k_L a_p \cdot A_p \cdot \Delta \bar{C}_A \quad 5.13$$

Rodionow[228,229] i Elenkow[40, 28, 75, 85] stwierdzili znaczny wzrost wartości współczynnika $k_L a_p$ w miarę zwiększania stężenia środków powierzchniowo-czynnych. Badania prowadzono desorbując tlen powietrzem z wodnych roztworów. Przy obliczaniu współczynnika $k_L a_p$ zakładano pełne przemieszanie w fazie ciekłej

$$k_L a_p = w_L N_L \quad 5.14$$

gdzie

$$N_L = \frac{x_{Ap} - x_{Ak}}{x_{Ak} - x_A^*} \quad 5.15$$

$$x_A^* = y_{Ak}/K_{yx} \quad 5.16$$

Rodionow opracował swoje dane eksperymentalne w postaci korelacji na liczbę Sherwooda:

$$Sh_L = 3620 Re_L^{0,7} We^{0,58} \quad 5.17$$

gdzie poszczególne liczby bezwymiarowe zostały zdefiniowane następująco:

$$\text{- liczba Sherwooda: } Sh_L = k_L a_p H_f / D_{AL} \quad 5.18$$

$$\text{- liczba Reynoldsa: } Re_L = w_L d_o / \nu_L \quad 5.19$$

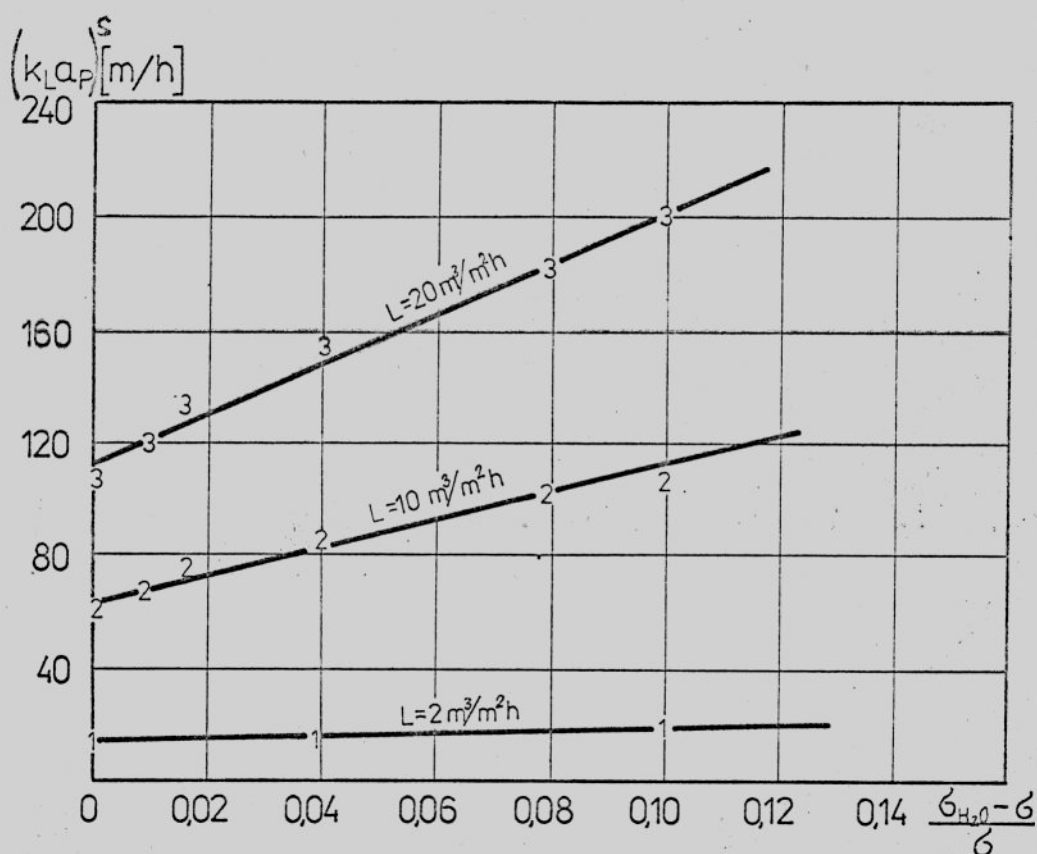
$$\text{- liczba Webera } We = \rho_f g H_f^2 / \sigma \quad 5.20$$

$$\rho_f = \rho_L h_o / H_f \quad 5.21$$

/górne indeksy s pominięto/. Zakres przebadanych zmiennych podano przy równaniu /5.1/.

Elenkow prowadził eksperymenty w kolumnie $D_k = 160$ mm, z półką sitową o parametrach: $d_o = 8$ mm, $r_A = 0,195$, $\delta_p = 2$ mm, przy prędkości gazu $w_G = 0,2 - 1,7$ m/s i cieczy $L_m = 1,4 - 9,7$ kg/m²s, stosując Nekal BX, Peregal ON i SandozinNJ w zakresie stężeń 0,005 - 0,02 % mas. / $\sigma = 72,3 - 65$ mN/m/. Wpływ środków powierzchniowo-czynnych ujęty został współczynnikiem określającym względną zmianę napięcia powierzchniowego /rys. 5.2/:

$$(k_L a_p)^s = k_L a_p + (44 L - 30) \left(\frac{\sigma_{H_2O} - \sigma}{\sigma} \right) \quad 5.22$$



Rys. 5.2. Zależność współczynnika wnikania masy od względnej zmiany napięcia powierzchniowego [28] .

Wykazano również, że istnieje zależność między współczynnikiem wnikania $(k_L a_p)^s$ i całkowitym oporem przepływu gazu przez półkę [10] :

$$(k_L a_p)^s = 4,2 \Delta p^s - 60 \quad 5.23$$

gdzie Δp^s wyrażone jest w $[\text{mm H}_2\text{O}]$.

W literaturze brak jest jakichkolwiek danych odnośnie wpływu substancji powierzchniowo-czynnych na kinetykę wnikania masy w fazie gazowej w kolumnach półkowych.

6. WNIOSKI Z PRZEGLĄDU LITERATURY I CEL PRACY

Z przedstawionego przeglądu literatury wynika przede wszystkim wniosek, że wpływ substancji powierzchniowo-czynnych na hydrodynamikę i wymianę masy w układach dwufazowych nie jest jeszcze dostatecznie dokładnie poznany. Dotyczy to zarówno zagadnień o charakterze podstawowym, jak i metod projektowania wymienników masy w oparciu o rozważania teoretyczne lub równania empiryczne.

Zależności przedstawione w rozdziale 5 nie pozwalają na pewne zaprojektowanie kolumny z bezprzelewową półką sitową do pracy w układzie gaz - wodny roztwór środka powierzchniowo-czynnego z następujących przyczyn:

- 1^o Obliczenie wysokości piany wg równania /5.1/ jest niemożliwe z uwagi na nieznaną wartość h_0 . Użycie równania /5.2/, które opracowane zostało na podstawie badań przeprowadzonych w szerszym zakresie zmiennych wymaga znajomości wysokości piany powstałej przy czystej wodzie, lecz autor nie przedstawił porównania swoich wyników z wartościami H_f obliczonymi z różnych korelacji.
- 2^o Obliczenie oporu przepływu gazu przez kolumnę metodą Rodionowa /równania /5.3/ - /5.6// jest niemożliwe /nieznana wartość h_0 /. Równanie /5.7/ pozwala obliczyć spadek ciśnienia gazu w oparciu o trzy wielkości, z których dwie / p i H_f / można wyznaczyć z wielu dostępnych korelacji, co wobec znacznych różnic między nimi może wprowadzić znaczny błąd.
- 3^o Brak jest danych pozwalających obliczyć porywanie cieczy z bezprzelewowych półek sitowych.

- 4° Wyznaczenie współczynnika wnikania masy w fazie ciekłej na podstawie równań /5.17/ - /5.21/ jest niemożliwe /nieznana wartość h_0 /. Zastosowanie równania /5.22/ wiąże się z koniecznością obliczenia współczynnika wnikania w czystej wodzie, a natomiast równania /5.23/ - zmusza do korzystania z zależności /5.7/ /punkt 2°/.
- 5° Brak jest danych umożliwiających obliczenie współczynnika wnikania masy w fazie gazowej.
- 6° Przy ocenie wpływu środków powierzchniowo-czynnych na hydrodynamikę i wymianę masy Elenkow uwzględnia tylko fakt obniżenia się napięcia powierzchniowego cieczy /równania/5.2/, /5.7/ i /5.22//. Jest to zbyt duże uproszczenie zagadnienia, gdyż nie ma jednoznacznej zależności między napięciem powierzchniowym cieczy a jej zdolnością pienienia i trwałością powstałej piany, a należy się spodziewać, że dwa ostatnie czynniki będą miały decydujący wpływ na warunki hydrodynamiczne w kolumnie półkowej.
- 7° Badania Elenkova i Rodionowa prowadzone były przy prędkościach gazu nie większych niż 1,7 m/s, co nie jest górną granicą możliwości pracy kolumn półkowych.

Uwzględniając powyższe uwagi, cel niniejszej pracy można sformułować następująco:

- A/ Eksperymentalne zbadanie wpływu kilku wybranych niejonowych środków powierzchniowo-czynnych na hydrodynamikę /wysokość piany, opór przepływu gazu i porywanie cieczy/ i wymianę masy /opór wnikania po stronie fazy ciekłej i gazowej/ na bezprzelewowym półkach sitowych o różnych parametrach ge-

ometrycznych przy prędkościach gazu do 4 m/s.

B/ Opracowanie zależności umożliwiających projektowanie kolumn z bezprzelewowymi półkami sitowymi przy uwzględnieniu zdolności pienienia cieczy i trwałości powstałej piany.

7. CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA

7.1. Charakterystyka stosowanych środków powierzchniowo-czynnych

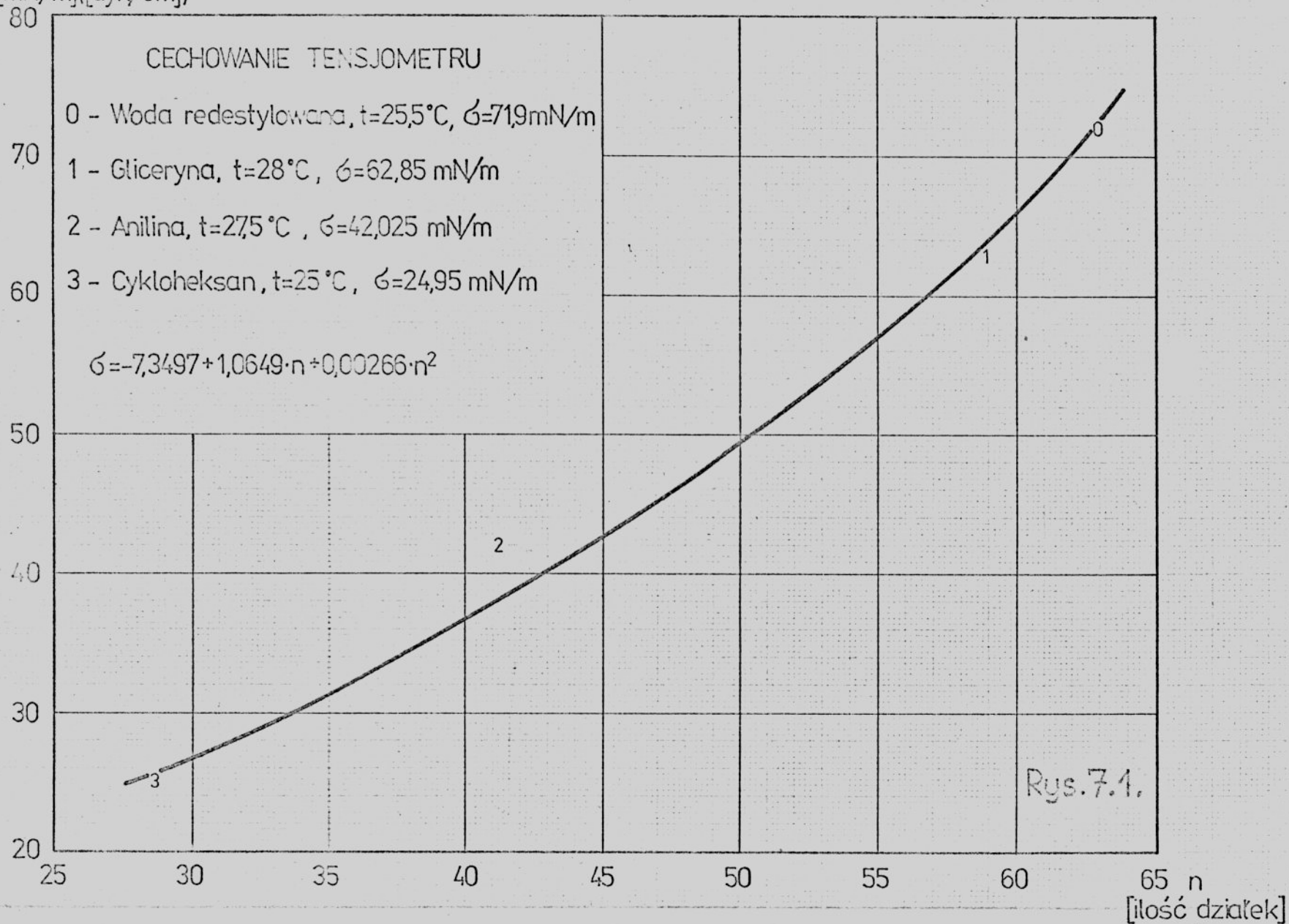
Spośród niejonowych środków powierzchniowo-czynnych najpowszechniej stosowane są produkty oksyetylenowania alkilofenoli i alkoholi [5 , 152, 215 , 267 , 281]. W Polsce produkowane są w NZPO "Rokita" w Brzegu Dolnym jako Rokafenole N i Rokanole L. Charakteryzują się dobrą rozpuszczalnością w wodzie, nie korodują metali, są odporne na działanie kwasów, zasad i elektrolitów.

W części eksperymentalnej zastosowano dwa wybrane środki powierzchniowo-czynne:

- 1^o - Rokafenol N8 /dawna nazwa Alfenol 8/ - polioksyetylenowany nonylofenol, $C_9H_{19}-C_6H_4-O-(CH_2CH_2O)_8-H$ /masa cząsteczkowa $M = 572 \text{ kg/kmol}$ /.
- 2^o - Rokanol L10 - polioksyetylenowany alkohol dodecylowy, $C_{12}H_{25}-O-(CH_2CH_2O)_{10}-H$ /masa cząsteczkowa $M = 626 \text{ kg/kmol}$ /. Dostępny jest w postaci preparatu o nazwie Rokanol L10/80, zawierającego 20 % mas. wody i 80 % mas. Rokanolu L10.

Należy zaznaczyć, że wszystkie środki powierzchniowo-czynne z grupy oksyetylenowanych stanowią mieszaninę homologów o różnym stopniu polioksyetylenowania, których udziały /w ułamkach masowych u_x / opisuje z dobrym przybliżeniem rozkład Poissona [5 , 24 , 267] . Liczba podana w nazwie produktu określa średnią liczbę grup tlenku etylenu n :

σ [mN/m]([dyn/cm])



σ [mN/m]

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

-7

-6

-5

-4

-3

lg C_M [kmol/m³]

0,0001

0,001

0,01

0,1

 C_m [kg/m³]

CIŚCIE POWIERZCHNIOWE WODNYCH ROZTWORÓW
ROKAFENOLU N8

● — stażometr 1820°C, wg ZN-65/MPCH/OE-3136

○ — tensjometr 1820°C

▼ — stażometr DT30, 1820°C

△ — stażometr 4820, 1820°C

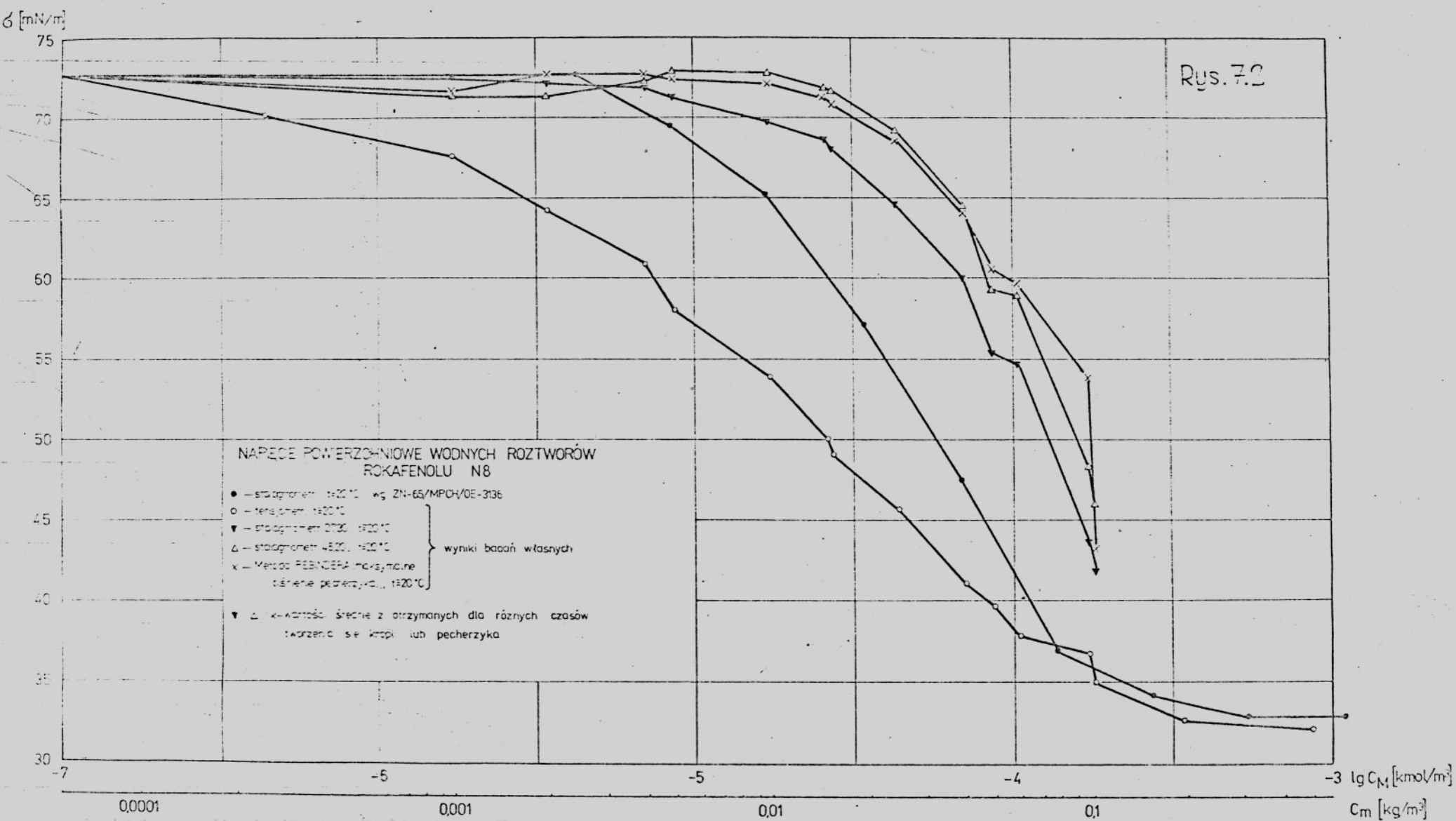
x — metoda REINOLERA maksymalne

ciśnienie pęcherzyka, 1820°C

} wyniki badań własnych

▼ △ x — wartość średnie z otrzymanych dla różnych czasów
tworzenia się kropli lub pęcherzyka

Rys. 7.2



$$u_{x+1} = \frac{e^{-/n-1/} (n-1)^x}{x!} \cdot \frac{M_{x+1}}{M_n} \quad 7.1$$

Własności fizykochemiczne homogenicznych związków z dużym przybliżeniem odpowiadają własnościom mieszanin o takim samym stopniu polioksyetylenowania n [267].

7.1.1. Napięcie powierzchniowe

Napięcie powierzchniowe wodnych roztworów Rokafenolu N8 mierzono trzema metodami:

- 1 - metodą Rebindera /metoda maksymalnego ciśnienia pęcherzyka/
- 2 - metodą stalagmometryczną /przy użyciu dwóch stalagmometrów o objętościach $2,73 \text{ cm}^3$ i $4,82 \text{ cm}^3$ /
- 3 - metodą odrywania pierścienia /przy użyciu tensjometru z platynowym pierścieniem/

Metody Rebindera i stalagmometryczna pozwalają określić różne wartości dynamicznego napięcia powierzchniowego, w zależności od czasu tworzenia się pęcherzyka lub kropli /rozdział 2/. Rozrzut wyników był jednak tak duży, że uniemożliwiło to wyznaczenie statycznego napięcia powierzchniowego metodą ekstrapolacji /rys. 2.13/.

Przed przystąpieniem do pomiarów za pomocą tensjometru wycechowano go przy użyciu wody redestylowanej, gliceryny cz.d.a., aniliny cz.d.a. i cykloheksanu cz.d.a. Napięcia powierzchniowe tych cieczy z uwzględnieniem temperatury przyjęto wg "Poradnika Fizykochemicznego". Dla każdej cieczy dokonano 25 - 30 odczytów, wyznaczając pierścień platynowy co 5 odczytów. Wartości odciętych punktów na rys. 7.1. są średnią arytmetyczną ze wszystkich odczytów. Metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono współczynniki

wielomianu aproksymującego stopnia drugiego /krzywa cechowania/,

$$\sigma = - 7,3497 + 1,0649 n + 0,00266 n^2 \quad 7.2$$

który wykorzystano następnie do obliczania napięcia powierzchniowego badanych roztworów. Pomiary napięcia powierzchniowego roztworów prowadzono tak, jak przy cechowaniu, lecz przy znacznie dłuższych czasach kontaktu pierścienia z cieczą /do kilkunastu minut/, sprawdzając wskazania tensjometru przy użyciu wody destylowanej przed zmianą badanego roztworu na inny, gdyż nie stwierdzono różnic wskazań dla wody redestylowanej i destylowanej.

W czasie pomiarów napięcia powierzchniowego tensjometrem nie było możliwości termostatowania roztworu, więc uzyskane wyniki należało sprowadzić do stałej temperatury /np. 20 °C/. Wykorzystano w tym celu równanie /2.38/, zakładając, że zależność współczynnika temperaturowego $d\sigma/dt$ od stężenia ma charakter liniowy:

$$\sigma_t = \sigma_{20} + (t-20) \left[\left(\frac{d\sigma}{dt} \right)_{c=0} + c \frac{d \left(\frac{d\sigma}{dt} \right)}{dc} \right] \quad 7.3$$

Dla czystej wody $(d\sigma/dt)_{c=0} = - 0,16 \text{ mN/m deg}$, natomiast dla polioksyetylenowanych nonylofenoli, w pobliżu CMC $\leq 0,1 \text{ kg/m}^3$ oszacować można, że $(d\sigma/dt)_{c=CMC} = - 0,04 \text{ mN/m deg}$ [5,267], z czego wynika, że $d(d\sigma/dt)/dc = 1,2 \text{ mN/m deg / kg/m}^3$.

Równanie /7.3/ przybierze więc postać:

$$\sigma_t = \sigma_{20} - (t-20) (0,16 - 1,2 c_m) \quad 7.3a$$

Wyniki pomiarów napięcia powierzchniowego wodnych roztworów Rokanolu N8, sprowadzone do temperatury 20 °C zestawione

są na rys. 7.2, przy czym należy podkreślić, że najbardziej zbliżone do danych cytowanych przez Schicka[267] /dotyczących polioksyetylenowanych alkilofenoli i alkoholi/ są wyniki uzyskane przy pomocy tensjometru. Uznano, że reprezentują one statyczne napięcie powierzchniowe i dalsze pomiary związane z roztworami Rokanolu L10 prowadzono tylko przy pomocy tensjometru.

Aktywność powierzchniową Rokafenolu N8 i Rokanolu L10 obliczono za pomocą równania /2.22/, aproksymując w tym celu punkty doświadczalne w zakresie $C_m < 0,02 \text{ kg/m}^3$ wielomianem stopnia trzeciego / $\sigma = \sum_{i=0}^3 A_i C_M^i$ / i otrzymano:

$$\bar{G}_s \text{ /Rokafenol N8/} = - A_1 = 1,915 \text{ Nm}^2/\text{kmol}$$

$$\bar{G}_s \text{ /Rokanol L10/} = - A_1 = 2,842 \text{ Nm}^2/\text{kmol}$$

W celu wyznaczenia nadmiaru powierzchniowego Γ aproksymowano zależność $\sigma = \sigma / \lg C_M$ wielomianem potęgowym /tab. 7.1/ w przedziale $\lg C_M = -7 \div -3$, a następnie wykorzystano równanie Gibbsa /2.19/. Izotermy napięcia i nadmiaru /stężenia/ powierzchniowego przedstawione są na rys. 7.3 i 7.4. Wyznaczony na ich podstawie obszar krytycznego stężenia micelnego /CMC/ obejmuje wartości obliczone za pomocą równań empirycznych podanych przez Schicka [267] :

a/ dla oksyetylenowanego nonylofenolu:

$$\ln (\text{CMC} [\text{mol/dm}^3]) = 3,87 + 0,056 n_{EO} \quad 7.4$$

$$n_{EO} = 8 \Rightarrow \text{CMC} = 0,043 \text{ kg/m}^3,$$

$$\ln (\text{CMC} [\text{mol/dm}^3]) = 3,49 + 0,065 n_{EO} \quad 7.5$$

$$n_{EO} = 8 \Rightarrow \text{CMC} = 0,055 \text{ kg/m}^3,$$

Tabela 7.1. Współczynniki A_i aproksymującego wielomianu potęgowego $\sigma = \sum_i A_i (\lg c_M)^i$ [mN/m]

i	A_i	
	Rokafenol N8	Rokanol L10
0	- 1333,78496	- 13916,92958
1	- 1912,48676	- 20233,95067
2	- 1070,42260	- 12314,03355
3	- 305,51101	- 4078,55554
4	- 46,90531	- 795,19298
5	- 3,69822	- 91,45699
6	- 0,11778	- 5,75614
7	0,0	- 0,15317

b/ dla oksyetylenowanego dodekanolu:

$$\ln (\text{CMC} [\text{g}/0,1 \text{ dm}^3]) = 3,60 + 0,048 n_{\text{EO}} \quad 7.6$$

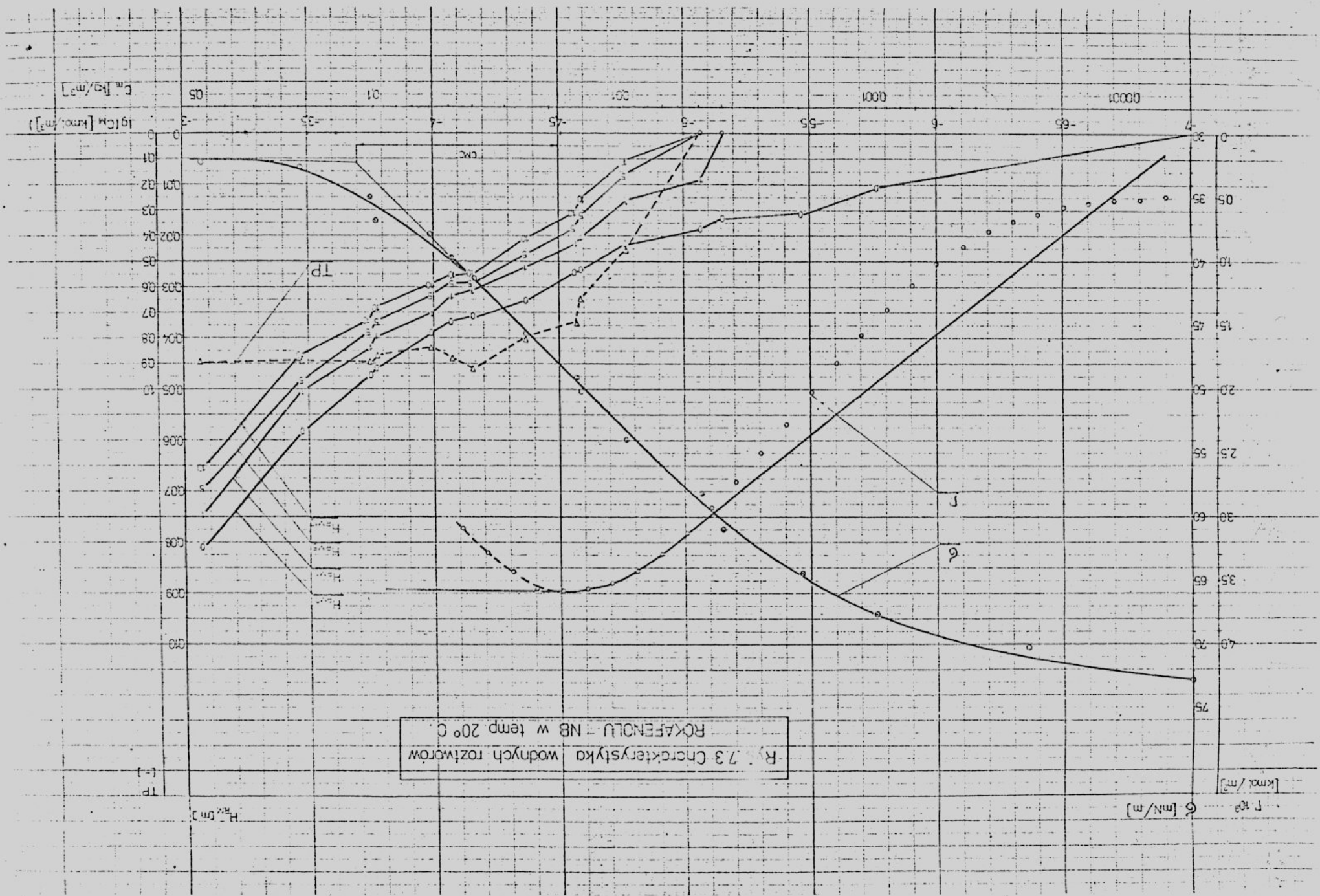
$$n_{\text{EO}} = 10 \Rightarrow \text{CMC} = 0,059 \text{ kg}/\text{m}^3$$

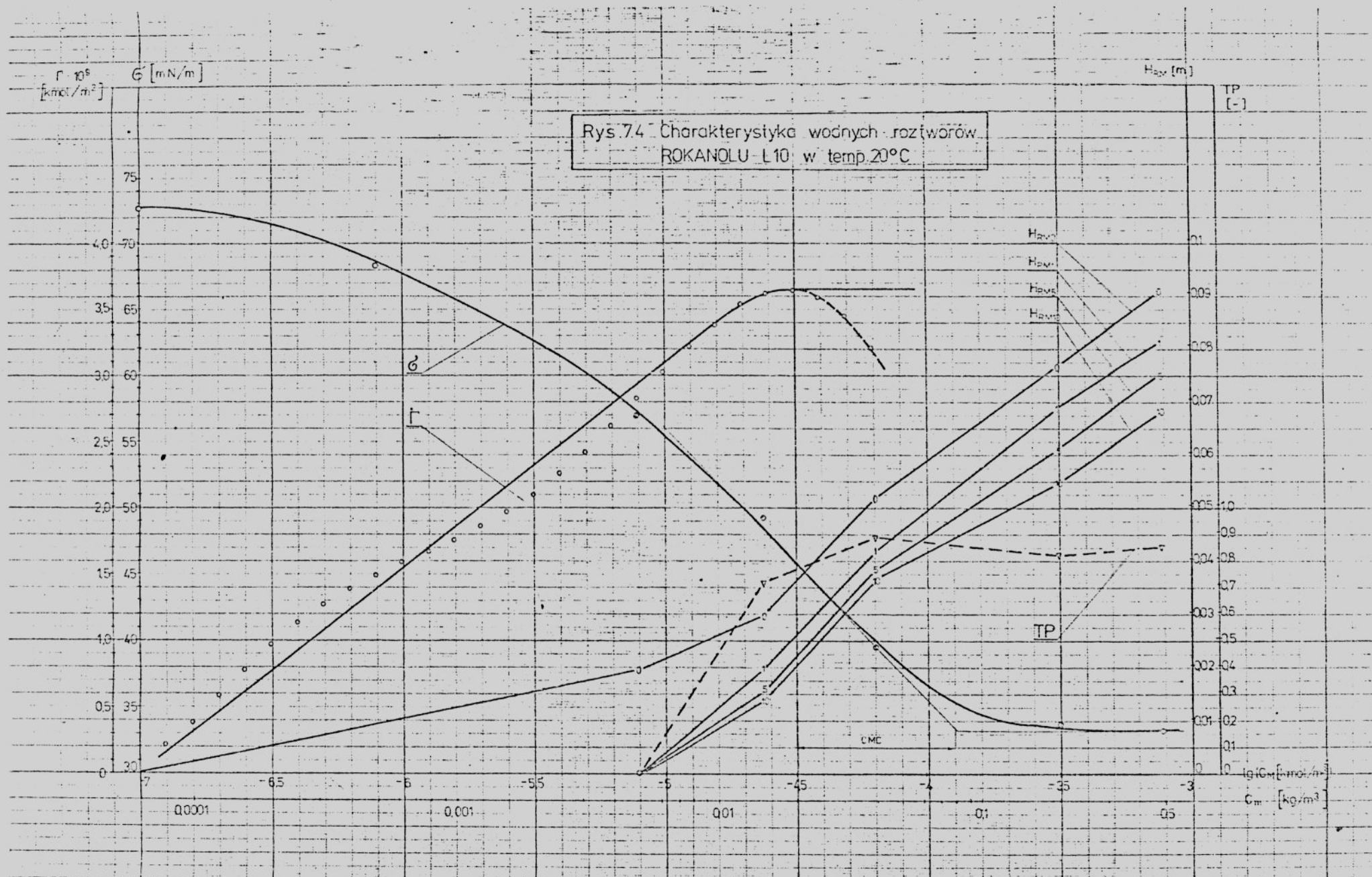
Po obliczeniu ciśnienia powierzchniowego i pola powierzchni, przypadającej na jedną cząsteczkę /równania /2.9/ i /2.29// sporządzono wykres $\Pi - A_1$ /rys. 7.5/, na podstawie którego można wnioskować, że stan filmów adsorpcyjnych Rokafenolu N8 i Rokanolu L10 odpowiada stanowi dwuwymiarowego gazu rzeczywistego. Pole powierzchni przypadające na jedną cząsteczkę w nasyconej warstwie adsorpcyjnej / $\Gamma = \Gamma_{\text{max}}$ / wynoszą:

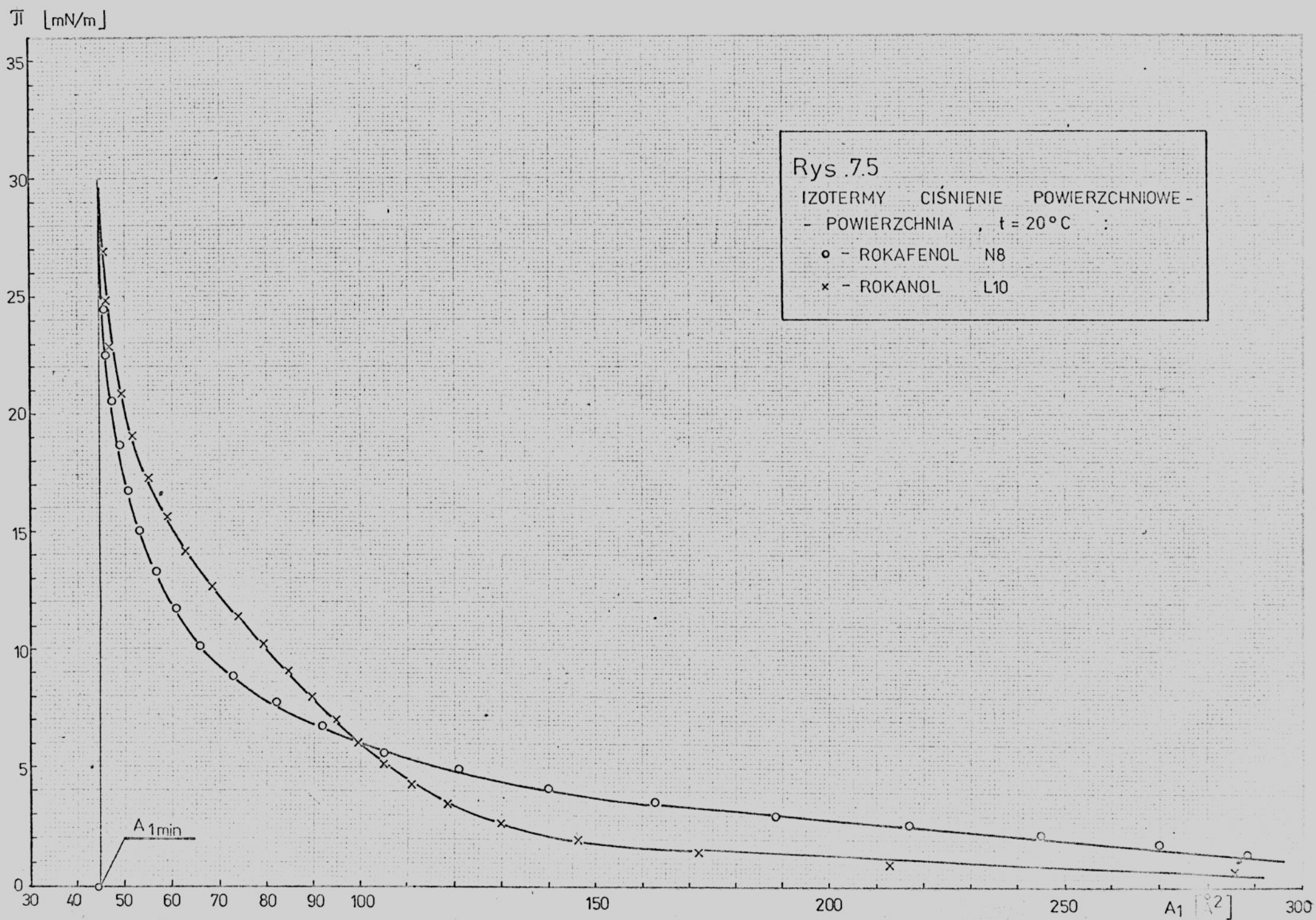
$$\text{- Rokafenol N8} \quad - \quad A_{1\text{min}} = 46,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \quad /46,5 \text{ \AA}^2/$$

$$\text{- Rokanol L10} \quad - \quad A_{1\text{min}} = 45,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \quad /45,5 \text{ \AA}^2/$$

co jest częściowo zgodne z danymi literaturowymi [267]. Schick podaje, że dla polioksyetylenowanych nanylofenoli $A_{1\text{min}} n_{\text{EO}}^{-0,5} = 17 - 18,5$, a dla Rokafenolu N8 otrzymano wartość 16,5. Dla ho-







$H_{RM} [m]$

0,20

WŁASNOŚCI PIANOTWÓRCZE WODNYCH ROZTWORÓW
ROKAFENOLU N8 OKREŚLANE MET. ROSS-MILES
WG PN-66/C-04081

- $-H_{RM0}, t=20^{\circ}C$
- $-H_{RM1}, t=20^{\circ}C$
- x $-H_{RM10}, t=20^{\circ}C$
- △ $-H_{RM0}, t=20^{\circ}C$, wg raportu R-70/71
- 1 $-H_{RM1}, t=20^{\circ}C$, wg raportu R-84/74
- wartości ekstrapolowane

0,15

0,10

0,05

0

-6

0,001

0,01

0,1

1,0

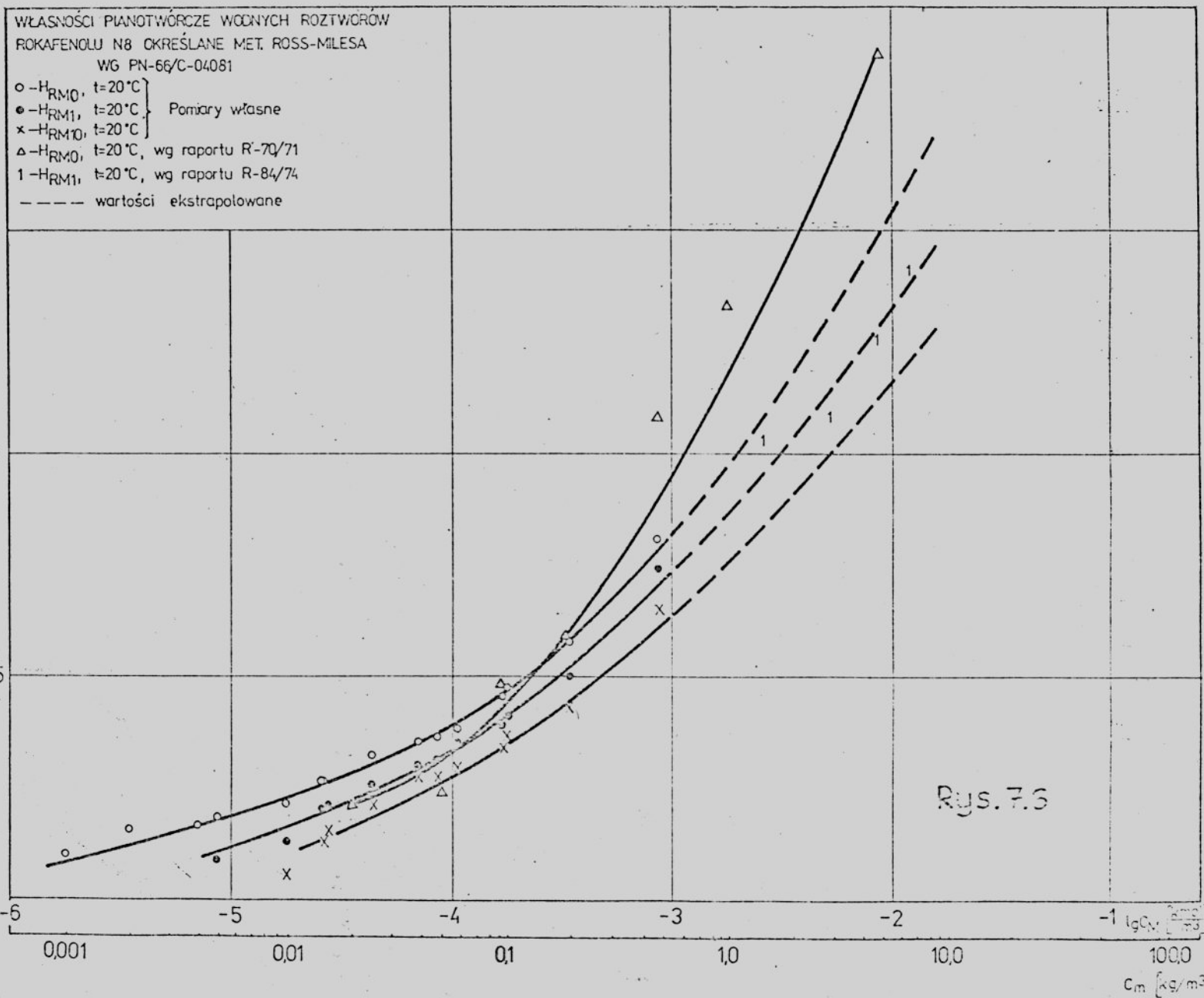
10,0

100,0

$c_m [kg/m^3]$

$-1 \lg C_m$

Rys. 7.6



mogenicznych oksyetylenowanych dodekanoli wartość iloczynu obliczonego z równania /2.36/ powinna wynosić 24 - 25, a dla Rokanolu L10 otrzymano 14,5. Przyczyną tej rozbieżności może być heterogeniczność Rokanolu L10.

7.1.2. Własności pianotwórcze

Do oznaczenia własności pianotwórczych roztworów przyjęto metodę Ross-Milesa, ujętą w Polskiej Normie [218]. Przyrząd Ross-Milesa przedstawiony jest na rys. 2.15 /rozdział 2.6/. Norma przewiduje, że miarą zdolności pianotwórczej jest wysokość słupa piany, mierzonego po upływie 1 minuty od chwili jej wytworzenia. Wydaje się, że tak określona zdolność pianotwórcza zależy również od trwałości piany, gdyż zawiera w sobie czynnik czasu. Proponuje się zatem, aby wielkość tę określała wysokość piany odczytana w chwili zakończenia wypływu badanego roztworu z rurki 7 /rys. 2.15/:

$$ZP = H_{RM0} \quad 7.7$$

Trwałość piany określa wg PN następujący iloraz:

$$TP = H_{RM10}/H_{RM1} \quad 7.8$$

Wyniki pomiarów własności pianotwórczych roztworów Rokafenolu N8 i Rokanolu L10 przedstawione są na rys. 7.3, 7.4 i 7.6 /każdy punkt na wykresach jest średnią arytmetyczną z co najmniej trzech niezależnych pomiarów/. Gdy piana nie pokrywała całego zwierciadła cieczy, przyjmowano, że $H_{RM\tau} = 0$. Rokanol L10, mający wyższą aktywność powierzchniową, posiada również lepsze własności pianotwórcze. W przebadanym zakresie zdolność pianotwórcza cały czas wzrasta ze zwiększaniem stężenia, natomiast trwałość

piany ustala się już w obszarze CMC.

Wzrost temperatury roztworu początkowo zwiększa zdolność pianotwórczą, co w zakresie 15 - 40 °C można przybliżyć zależnością H_{RM} w mm/:

$$H_{RMt} = H_{RM20^{\circ}C} + 0,5 (t-20) \quad 7.9$$

Powyżej 50 °C zdolność pianotwórcza szybko maleje [141, 142].

7.2. Aparatura pomiarowa

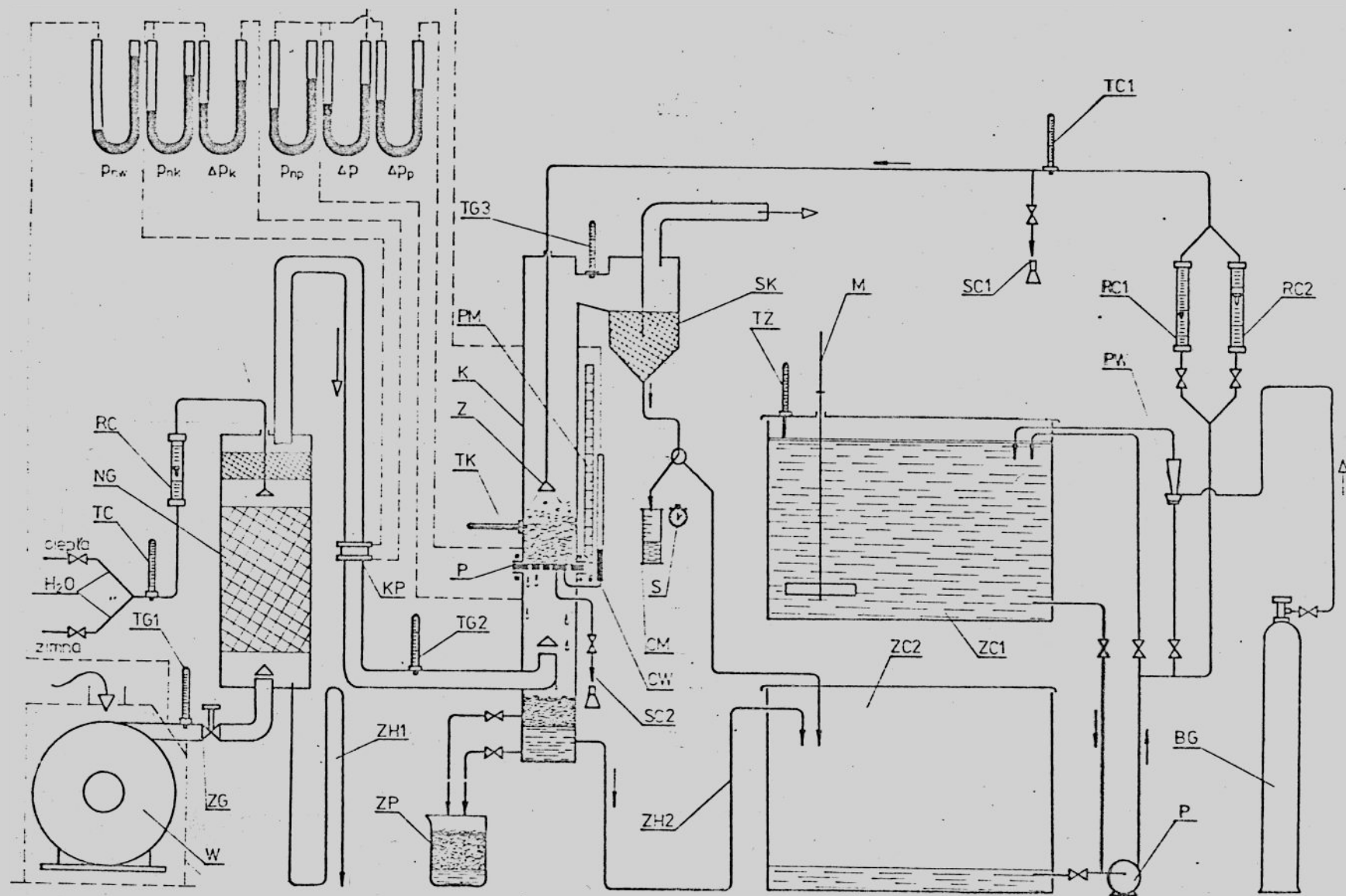
Badania nad wpływem środków powierzchniowo-czynnych na hydrodynamikę i wymianę masy na bezprzelewowych półkach sitowych prowadzono w instalacji doświadczalnej przedstawionej na rys. 7.7 /kolumna jednopółkowa/ i 7.8 /kolumna dwupółkowa/.

7.2.1. Opis instalacji doświadczalnej

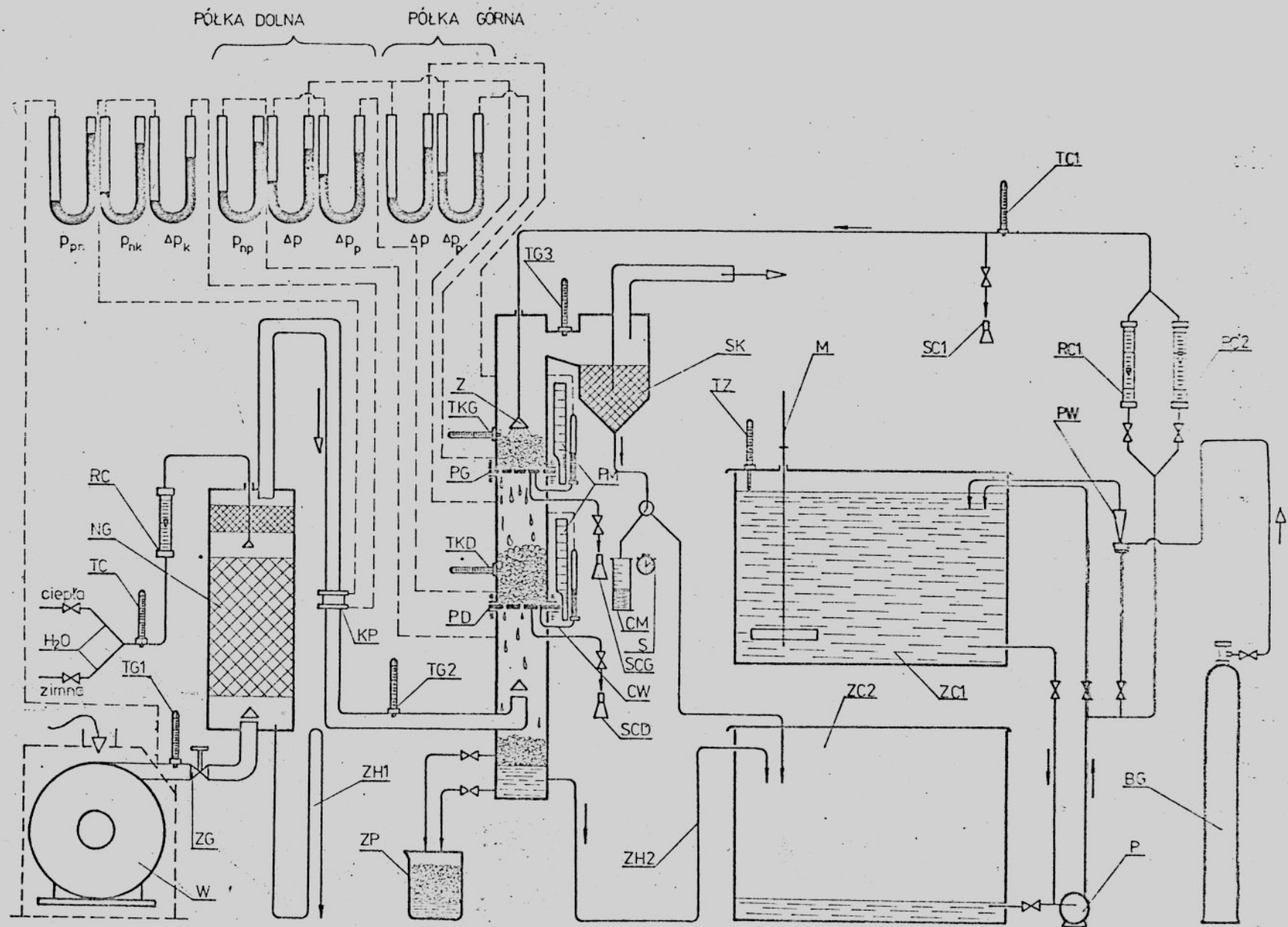
Głównym elementem aparatury doświadczalnej jest kolumna K o przekroju kwadratowym 150 x 150, wykonana ze szkła organicznego, zaopatrzona w wymienną półkę P. Czynna wysokość kolumny wynosiła 1000 mm.

Powietrze tłoczone przez wentylator W przepływało przez nawilżacz NG /rura szklana ϕ 300 mm, H = 1000 mm, wypełniona pierścieniami Bialeckiego ϕ 50 mm/, podwójną kryzą pomiarową KP do kolumny, skąd po przejściu przez separator kropel SK /cylinder ϕ 250 mm wypełniony pierścieniami Bialeckiego ϕ 25 mm, z przegrodą zmieniającą kierunek przepływu gazu/ odprowadzane było na zewnątrz pomieszczenia.

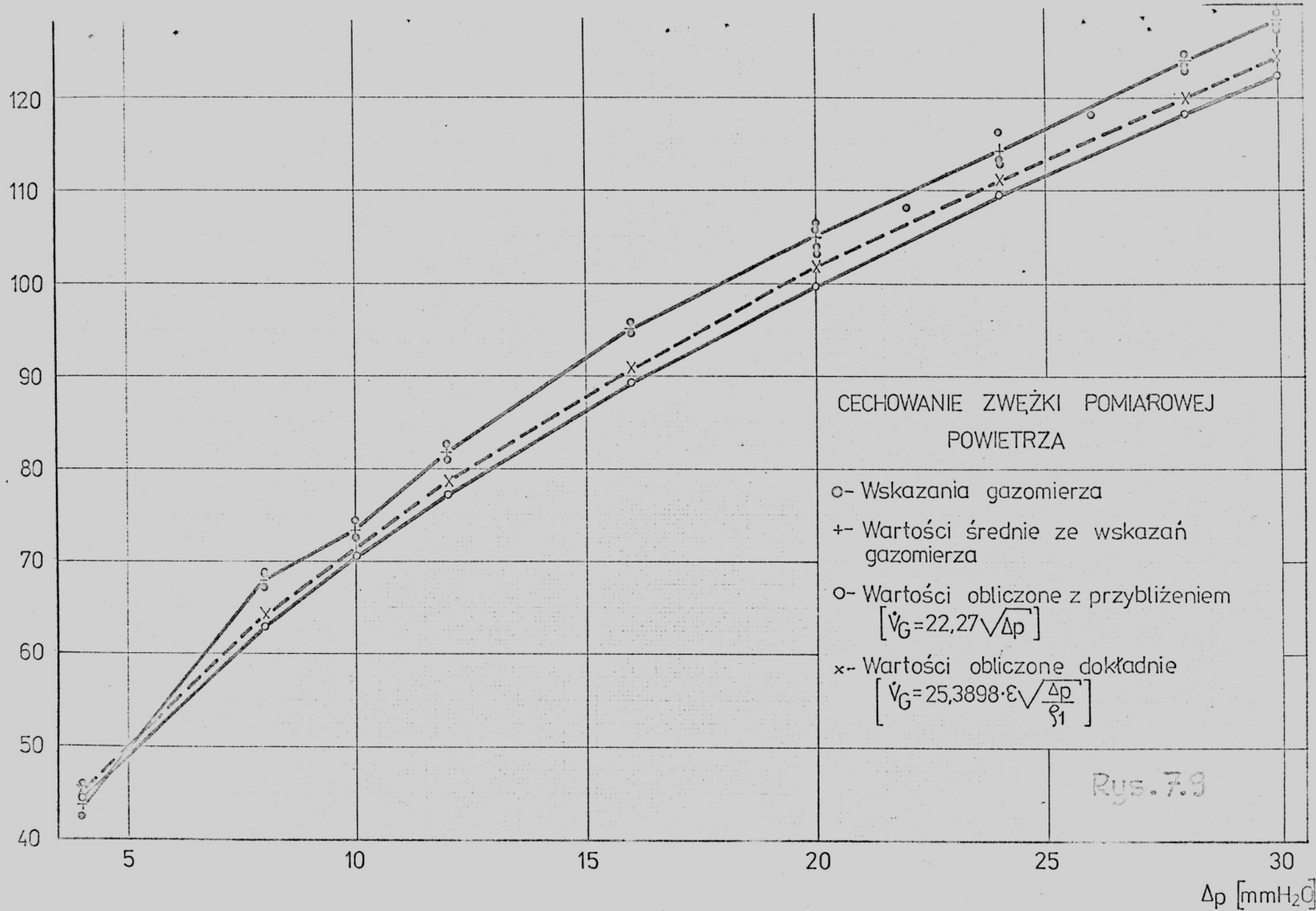
Ciecz ze zbiornika ZC1 lub ZC2 /każdy o pojemności ok. 0,5 m³/ doprowadzana była do kolumny za pomocą pompy P przez układ dwóch rotametrów RC1 i RC 2 i zraszacz Z wykonany w posta-

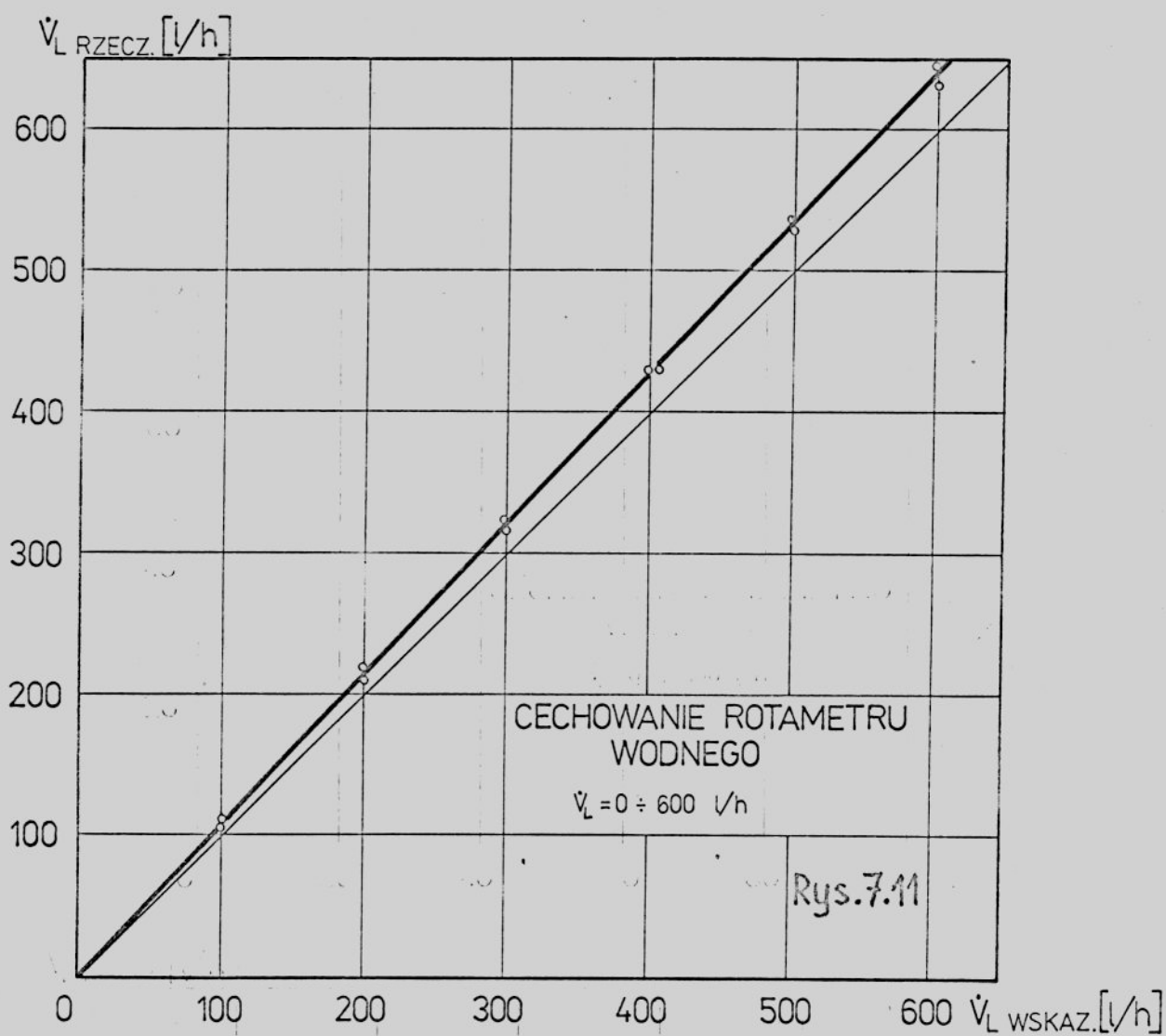
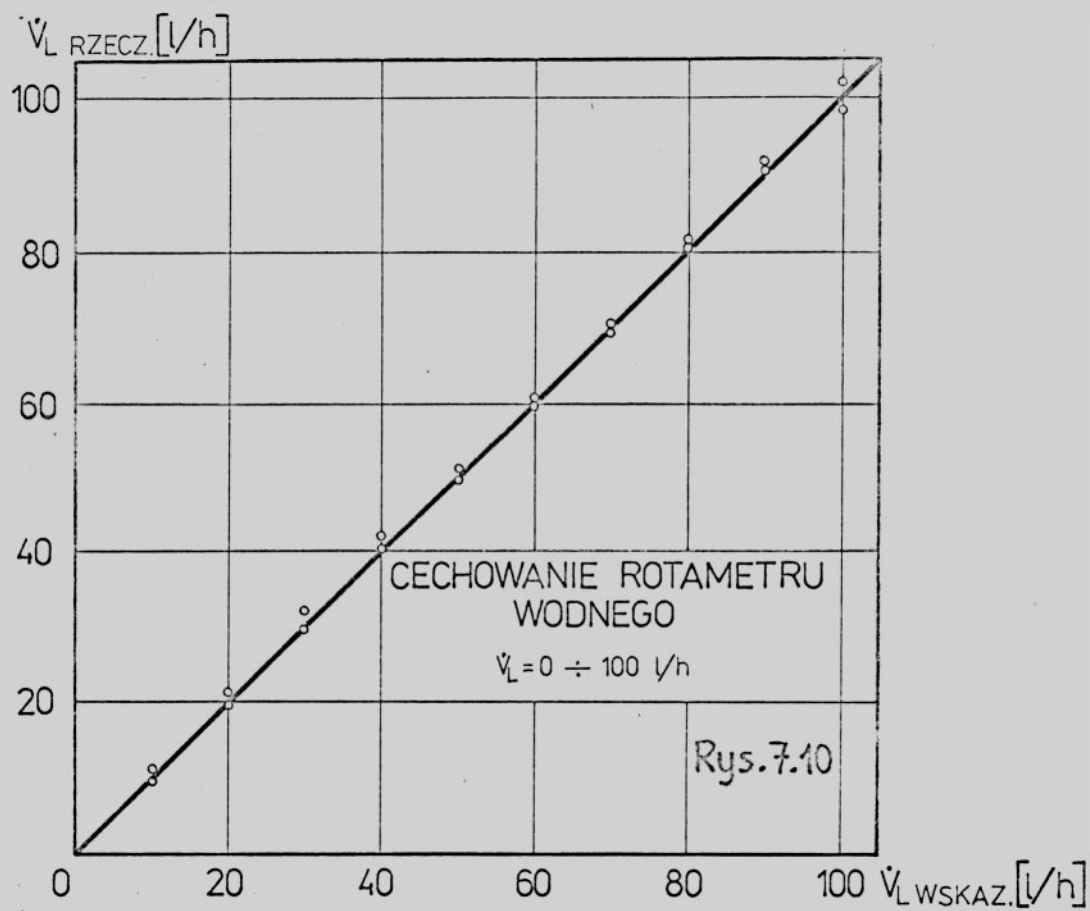


Rys. 77 · Schemat instalacji doświadczalnej z kolumną jednopółkową



Rys. 7.8 Schemat instalacji doświadczalnej z kolumną dwupółkową.





ci sita, które można było umieścić w dowolnej odległości od półki. Spływająca przez otwory półki ciecz odprowadzana była przez zamknięcie hydrauliczne ZH2 do zbiornika ZC2, a nadmiar powstającej piany - do zbiornika ZP.

7.2.2. Pomiar natężenia przepływu gazu

Natężenie przepływu powietrza mierzono za pomocą kryzy podwójnej ISA /KP/, zaprojektowanej i zamontowanej zgodnie z wy-
maganiem Polskiej Normy [220].

Dane dotyczące kryzy:

- średnica rurociągu $D = 68 \text{ mm}$,
- liczba przepływu $\alpha = 0,77$
- moduł kryzy wstępnej $m' = 0,94 \text{ /d' = 65,93 mm/}$,
- moduł kryzy podstawowej $m = 0,57 \text{ /d = 51,34 mm/}$.

Przed przystąpieniem do pomiarów kryzę cechowano /rys. 7.9/ przy pomocy atestowanego gazomierza o zakresie pomiarowym $\dot{V}_G \leq 125 \text{ m}^3/\text{h}$. Stwierdzono, że obliczone wartości natężenia przepływu gazu są niższe od wskazanych o średnio 3,27 %. Przy założeniu, że odchyłka ta nie zmienia się w całym zakresie po-
miarowym kryzy $\dot{V}_G = 20 - 380 \text{ m}^3/\text{h}$, uwzględniono ją w stałej kryzy i natężenie przepływu powietrza przez kryzę obliczano z zależ-
ności:

$$\dot{V}_{Gk} = 26,21935 \varepsilon \sqrt{\Delta p_k / \rho_{Gk}} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad 7.10$$

gdzie ε - liczba ekspansji, obliczana wg PN [220], Δp_k - mierni-
czy spadek ciśnienia gazu na kryzie $[\text{mm H}_2\text{O}]$, ρ_{Gk} - gęstość
powietrza nasyconego parą wodną w warunkach panujących w ru-
rociągu przed kryzą kg/m^3 . Następnie natężenie przepływu gazu
przeliczano na warunki panujące w kolumnie.

7.2.3. Pomiar natężenia przepływu cieczy

Objętościowe natężenie przepływu wody i wodnych roztworów Rokafenolu N8 i Rokanolu L10 mierzono za pomocą dwóch równolegle połączonych rotametrów /RC1 i RC2/, uprzednio wycechowanych /rys. 7.10 i 7.11/. Rotametr RC wskazywał natężenie przepływu wody przez nawilżacz powietrza.

7.2.4. Pomiar ciśnienia gazu

Nadciśnienie gazu przed kryzą - p_{nk} , mierniczy spadek ciśnienia na kryzie - Δp_k , nadciśnienie powietrza w kolumnie pod półką - p_{np} oraz spadki ciśnienia gazu w kolumnie - Δp i na samej półce - Δp_p mierzono przy pomocy szklanych U-rurek wypełnionych zabarwioną wodą, umieszczonych na tle podziałki milimetrowej. W trzech ostatnich przypadkach przewody impulsowe zabezpieczone były przed zalaniem.

Ciśnienie otoczenia mierzono barometrem rtęciowym.

7.2.5. Pomiar wysokości warstwy piany i czystej cieczy

Wysokość piany w kolumnie $/H_p/$ i równoważną jej wysokość czystej cieczy $/h_o/$ określano wizualnie przy pomocy podziałki milimetrowej PM. Dla uniknięcia wahań poziomu cieczy w cieczo-wskazie CW, na rurkę łączącą go z półką nałożono zaciskacz. Punkt pomiarowy h_o umieszczony był w połowie odległości między środkiem półki i ścianą kolumny.

7.2.6. Pomiar i regulacja temperatury

Podczas eksperymentów dostosowywano temperaturę gazu do temperatury cieczy, co odbywało się przez regulację temperatury wody TC doprowadzanej do nawilżacza. Temperatury cieczy wlot-

wej - TC1, gazu wlotowego - TG2, wylotowego - TG3 oraz mieszaniny dwufazowej w kolumnie - TK wskazywały termometry rtęciowe z dokładnością do 0,1 °C.

7.2.7. Pomiar ilości porywanej cieczy

Dla określenia szybkości porywania mierzono stoperem S czas napełniania cylindra miarowego CM cieczą wypływającą z odkraplacza SK. Ponieważ w rurociągu wylotowym powietrza nie stwierdzono obecności cieczy, więc uznano, że separator kropel działa ze sprawnością praktycznie równą 100 %.

7.2.8. Pomiary stężenia

Opór wnikania masy w fazie ciekłej badano desorbując dwutlenek węgla z wodnych roztworów za pomocą powietrza. Roztwory sporządzano nasycając ciecz dwutlenkiem węgla z butli BG podczas przepływu ze zbiornika ZC2 do ZC1 przez pompkę wodną PW. Próbkę do określenia stężenia CO₂ w cieczy wlotowej SC1 i wylotowej SC2 pobierane były do kolbek 50 cm³, następnie szczelnie zamykanych i przechowywanych w temperaturze niższej niż temperatura pomiaru. Stężenie CO₂ wyznaczano przez miareczkowanie nadmiaru wodorotlenku baru, do roztworu którego dodawano badaną próbkę, za pomocą 0,1 n roztworu HCl wobec fenoloftaleiny:

$$C_{AL} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{Ba} n_{Ba} - V_{HCl} n_{HCl}}{V_{pr}} \right) [\text{kmol/m}^3] \quad 7.11$$

gdzie: V_{Ba} - objętość roztworu Ba(OH)₂ n_{Ba} - normalnego / V_{Ba} = 10 lub 15 cm³, n_{Ba} = 0,1/, V_{HCl} - objętość roztworu HCl n_{HCl} - normalnego / n_{HCl} = 0,1/, V_{pr} - objętość próbki / V_{pr} = 20 lub 25 cm³/.

Stężenie CO_2 na wylocie gazu z kolumny obliczano z bilansu zakładając, że powietrze wlotowe zawiera 0,03 % obj. dwutlenku węgla.

Opór wnikania w fazie gazowej wyznaczano na podstawie badań desorpcji amoniaku z roztworów za pomocą powietrza. Roztwory amoniaku sporządzano przy użyciu wody amoniakalnej lub amoniaku gazowego pobieranego z butli BG. Stężenie w cieczy mierzono miareczkując próbki 0,1 n roztworem kwasu siarkowego wobec czerwieni metylowej:

$$C_{AL} = \frac{V_{\text{H}_2\text{SO}_4} \cdot n_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{V_{pr}} \quad [\text{kmol/m}^3] \quad 7.12$$

gdzie: $V_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ - objętość roztworu H_2SO_4 $n_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ - normalnego / $n_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 0,1/$, V_{pr} - objętość próbki / $V_{pr} = 10 \text{ cm}^3/$.

Do poboru próbek cieczy przystępowano po upływie 10 - 15 min. od ustalenia się temperatur i warunków hydrodynamicznych w kolumnie. Powtarzalność wyników sprawdzano przez kilkakrotny pobór próbek w ciągu jednego pomiaru lub przez wyrzykowe powtarzanie całego pomiaru.

7.2.9. Obliczanie stałych równowagowych i własności fizykochemicznych faz

Wartości stałej równowagowej dla układu $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ przyjęto według danych cytowanych przez Ramma [239]. Dla celów obliczeniowych zależność stałej K_{px} [bar] od temperatury t [$^{\circ}\text{C}$] aproksymowano wielomianem stopnia drugiego:

$$K_{px} = 730,03047 + 29,68416 t + 0,28962 t^2 \quad 7.13$$

Dla układu $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ stałą równowagi K_{pc} [$\text{m}^3\text{bar/kmol}$] obliczano z empirycznej zależności [Kowalke, wg [239]] ważnej w zakre-

się $C_{AL} < 3 \text{ kmol/m}^3$:

$$\lg K_{pc} = 4,705 - 1922 / (t + 273,15) \quad 7.14$$

Lepkość dynamiczną powietrza wilgotnego μ_G obliczano ze wzoru Herninga - Zipperera przy użyciu lepkości dynamicznych powietrza suchego i pary wodnej określonych wg zależności Sutherlanda.

Zależność lepkości dynamicznej wody μ_L [m N s/m^2] od temperatury t [$^{\circ}\text{C}$] aproksymowano wielomianem stopnia drugiego:

$$\mu_L = 1,70727 - 0,04505t + 0,000496 t^2 \quad 7.15$$

Gęstość powietrza wilgotnego obliczano jako sumę gęstości powietrza suchego i pary wodnej, wykorzystując znalezione w tym celu zależności gęstości pary i ciśnienia pary nasyconej od temperatury:

$$\rho_p = 0,0063164 + 0,00007332t + 0,000023825 t^2 \quad [\text{kg/m}^3] \quad 7.16$$

$$p_{nas} = 6,977968 - 0,068194t + 0,029799 t^2 \quad [\text{mm Hg}] \quad 7.17$$

Dla obliczenia gęstości wody opracowano zależność:

$$\rho_{H_2O} = 1000,1392 + 0,011225t - 0,005431t^2 \quad [\text{kg/m}^3] \quad 7.18$$

Napięcie powierzchniowe czystej wody obliczano z liniowej zależności od temperatury:

$$\sigma_{H_2O} = 75,7743 - 0,1532 t \quad [\text{mN/m}] \quad 7.19$$

Wartości współczynników dyfuzji dwutlenku węgla i amoniaku w wodzie i powietrzu przyjęto wg danych Hoblera[439]:

$$D_{CO_2-H_2O} = 1,77 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad /20^{\circ}\text{C/}$$

$$D_{\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}} = 1,76 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad /20^\circ\text{C}/$$

$$D_{\text{CO}_2-\text{pow.}} = 0,138 \text{ cm}^2/\text{s} \quad /0^\circ\text{C}/$$

$$D_{\text{NH}_3-\text{pow.}} = 0,198 \text{ cm}^2/\text{s} \quad /0^\circ\text{C}/$$

Wpływ temperatury na wartości współczynników dyfuzji uwzględniono za pomocą równań [439] :

$$D_{\text{AGt}} = D_{\text{AGt}_0} \left(\frac{t + 273,15}{t_0 + 273,15} \right)^{1,5} \quad 7.20$$

$$D_{\text{ALt}} = D_{\text{ALt}_0} \left(\frac{t + 273,15}{t_0 + 273,15} \right) \left(\frac{\mu_{\text{Lt}_0}}{\mu_{\text{Lt}}} \right) \quad 7.21$$

Przyjęto, że gęstość, lepkość oraz współczynniki dyfuzji w wodnych roztworach Rokafenolu N8 i Rokanolu L10 są takie same jak dla wody.

7.3. Zakres przebadanych zmiennych

Całą część eksperymentalną podzielić można na trzy etapy:

- 1^o - badania hydrodynamiki,
- 2^o - badania kinetyki wnikania masy w fazie ciekłej,
- 3^o - badania kinetyki wnikania masy w fazie gazowej.

Na każdym z etapów eksperymenty prowadzono według następującego schematu:

- stężenie środka powierzchniowo-czynnego zmieniano od zera /czysta woda/ do wartości odpowiadającej $\zeta = \zeta_{\text{min}}$,
- dla każdego stężenia kilkakrotnie zmieniano parametry geometryczne półki,
- dla każdego wariantu półki zmieniano prędkość gazu na średnio 4 poziomach,

- dla każdej prędkości gazu w kolumnie kilkakrotnie /3 - 7 razy/ zmieniano gęstość zraszania półki.

W sumie przeprowadzono:

- 1° - 247 pomiarów związanych tylko z hydrodynamiką kolumny, w tym 192 na układzie powietrze - woda destylowana, i 55 na układzie powietrze - wodne roztwory Rokafenolu N8 w zakresie stężeń $0,5 - 2 \text{ kg/m}^3 > \text{CMC}$.
- 2° - 255 pomiarów desorpcji CO_2 , w tym 100 na układzie powietrze - CO_2 - woda destylowana i 155 na układzie powietrze - CO_2 - wodne roztwory Rokafenolu N8 w zakresie stężeń $0,005 - 0,1 \text{ kg/m}^3 \leq \text{CMC}$.

Dodatkowo wykonano 25 pomiarów w kolumnie dwupółkowej /6 na układzie powietrze - CO_2 - woda destylowana i 19 na układzie powietrze - CO_2 - wodne roztwory Rokanolu L10 w zakresie stężeń $0,005 - 0,04 \text{ kg/m}^3 \leq \text{CMC}$.

- 3° - 510 pomiarów desorpcji NH_3 , w tym 75 na układzie powietrze - NH_3 - woda destylowana i 435 na układzie powietrze - NH_3 - wodne roztwory Rokafenolu N8 w zakresie stężeń $0,001 - 0,1 \text{ kg/m}^3 \leq \text{CMC}$.

W czasie badań wymiany masy rejestrowano również wszystkie parametry hydrodynamiczne, więc w sumie badania hydrodynamiki objęły 1037 pomiarów.

W tabeli 7.2 przedstawione są parametry geometryczne badanych półek i zakres ich zastosowania w poszczególnych etapach eksperymentów.

Prędkość gazu, liczoną na przekrój kolumny zmieniano w zakresie $w_G = 1 - 4 \text{ m/s}$, natomiast obciążenie cieczą, liczone na tę samą powierzchnię - $L_m = 0,25 - 6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ /tylko w pierwszym

Tabela 7.2. Parametry geometryczne półek sitowych

Nr	Sr.otw. d_o mm	Podz. t_o mm	Pow.swob. r_A -	Grub. δ_p mm	t_o/d_o -	Uwagi
1	6,0	15,0	0,131	4,0	2,500	ETAP 1 ^o
2	8,0	18,75	0,150	4,0	2,344	ETAP 1 ^o , 2 ^o , 3 ^o
3	5,0	10,0	0,214	4,0	2,000	ETAP 1 ^o , 2 ^o , 3 ^o
4	9,0	15,0	0,291	4,0	1,667	ETAP 2 ^o , Kolumna dwu- półkowa
5	6,0	10,0	0,308	4,0	1,667	ETAP 1 ^o , 2 ^o , 3 ^o
6	9,0	12,5	0,416	4,0	1,389	ETAP 1 ^o , 2 ^o , 3 ^o
7	7,0	10,0	0,419	4,0	1,429	ETAP 1 ^o
8	8,0	10,0	0,547	4,0	1,250	ETAP 1 ^o

etapie $L_m = 0,05 - 3,45 \text{ kg/m}^2\text{s/}$.

7.4. Obliczanie wyników pomiarów

7.4.1. Obliczenia hydrodynamiczne

Podczas opracowywania wstępnego wyników pomiarów hydrodynamicznych poszczególne wielkości obliczano z następujących wzorów:

- stopień zatrzymania fazy gazowej na półce:

$$\varphi_G = 1 - \frac{h_o}{H_f} \quad 7.22$$

- stopień zatrzymania cieczy:

$$\varphi_L = 1 - \varphi_G \quad 7.23$$

- rzeczywista prędkość gazu w kolumnie:

$$w_{Gk} = \frac{w_G}{\varphi_G} \quad [m/s] \quad 7.24$$

- rzeczywista prędkość cieczy w kolumnie:

$$w_{Lk} = \frac{w_L}{\varphi_L} \quad [m/s] \quad 7.25$$

- opór przepływu gazu przez warstwę piany:

$$\Delta p_f = \Delta p - (\Delta p_p + \Delta p_g) \quad [N/m] \quad 7.26$$

gdzie: Δp_p - opór przepływu gazu przez otwory półki /zmierzony dla każdej półki/, Δp_g - obliczane wg równania:

$$\Delta p_g = \frac{4\zeta}{d_o} \quad 7.27$$

- szybkość porywania cieczy:

$$e_m = \frac{v_{Le} \rho_L}{\tau_e} \quad 7.28$$

7.4.2. Obliczenia wymiany masy

Dla warunków hydrodynamicznych panujących w kolumnie z bezprzelewową półką sitową przyjęto model przepływu tłokowego gazu i pełnego przemieszania w cieczy [3 , 139 , 156 , 163 , 239 , 293]. Założono również, że w zakresie małych stężeń, jakie tu występują, linia równowagi jest prostą, a stała równowagi zależy tylko od temperatury zależności /7.13, 7.14/.

W obliczeniach stosowano koncentracje składnika A wyrażone w $[kmol A/m^3]$, co dawało praktycznie takie same wyniki, jakie otrzymywano przy użyciu stosunków molowych $[kmol A/kmol inerty]$, właściwych dla wnikanania jednego składnika przez inerty.

Przy obliczaniu wyników desorpcji dwutlenku węgla zakłada-
no brak oporu wnikańia w fazie gazowej. Liczbę jednostek wnika-
nia w fazie ciekłej obliczano z zależności /5.15/ i /5.16/:

$$N_L = \frac{C_{Lp} - C_{Lk}}{C_{Lk} - C_L^*} \quad 5.15$$

$$C_L^* = C_{Gk} / K_c \quad 5.16$$

gdzie indeksy p i k oznaczają wartości początkowe /wlotowe/
i końcowe /wylotowe/.

Współczynnik wnikańia odniesiony do jednostki powierzchni
półki wyznaczano z równania /5.14/

$$k_L a_p = N_L w_L \quad [m/s] \quad 5.14$$

Znajomość wysokości warstwy piany pozwala obliczyć objętoś-
ciowy współczynnik wnikańia masy:

$$k_L a_v = \frac{k_L a_p}{H_f} \quad [1/s] \quad 7.29$$

Na podstawie pomiarów desorpcji amoniaku liczbę jednostek
przenikania /gdyż nie można całkowicie pominąć oporu wnikańia
w fazie ciekłej/ wyznaczano z zależności:

$$N_{OG} = - \ln /1 - E_{OG}/ \quad 7.30$$

gdzie

$$E_{OG} = \frac{C_{Gk} - C_{Gp}}{C_G^* - C_{Gp}} \quad 7.31$$

$$C_G^* = K_C \cdot C_{Lk} \quad 7.32$$

oraz $C_{Gp} = 0$ /stężenie amoniaku w powietrzu wlotowym/.

Uwzględnienie oporu wnikańia w fazie ciekłej /na podstawie

wyników desorpcji CO₂/ pozwala wyznaczyć liczbę jednostek wnikania w fazie gazowej:

$$\frac{1}{N_G} = \frac{1}{N_{OG}} - \frac{(\dot{V}_G/\dot{V}_L) K_c}{N_L} \quad 7.33$$

Współczynniki wnikania masy w fazie gazowej obliczano z zależności analogicznych do /5.14/ i /7.29/:

$$k_G a_p = N_G \cdot w_G \quad 7.34$$

$$k_G a_v = \frac{k_G a_p}{H_f} \quad 7.35$$

Założenie dotyczące pełnego przemieszania w cieczy sprawdzono mierząc stężenia na różnych wysokościach warstwy piany i w różnych punktach półki. Okazało się, że jest spełnione, zarówno w przypadku czystej wody, jak i wodnych roztworów Rokafenolu N8 i Rokanolu L10, tworzących pianę o znacznej trwałości.

8. OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

Ze względu na dużą liczbę zmiennych parametrów wejściowych mających wpływ na wyjściowe wielkości związane z hydrodynamiką i wymianą masy oraz dużą ilość wykonanych pomiarów zdecydowano się na statystyczne opracowanie otrzymanych wyników za pomocą programu XDS2, /analiza regresji wielokrotnej/, który wchodzi w skład oprogramowania maszyny cyfrowej ODRA 1305 [208]. Dla danej macierzy obserwacji $m \times (n+1)$, /m obserwacji i /n+1/ zmiennych/ program ustala, które zmienne wejściowe mają wpływ na zmienną wyjściową /przy zadanym poziomie istotności/ i identyfikuje obiekt arbitralnym modelem:

$$\bar{Y} = \bar{Y} / X_1, X_2, \dots, X_n; A_0, A_1, \dots, A_n / \quad 8.1$$

którego stałe: $A_0, \dots, A_n$ przyjmują takie wartości, aby najłepiej przybliżyć obiekt:

$$Y = Y / X_1, X_2, \dots, X_n; Z_1, Z_2, \dots, Z_p / \quad 8.2$$

gdzie

$X_1, \dots, X_n$ - mierzalne zmienne wejściowe,

$Z_1, \dots, Z_p$ - niemierzalne zakłócenia

Kryterium identyfikacji modelu o postaci liniowej

$$\bar{Y} = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_n X_n \quad 8.3$$

jest minimalizacja sumy kwadratów błędów

$$ESS = \min \sum_{i=1}^m /Y_i - \bar{Y}_i /^2 \quad 8.4$$

z której, po zakończeniu analizy regresji oblicza się błąd resztowy:

$$\sigma_R = \left(ESS // m - n - 1 \right)^{0,5} \quad 8.4A$$

i współczynnik korelacji wielokrotnej:

$$R_m = \left[\frac{\sum_{i=1}^m Y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^m Y_i \right)^2}{m}}{\sum_{i=1}^m Y_i^2} \right]^{0,5} \quad 8.4B$$

Zakłada się przy tym, że obiekt badań metodą analizy regresyjnej spełnia następujące warunki:

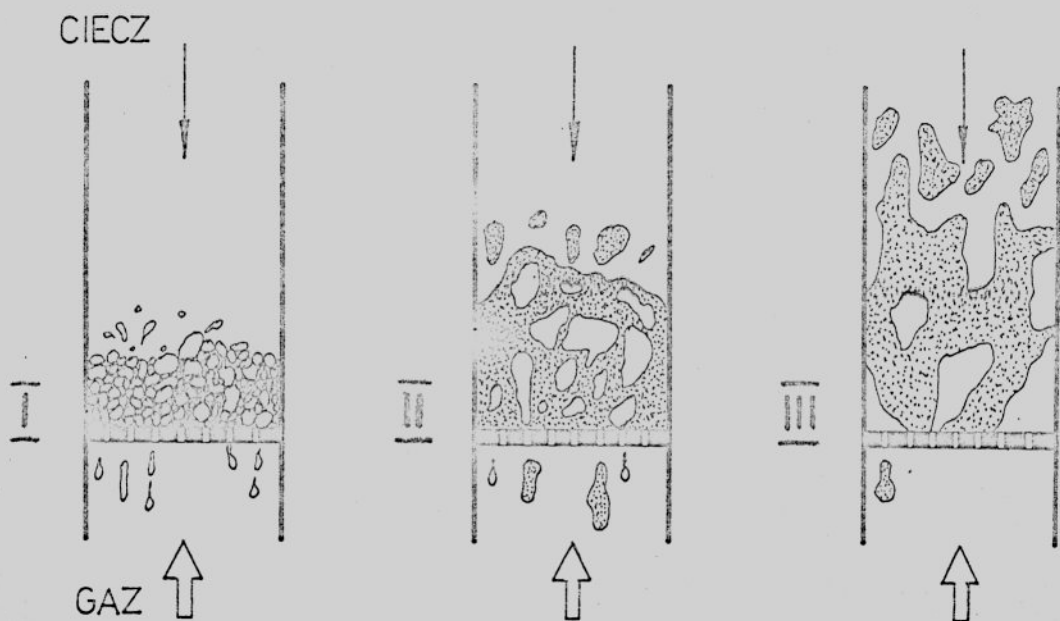
- 1° - funkcja /8.2/ jest niezależna od czasu,
- 2° - rozkłady prawdopodobieństw zmiennych zakłócających są niezależne od czasu,
- 3° - zakłócenia mają zerowe wartości oczekiwane,
- 4° - poszczególne obserwacje są wzajemnie niezależne.

8.1. Hydrodynamika

8.1.1. Obszary pracy pól

Na podstawie badań hydrodynamiki stwierdzono, że w zależności od stężenia środka powierzchniowo-czynnego wyróżnić można trzy główne obszary pracy pól /rys. 8.1/, wyraźnie związane z własnościami pianotwórczymi cieczy.

- Obszar I występuje przy bardzo małych stężeniach środka powierzchniowo-czynnego, które odpowiadają zdolności pianotwórczej roztworu $H_{RMO} = 0,0 - 0,01$ m i zerowej trwałości piany, $TP = 0,0$. Jest to obszar piany dynamicznej, w której proces



Rys. 8.1. Struktura piany na bezprzelewowej półce sitowej w zależności od stężenia środka powierzchniowo-czynnego $/C_I < C_{II} < C_{III}/$.

tworzenia się i pękania pęcherzy jest ciągły. Wzrost stężenia środka powierzchniowo-czynnego sprawia, że wielkość pęcherzy maleje przy równoczesnym niewielkim wzroście wysokości piany i spadku ciśnienia na półce. Część gazu przepływa przez warstwę piany w postaci dużych pęcherzy. W przecieku zaczynają pojawiać się niewielkie ilości piany trwałej, a ciecz porywana jest z półki w postaci drobnych kropelek.

- Obszar II. W miarę dalszego wzrostu stężenia $/TP > 0,0/$ zachodzi coraz silniejsze rozdrabnianie pęcherzy gazu, aż w końcu przestrzeń nad półką wypełnia się bardzo drobnopęcherzykową pianą $/d_b = 1 - 3 \text{ mm}/$, przez którą barbotuje gaz w postaci dużych pęcherzy. Innymi słowy, fazą zwartą nie jest już ciecz, lecz piana. Przecieki przez otwory półki występują w postaci piany, którą należy odprowadzać w sposób ciągły.

aby nie dopuścić do zalania przestrzeni przeciekowej pod półką. Notuje się dalszy wzrost wysokości piany na półce i oporu przepływu gazu. Ciecz porywana jest w postaci drobnych kropelek i płatków piany.

- Obszar III. W zakresie stężeń $C > CMC$ dochodzi do całkowitego zahamowania przecieku przez otwory półki. Porywanie piany staje się tak silne, że wysokość warstwy piany na półce oraz spadek ciśnienia gazu w kolumnie zmniejszają się. Występuje nawet zjawisko odrywania piany od powierzchni półki. Praca w tym obszarze wymaga instalowania urządzenia odpieniającego na wylocie gazu z kolumny, w tym przypadku cyklonu. Powoduje to zwiększenie całkowitego oporu przepływu gazu przez instalację o kilkaset do kilku tysięcy N/m^2 [141,142,302]. Przy większych obciążeniach fazą ciekłą następuje zalanie kolumny.

Rozważając możliwość zastosowania kolumny jako urządzenia odpylająco-absorpcyjnego, pracującego w obszarze III, można stwierdzić, że:

- 1° - zainstalowanie cyklonu na wylocie gazu z kolumny niewątpliwie zwiększy sprawność odpylania, lecz równocześnie spowoduje znaczny wzrost kosztów eksploatacyjnych, gdyż opór przepływu gazu przez cyklon jest kilkakrotnie większy od spadku ciśnienia gazu ciśnienia gazu w samej kolumnie [142],
- 2° - brak przecieku cieczy /lub piany/ przez otwory półki może doprowadzić do osadzania się pyłu pod półką i zatkania otworów [142,221].
- 3° - w zakresie stężeń $C > CMC$ napięcie powierzchniowe cieczy nie zmienia się, więc dalsze zwiększanie stężenia nie po-

lepsza sprawności odpylania związanej ze zwilżalnością pyłu /rozdział 3/.

4^o - obecność cyklonu nie polepsza sprawności wymiany masy, gdyż stwierdzono, że stężenia na wylocie z kolumny i z cyklonu są praktycznie takie same [142].

Z tych względów dalsze badania prowadzono tylko w obszarze I i II / $H_{RMO} < 0,1$ m/.

Struktura warstwy dwufazowej ciecz - gaz na półce zależy również od parametrów geometrycznych półki oraz od prędkości przepływu obu faz. W miarę wzrostu powierzchni swobodnej półki r_A , prędkości przepływu gazu w_G oraz zmniejszania obciążenia cieczą L , obserwowano stopniową zmianę struktury mieszaniny, od typowej piany komórkowej /foam/ lub burzliwej /froth/ do przepływu strumieniowego /jet/ lub bryzgów /spray/. W każdym z tych przypadków wpływ substancji powierzchniowo-czynnej był podobny: faza ciekła przechodziła w drobnopęcherzykową pianę a wysokość mieszaniny dwufazowej /nazywanej dalej dla uproszczenia pianą/ i opór przepływu gazu wzrastały.

8.1.2. Maksymalne i minimalne obciążenia

Nie przeprowadzano osobnych eksperymentów dla określenia dolnego punktu pracy oraz punktu zalania. Badania prowadzone były w kierunku zwiększających się obciążeń, w zasadzie w stałym ich zakresie / $w_G = 1 - 4$ m/s, $L_m = 0,25 - 6$ kg/m²s/, zwiększając stopniowo stężenie środka powierzchniowo-czynnego. Punkt zalania kolumny osiągnięto w 14 przypadkach /tab. 10.3/, analiza których pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

- 1^o - obecność środków powierzchniowo-czynnych przesuwają dopuszczalny zakres obciążeń w kierunku mniejszych prędkości gazu i cieczy,
- 2^o - półki bezprzelewowe o małej powierzchni swobodnej są najbardziej wrażliwe na zalewanie związane z własnościami pianotwórczymi cieczy /np. półka $r_A = 0,150$: dla $w_G = 3$ m/s i $C = 0,0$ - $L_{m\text{ zal}} = 6$ kg/m²s, dla $w_G = 3$ m/s i $C = 0,1$ kg/m³ - $L_{m\text{ zal}} = 0,25$ kg/m²s/ /rys. 8.2/.

Parametry pracy kolumny w punktach zalewania, otrzymane z badań własnych nie spełniają równania Kasatkina /sprawdzonego dla cieczy czystych/,

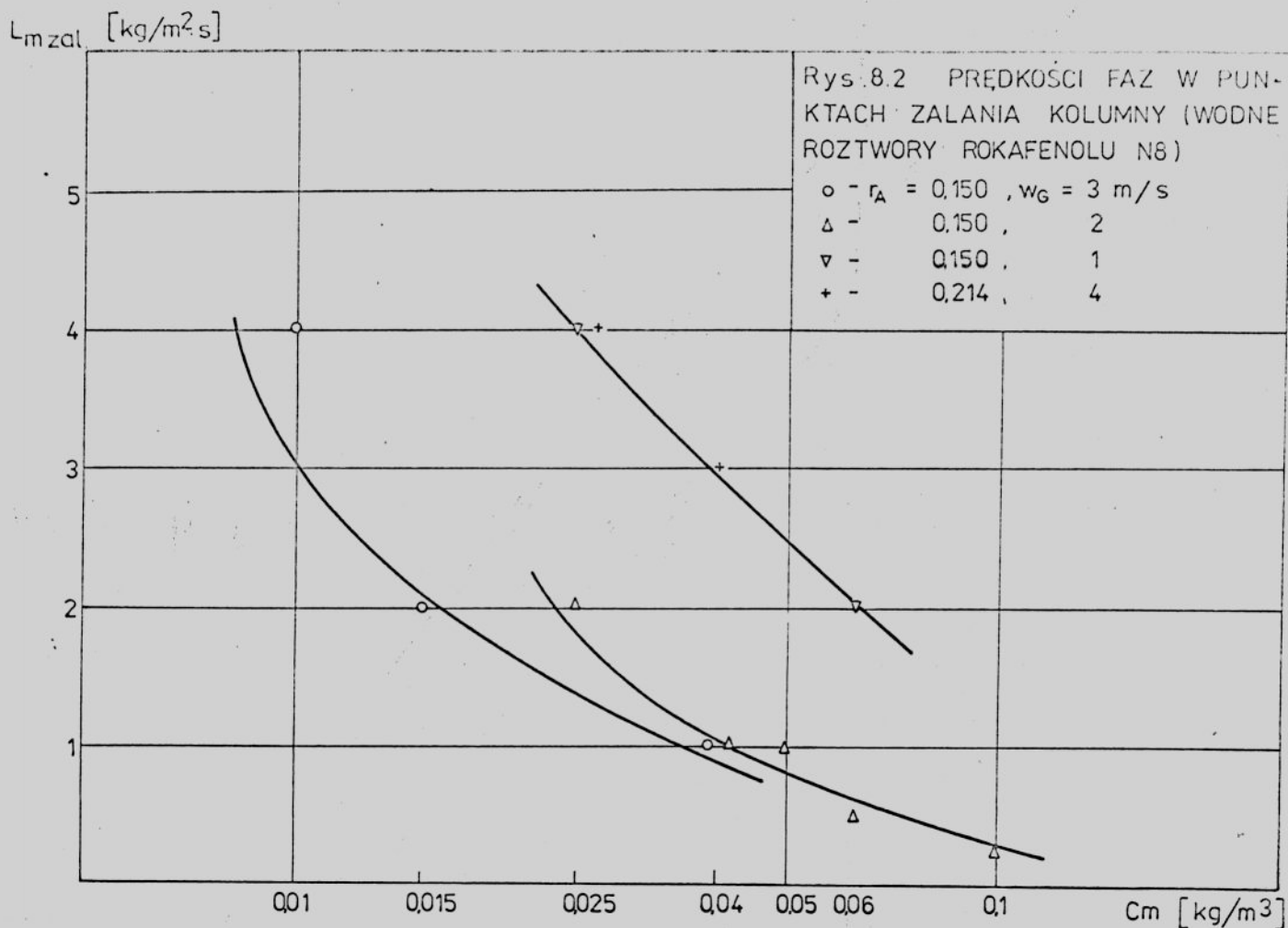
$$Y = C_{8.5} \exp /- 4X/ \quad 8.5$$

gdyż wyznaczona w ten sposób stała $C_{8.5}$ mieściła się przeważnie w przedziale $C_{8.5} < 10$, czyli w obszarze równomiernej pracy kolumny. Stanowi to potwierdzenie przedstawionego powyżej wniosku 1^o. Wyznaczenie optymalnej prędkości gazu z zależności Nelsona

$$w_G = 8,47 \cdot 10^{-5} \cdot C_{8.6} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}} \quad 8.6$$

/gdzie dla cieczy pieniających, dla $H_p = 0,3 - 0,8$ m, $C_{8.6} = 150 - 400$ / daje wartości $w_G = 0,4 - 1$ m/s, a więc wyraźnie zaniżone. Wynika to niewątpliwie z faktu nieściśłego zdefiniowania "cieczy pieniających".

Mimo niewielkiej ilości punktów pomiarowych dokonano próby oceny wpływu poszczególnych zmiennych na wartość liczby Reynoldsa dla fazy gazowej w punkcie zalania $/Re_{GO} = w_{GO} d_o / \nu_G/$. Przyjęto, że wielkość ta zależy od następujących zmiennych:



Rys. 8.2. Prędkości faz w punktach zalania kolumny /wodne roztwory Rokafenolu N8/

- $\overline{Re}_L = w_L / H_{RMO} + 1 / \nu_L$ - analog liczby Reynoldsa dla fazy ciekłej, gdzie w miejsce wielkości o wymiarze liniowym, bliżej nieokreślonej w punkcie zalania, przyjęto wielkość związaną ze zdolnością pianotwórczą cieczy, równą $H_{RMO} + 1$,
- r_A - właściwa powierzchnia swobodna półki,
- $\pi_{wzgl} = (\sigma_{H_2O} - \sigma) / \sigma_{H_2O}$ - względne obniżenie napięcia powierzchniowego,

- $ZP = H_{RM0} \varrho_L / L_1 \varrho_G$ - wielkość określająca zdolność pienienia cieczy, gdzie $L_1 = 1 \text{ m}$,
- $TP = H_{RM10} / H_{RM1}$ - trwałość piany

Przy założonym poziomie istotności 95 % otrzymano następującą zależność:

$$/Re_{GO}/_{zal} = 1,7825 \cdot 10^4 - 1,7764 \cdot \overline{Re}_L + 3,248 \cdot 10^4 \cdot r_A - 4,2377 \cdot 10^2 \cdot ZP$$

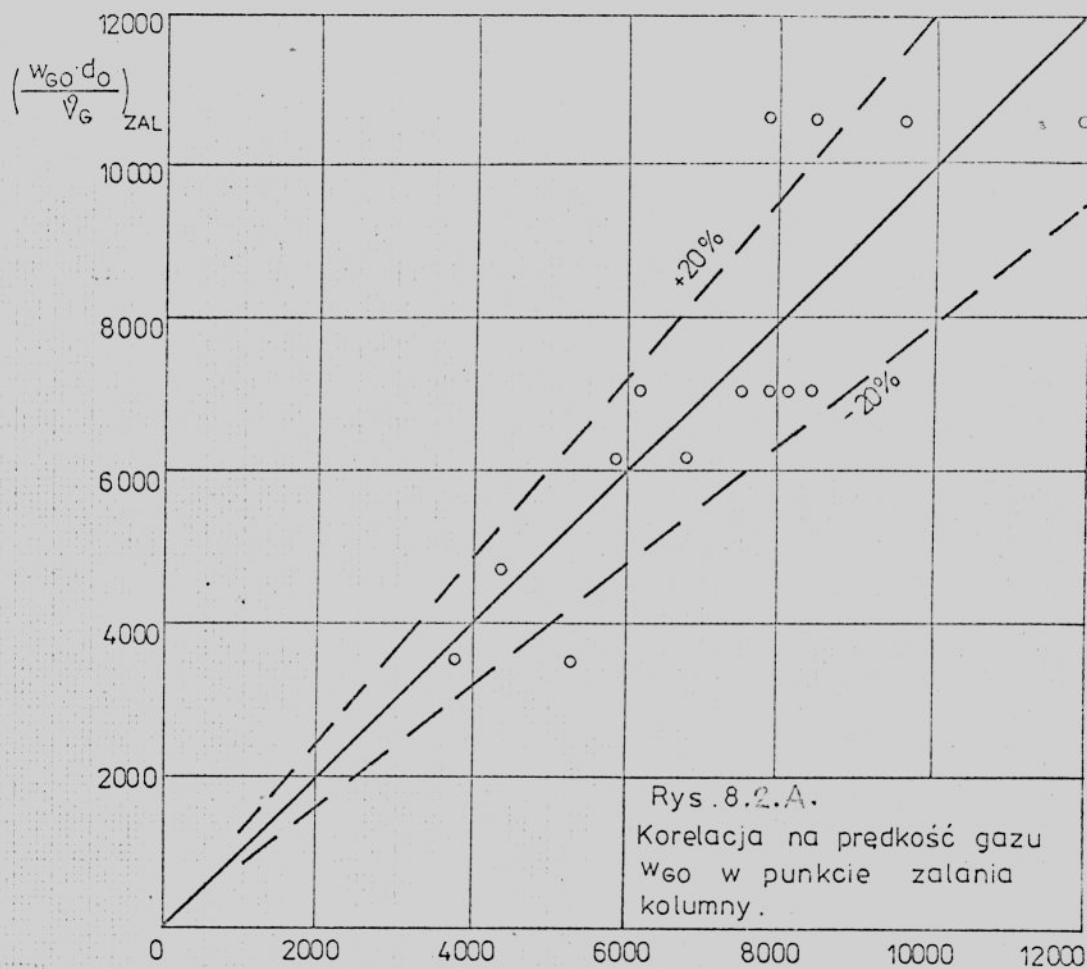
8.7

dla której współczynnik korelacji wielokrotnej wynosi $R_m = 0,986$, a błąd resztowy $\sigma_R = 1539$. Z układu regresji wyłączone zostały zmienne: $\overline{\pi}_{wzgl}$ i TP. Wykres korelacyjny przedstawiony jest na rys. 8.2.A.

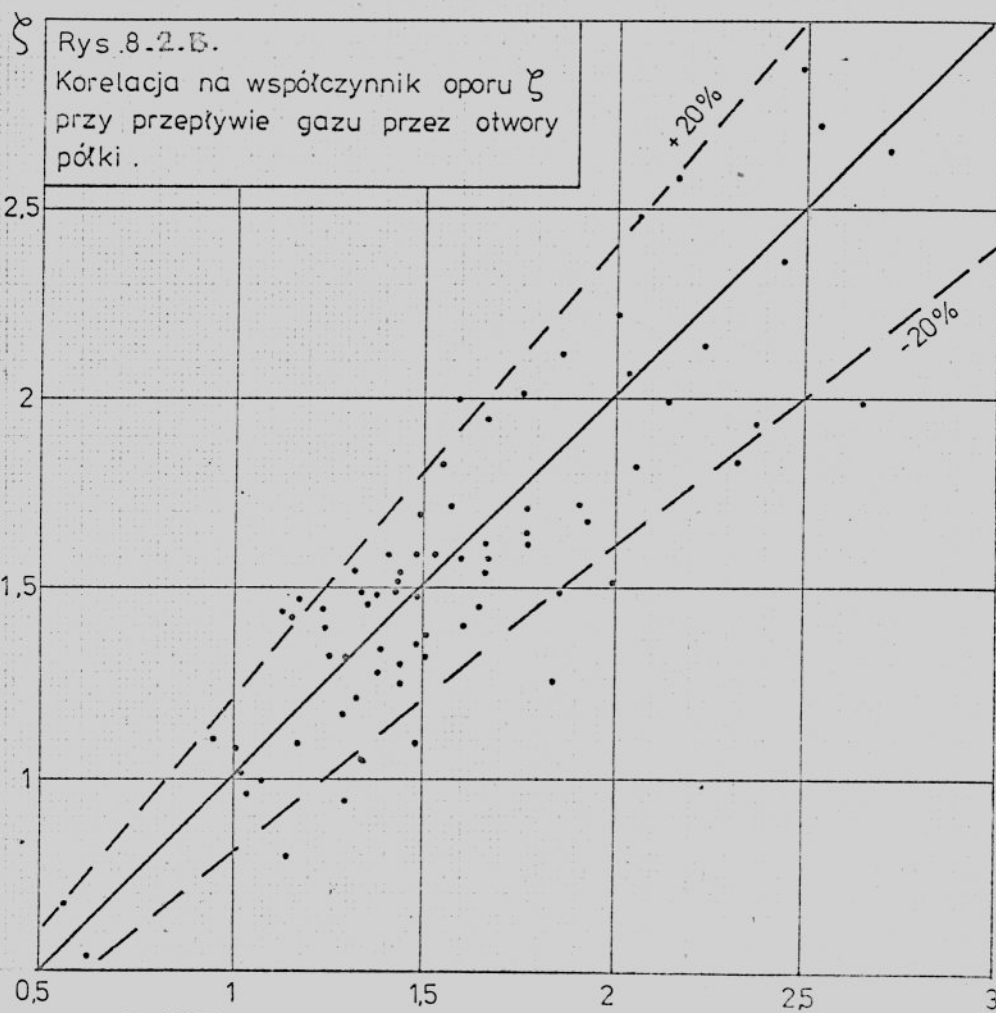
Z uwagi na niezbyt obszerny materiał doświadczalny, równanie /8.7/ może służyć do wyznaczenia dopuszczalnej prędkości gazu lub cieczy w sposób bardzo przybliżony /dla $H_p = 1 \text{ m}$ /.

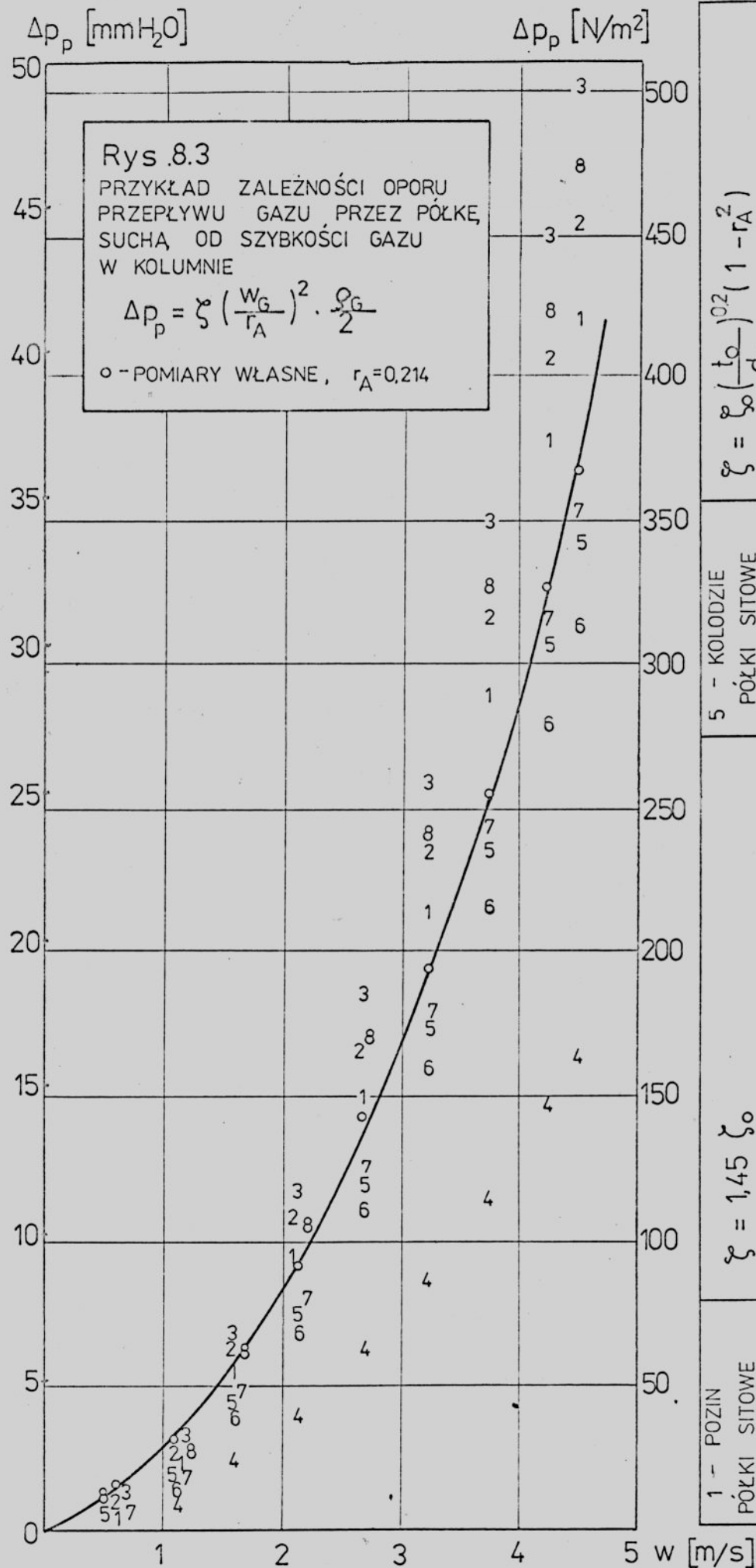
8.1.3. Opór przepływu gazu, wysokość czystej cieczy, wysokość piany

Całkowity spadek ciśnienia gazu na półce obciążonej cieczą /w obszarze pracy I i II/ zwiększał się wraz ze wzrostem stężenia środka powierzchniowo-czynnego, prędkości gazu i cieczy oraz zmniejszaniem się powierzchni swobodnej półki. W przypadku półek o powierzchni swobodnej $r_A = 0,2 - 0,3$, w zakresie stężeń odpowiadających obszarowi II dało się zaobserwować występowanie niewielkiego minimum na krzywej $\Delta p = \Delta p / w_G$ dla $w_G = 2 \text{ m/s}$ /rys. 8.4, 8.7/, co spowodowane było inwersją faz /obecność substancji pianotwórczych przesunęła punkt inwersji faz w kierunku większych prędkości gazu w kolumnie/.



$$1,7825 \cdot 10^4 - 1,7764 \cdot \frac{w_L (H_{RMO} + 1)}{v_L} + 3,248 \cdot 10^4 \cdot \alpha_A - 4,2377 \cdot 10^2 \frac{H_{RMO}}{L_1} \cdot \frac{g_L}{g_G}$$





1 - POŻIN PÓŁKI SITOWE	$\zeta = 1,45 \zeta_0$	5 - KOŁODZIE PÓŁKI SITOWE	$\zeta = \zeta_0 \left(\frac{t_0}{d_0} \right)^{0,2} (1 - r_A^2)$
2 - KASATKIN PÓŁKI SITOWE	$\zeta = \zeta_0 + (1 - r_A)^2 \frac{4000 r_A d_0}{Re_{G0}^{0,2}} \cdot \frac{\delta}{d_0}$	6 - ALEKSANDROW PÓŁKI RUSZTOWE	$\zeta = 1,75 (1 - r_A)^2 \left(\frac{s}{\delta} \right)^{0,2}$
3 - KASATKIN PÓŁKI SITOWE	$\zeta = \zeta_0 + (1 - r_A)^2 \frac{4000 r_A d_0}{Re_{G0}^{0,2}} \cdot \frac{\delta}{d_0}$	7 - CERVENKA PÓŁKI SITOWE	$\zeta = 0,94 (1 - r_A^2)^{-0,2} r_A^2 \left(\frac{\delta}{d_0} \right)^{0,2}$
4 - KASATKIN PÓŁKI RUROWE	$\zeta = 1,7 \bar{r}_A^{0,2} (1 - r_A)^2 \cdot Re_{G0}^{-0,1}$	8 - MERSMANN PÓŁKI SITOWE	$\zeta = 1,7 + 120 / (Re_{G0} d_0 \frac{\delta}{s})$

Przy opracowywaniu wyników pomiarów przyjęto, że całkowity spadek ciśnienia gazu można opisać równaniem /5.3/,

$$\Delta p = \Delta p_p + \Delta p_f + \Delta p_g \quad 5.3$$

z którego wyznaczyć można opór przepływu gazu przez warstwę piany:

$$\Delta p_f = \Delta p - \Delta p_p + \Delta p_g / \quad 8.8$$

Spadek ciśnienia gazu, niezbędny na pokonanie siły napięcia powierzchniowego obliczano z zależności:

$$\Delta p_g = \frac{4\sigma}{d_o} \quad 8.9$$

w której σ jest napięciem powierzchniowym cieczy w warunkach panujących w kolumnie $\sigma_{st} < \sigma < \sigma_d^0$, którego wartość jest bliżej nieznana. Dla oszacowania czasu ustalenia się równowagi adsorpcyjnej, obliczono współczynnik dyfuzji Rokafenolu N8 w wodzie za pomocą równania podanego przez Haasa[123]:

$$D_{BL \ 25^\circ C} = \frac{25,7 \cdot 10^{-6}}{v_{BM}^{1/3} - 2,0} \quad [cm^2/s] \quad 8.10$$

$v_{BM} = M_B / \rho_B$, $\rho_B = 940 \text{ kg/m}^3$. Z równania /2.47/ wynika, że dla $e_r = 1$, $\tau_r = \tau_s^*$ zmienia się w zakresie od kilku do kilkudziesięciu sekund. Ponieważ średni czas przebywania cieczy na płycie

$$\tau_{Lp} = \frac{h_o}{w_L} \quad 8.11$$

jest tego samego rzędu, więc przyjęto, że w równaniu /8.9/

$\sigma = \sigma_{st}$. Z pewnością nie jest to założenie ścisłe, ale nie wprowadza większego błędu, gdyż Δp_g stanowi niewielką część całkowitego spadku ciśnienia.

Wyniki pomiarów oporu przepływu gazu przez półki suche przedstawione są w tab. 10.4, a na rys. 8.3 pokazano przykład porównania wyników własnych z obliczonymi według dostępnych korelacji [3, 42, 221, 239]. Aby wykorzystać równanie (5.4)

$$\Delta p_p = \zeta \frac{w_{Go}^2}{2} \rho_G \quad 5.4$$

z możliwie małym błędem, na podstawie 83 pomiarów opracowano własną korelację na współczynnik oporu półki suchej:

$$\zeta = 141,39 r_A^{-1,931} (1 - r_A^2)^{5,59} \left(\frac{w_{Go} d_o}{v_G} \right)^{-0,507} \left(\frac{t_o}{0,004} \right)^{-4,339} \left(\frac{d_o}{0,004} \right)^{4,707} \quad 8.12$$

dla której $R_m = 0,970$ i $\zeta_R = 0,162$ /w układzie logarytmicznym/ Wykres korelacyjny przedstawiony jest na rys. 8.2B. Wszystkie półki miały taką samą grubość, $\delta_p = 0,004$ m.

Opór przepływu gazu przez otwory półki obciążonej fazą ciekłą należy obliczać uwzględniając fakt, że część powierzchni otworów zajęta jest przez spływającą ciecz:

$$\Delta p_p = \zeta \frac{\rho_G}{2} \left(\frac{w_{Go}}{1 - r_{AL}} \right)^2 \quad 8.13$$

Zależności pozwalające obliczyć ułamek powierzchni otworów zajętej przez ciecz r_{AL} opracowane zostały dla cieczy niepieniących [3, 239, 264]. Obliczanie spadku ciśnienia gazu w piśnie za pomocą równań /8,8/, /8,9/ i /8,13/ dawało często /szczególnie dla większych prędkości gazu/ wartości Δp_f mniejsze od $\rho_L g h_o$ lub nawet bliskie zera, co nie ma fizycznego sensu.

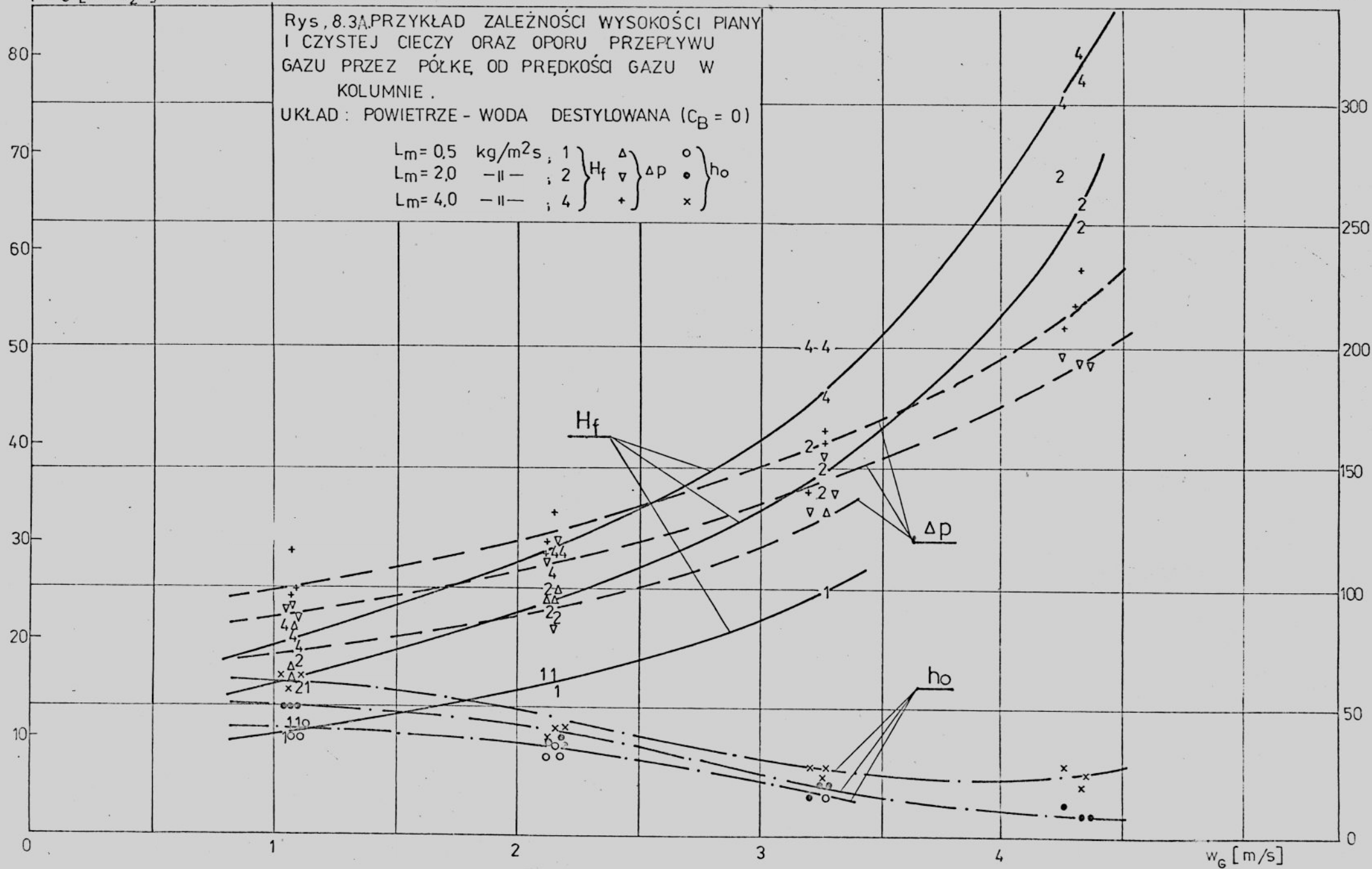
Przyczyna tego leży w zupełnie odmiennych /i bliżej nieznanym/ fizykochemicznych piany (ρ, μ) własnościach, od których zależą współczynniki: β /współczynnik ciśnienia statycznego/ i ζ_{Lo} /współczynnik oporu przy wypływie

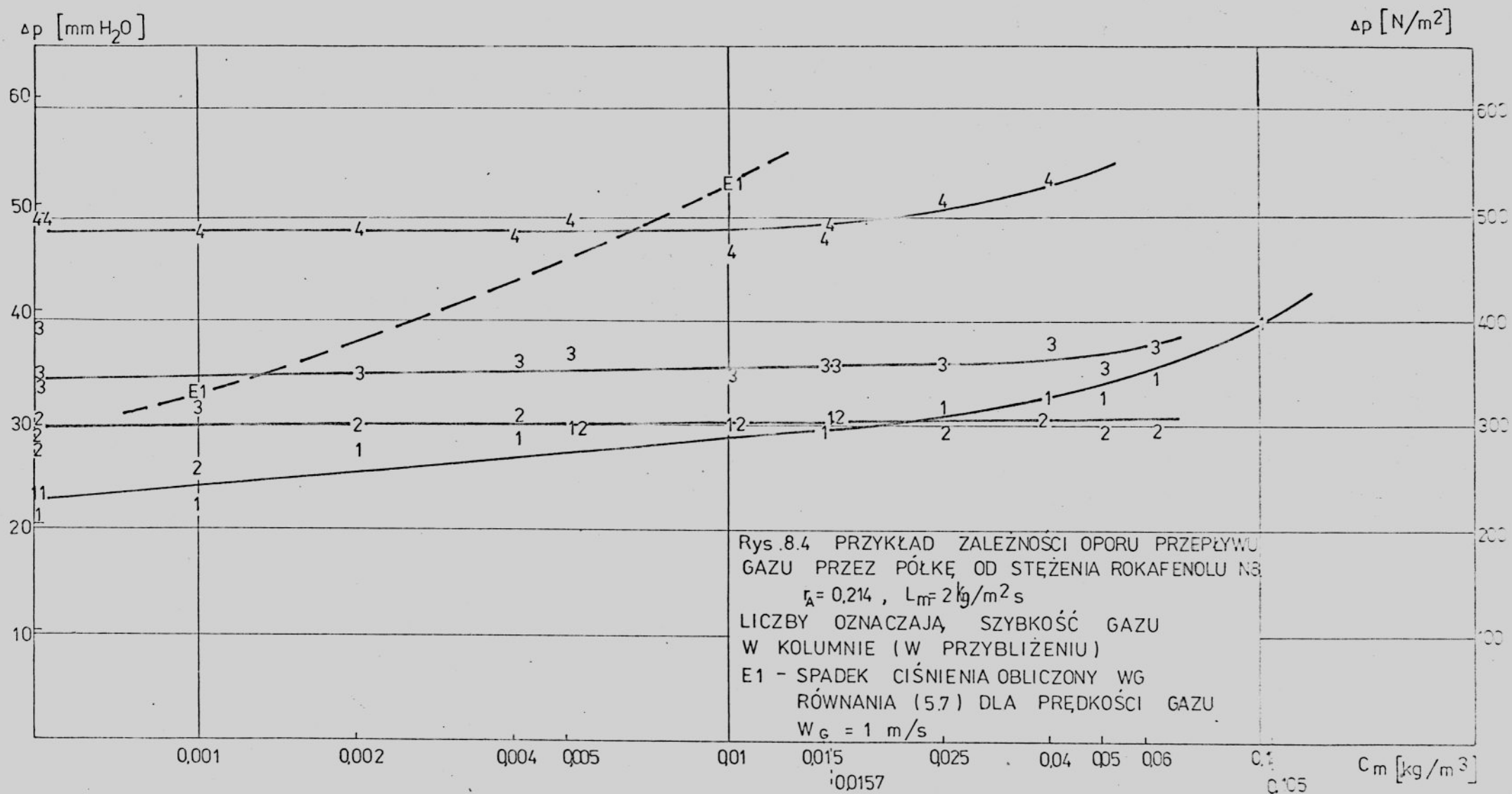
$\Delta p, h_o$ [mmH₂O] $H_f \cdot 10^3$ [m]

Rys. 8.3A. PRZYKŁAD ZALEŻNOŚCI WYSOKOŚCI PIANY
I CZYSTEJ CIECZY ORAZ OPORU PRZEPŁYWU
GAZU PRZECZ PÓŁKĘ OD PRĘDKOŚCI GAZU W
KOLUMNIE.

UKŁAD: POWIETRZE - WODA DESTYLOWANA ($C_B = 0$)

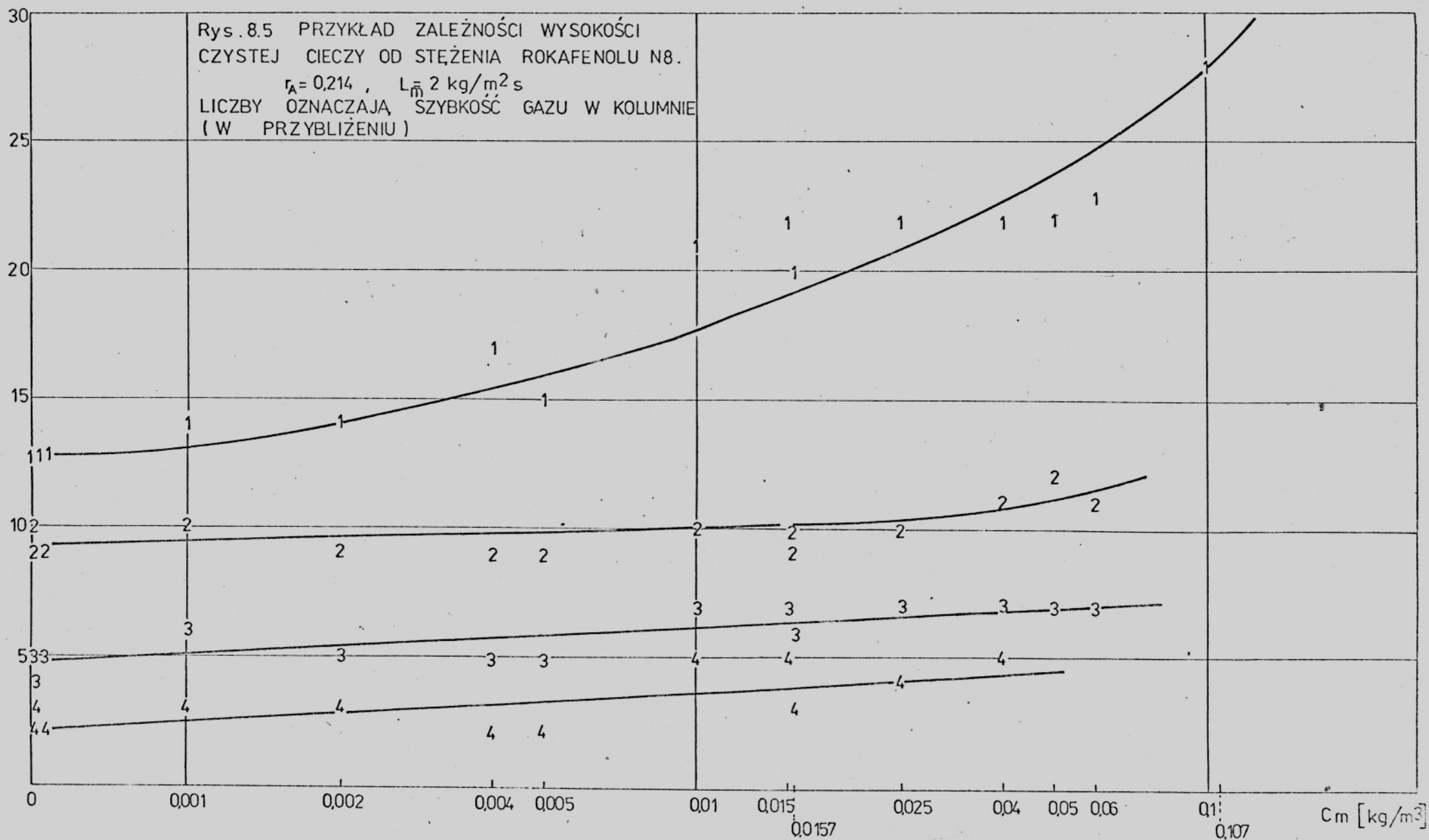
$L_m = 0,5 \text{ kg/m}^2\text{s}, 1$ } Δ } h_o
 $L_m = 2,0 \text{ —||—}, 2$ } ∇ }
 $L_m = 4,0 \text{ —||—}, 4$ } $+$ }

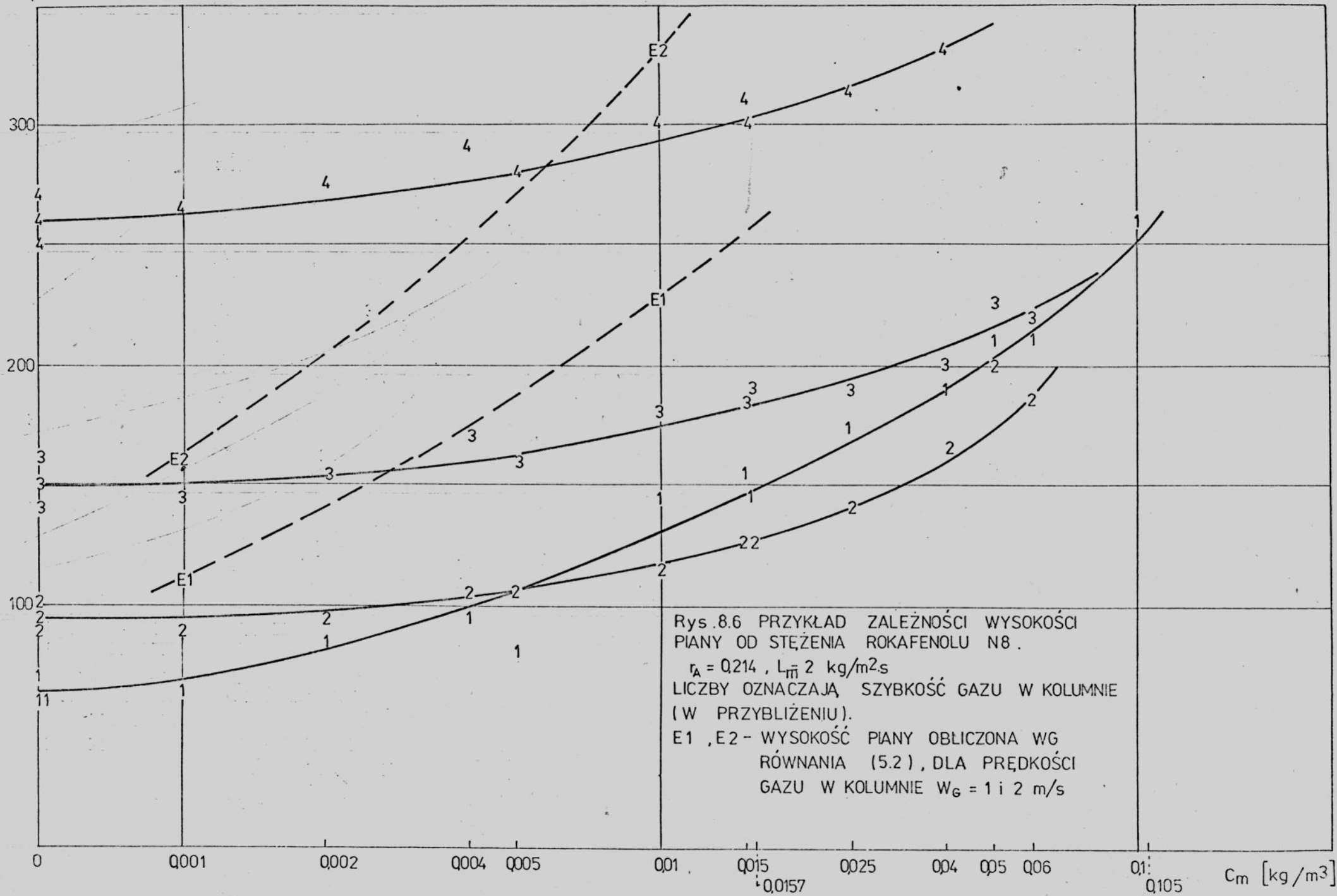




$h_0 \cdot 10^3 \text{ [m]}$

Rys. 8.5 PRZYKŁAD ZALEŻNOŚCI WYSOKOŚCI
CZYTEJ CIECZY OD STĘŻENIA ROKAFENOLU N8.
 $r_A = 0,214$, $L_{\bar{m}} = 2 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$
LICZBY OZNACZAJĄ SZYBKOŚĆ GAZU W KOLUMNIE
(W PRZYBLIŻENIU)



$H_f \cdot 10^3 \text{ [m]}$ 

$\Delta p, h_o [\text{mm H}_2\text{O}]$ $\Delta p [\text{N/m}^2]$

Rys. 8.7a PRZYKŁAD ZALEŻNOŚCI
SPADKU CIŚNIENIA GAZU W WARSTWIE
PIANY OD SZYBKOŚCI GAZU W KOLUMNIE

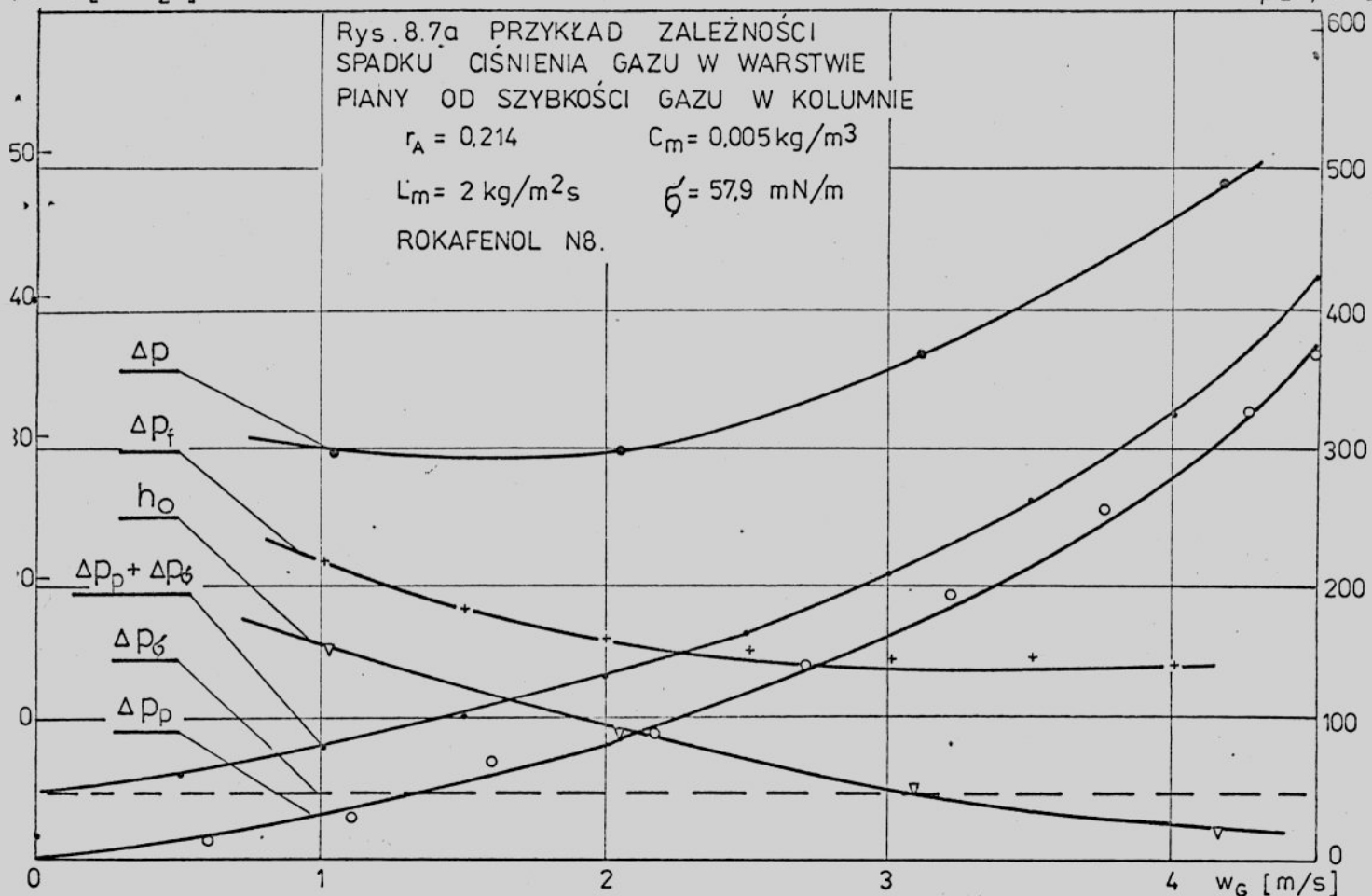
$$r_A = 0.214$$

$$C_m = 0.005 \text{ kg/m}^3$$

$$L_m = 2 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\zeta = 57.9 \text{ mN/m}$$

ROKAFENOL N8.

 $\Delta p, h_o [\text{mm H}_2\text{O}]$ $\Delta p [\text{N/m}^2]$

Rys. 8.7b PRZYKŁAD ZALEŻNOŚCI
SPADKU CIŚNIENIA GAZU W WARSTWIE
PIANY OD SZYBKOŚCI GAZU W KOLUMNIE

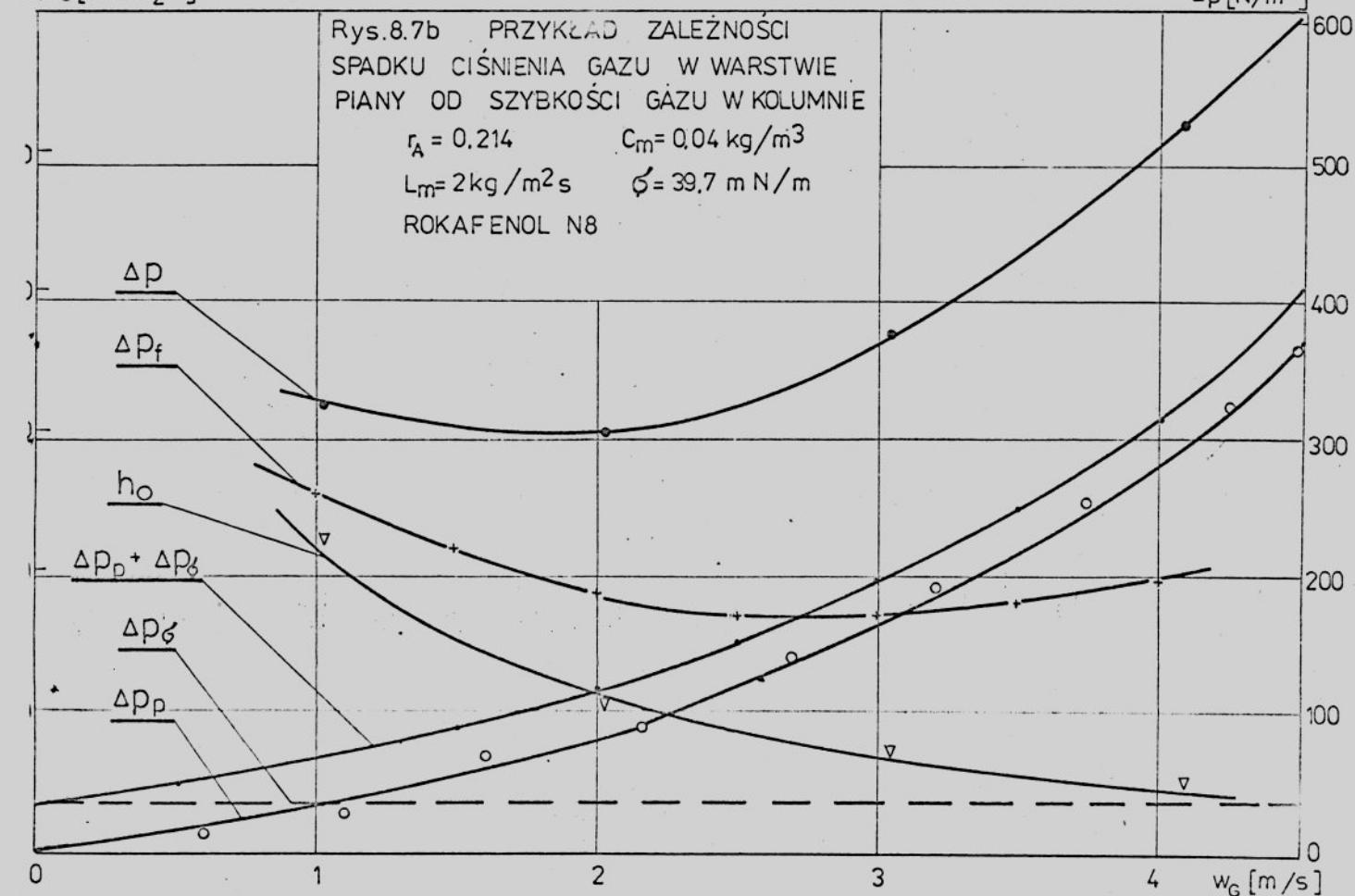
$$r_A = 0.214$$

$$C_m = 0.04 \text{ kg/m}^3$$

$$L_m = 2 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\zeta = 39.7 \text{ mN/m}$$

ROKAFENOL N8



cieczy/, wchodzące do zależności na obliczenie r_{AL} . Opór przepływu gazu przez warstwę piany obliczano więc za pomocą równań /8.8/, /8.9/, /5.4/ i /8.12/.

Wyniki 1037 pomiarów opracowano w postaci korelacji empirycznej pozwalającej obliczyć wartość Δp_f w zależności od parametrów geometrycznych półki, prędkości obu faz oraz własności cieczy:

$$Eu = 2,894 \cdot 10^7 Re_{Go}^{-1,442} r_A^{-0,534} \left[m_{LG} \left(\frac{ZP}{L_1} + 1 \right) \right]^{0,352} (\pi_{wzgl} + 0,001)^{-0,84} \left(\frac{ZP + 0,001}{L_1} \right)^{1,671} (TP + 1)^{-0,659} \quad 8.14$$

gdzie:

$$L_1 = 1 \text{ m}$$

$$Eu = \Delta p_f / w_{Go}^2 \rho_G$$

$$Re_{Go} = w_{Go} d_o / \nu_G$$

$$m_{LG} = \dot{m}_L / \dot{m}_G$$

$$\pi_{wzgl} = \rho_{H_2O} / \rho_{H_2O} - \rho_{H_2O} / \rho_{H_2O}$$

$$ZP = H_{RMO}$$

$$TP = H_{RM10} / H_{RM1}$$

Współczynnik korelacji wielokrotnej wynosi $R_m = 0,891$, a błąd resztowy $\sigma_R = 0,5394$ /w układzie logarytmicznym/.

Zależność /8.14/ dotyczy następującego zakresu przebadanych zmiennych:

$$w_{Go} = 2,4 - 28,7 \text{ m/s} \quad w_G = 1 - 4 \text{ m/s/}$$

$$d_o = 0,005 - 0,009 \text{ m}$$

$$r_A = 0,132 - 0,547$$

$$m_{LG} = 0,038 - 4,87 \text{ kg/kg}$$

$$ZP = 0,0 - 0,118 \text{ m}$$

$$TP = 0,0 - 0,879$$

$$\pi_{wzgl} = 0,0 - 0,558$$

Arbitralne stałe, równe 0,001, występujące w czwartym i piątym członie równania /8.14/, zostały wprowadzone zgodnie z założeniem, że nie ma cieczy idealnie czystych, więc w przypadku wody destylowanej mamy do czynienia z pewnym, bliżej nieokreślonym stopniem zanieczyszczenia powierzchni międzyfazowej, co z kolei rzutuje na zdolność pianotwórczą.

Wysokość warstwy piany na półce zwiększa się ze wzrostem stężenia środka powierzchniowo-czynnego, prędkości faz i zmniejszaniem się powierzchni swobodnej półki, wykazując /podobnie jak spadek ciśnienia/ niewielkie minimum spowodowane inwersją faz /rys. 8.6/.

Na podstawie 1037 pomiarów opracowana została zależność na obliczenie wysokości piany, ważna w zakresie przebadanych zmiennych podanych przy równaniu /8.14/:

$$Fr^{-1} = 3,525 \cdot 10^3 Re_{Go}^{-0,843} r_A^{0,438} \overline{Re}_L^{0,136} (\pi_{wzgl} + 0,001)^{-0,865} \left(\frac{ZP + 0,001}{L_1} \right)^{1,582} (TP + 1)^{-0,385} \quad 8.15$$

gdzie:

$$L_1 = 1 \text{ m}$$

$$Fr^{-1} = H_f g / w_{Go}^2$$

$$Re_{Go} = w_{Go} d_o / \nu_G$$

$$\overline{Re}_L = w_L / ZP + 0,001 / \nu_L$$

Współczynnik korelacji wielokrotnej wynosi $R_m = 0,993$, a błąd resztowy $\sigma_R = 0,467$ /w układzie logarytmicznym/.

W tym samym zakresie przebadanych zmiennych ważna jest zależność na stopień zatrzymania fazy ciekłej na półce:

$$\varphi_L^{-1} = 1,8262 \cdot 10^{-2} Re_{Go}^{1,297} r_A^{1,033} \overline{Re}_L^{-0,0287} (\pi_{wzgl} + 0,001)^{-0,415} \left(\frac{ZP + 0,001}{L_1} \right)^{0,789} \quad 8.15.A$$

gdzie:

$$L_1 = 1 \text{ m}$$

$$\varphi_L^{-1} = H_f / h_o$$

$$Re_{Go} = w_{Go} d_o / \nu_G$$

$$\overline{Re}_L = w_L / ZP + 0,001 / \nu_L$$

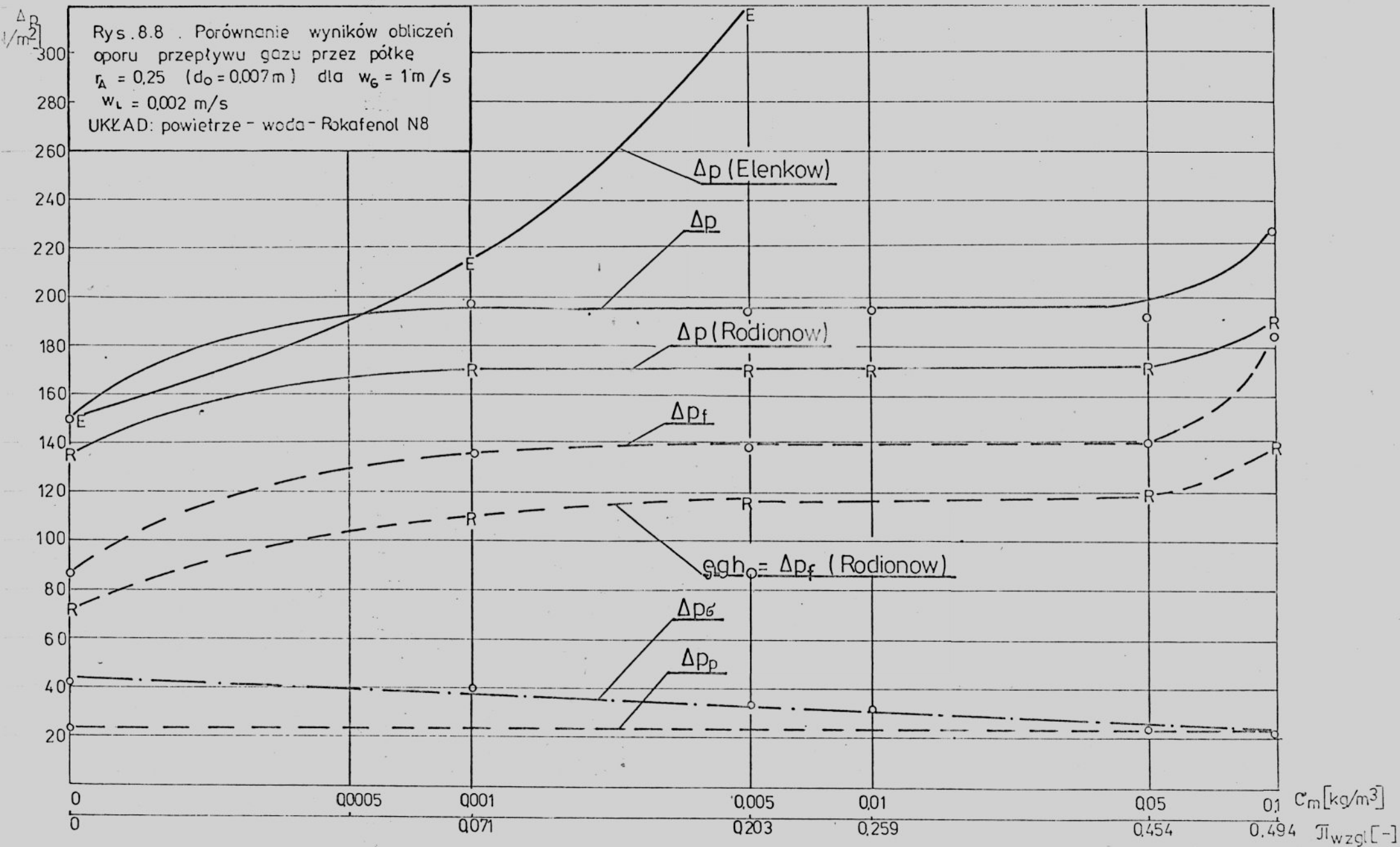
Współczynnik korelacji wielokrotnej wynosi $R_m = 0,986$, a błąd resztowy, $\sigma_R = 0,4767$ /w układzie logarytmicznym/.

Przy założonym poziomie istotności 95 %, z układu regresji wyłączony został człon związany z trwałością piany, /TP+1/.

Jeżeli znana jest wysokość warstwy piany H_f , równanie /8.15A/ pozwala wyznaczyć wysokość czystej cieczy h_o .

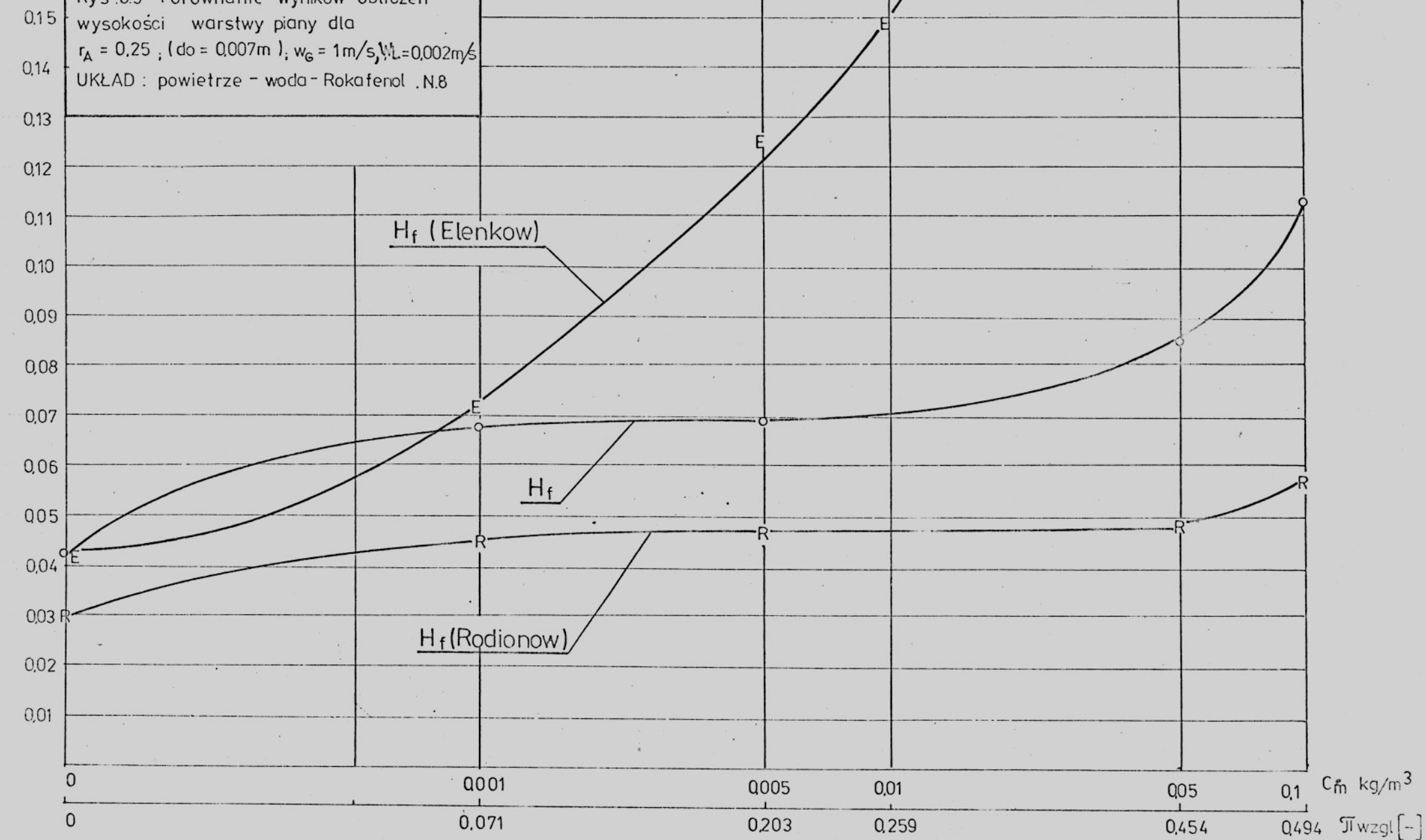
Wysokość czystej cieczy rośnie ze wzrostem stężenia, lecz równoczesny wzrost wysokości piany jest większy, więc stopień zatrzymania fazy ciekłej zmniejsza się /rys. 8.5, 8.6/.

Na rys. 8.8 i 8.9 przedstawiono porównanie wyników obliczeń hydrodynamicznych, przeprowadzonych dla $w_G = 1 \text{ m/s}$, $w_L = 0,002 \text{ m/s}$, $r_A = 0,25$ i własności fazy ciekłej, odpowiadających wodnym roztworom Rokafenolu N8 w temp. 20°C . Wysokość piany obliczano z zależności /5.1/ i /5.2/, wykorzystując własną, przedsta-



$H_f [m]$

Rys .8.9 Porównanie wyników obliczeń
wysokości warstwy piany dla
 $r_A = 0,25$; ($d_o = 0,007m$) ; $w_G = 1m/s$; $W_L = 0,002m/s$
UKŁAD : powietrze - woda - Rokaferol .N.8



wioną powyżej korelację na obliczenie wysokości czystej cieczy h_0 , natomiast opór przepływu gazu wyznaczano z równań /5.3/ - /5.6/ i /8.7'/ . Równania /5.2/ i /5.7/ dają wartości H_f i Δp mocno zawyżone, natomiast wysokość piany i spadek ciśnienia gazu, wyznaczone metodą Rodionowa są niższe od obliczonych z własnych korelacji.

8.1.4. Porywanie cieczy

Szybkość porywania cieczy mierzono w kolumnie jednopółkowej / $H_p = 1$ m/ i dwupółkowej /z półki górnej, $H_p = 0,47$ m/. Ciecz doprowadzano na półkę w taki sposób, że zraszacz znajdował się zawsze tuż nad powierzchnią warstwy piany, co eliminowało separacyjny wpływ spływającej z góry cieczy. Przy prędkości gazu $w_G = 1$ m/s, ilość porywanej cieczy była tak mała, że określanie szybkości porywania w tych warunkach było praktycznie niemożliwe i pomiary prowadzono dla prędkości gazu $w_G \geq 2$ m/s.

Stwierdzono wzrost ilości porywanej cieczy wraz ze zwiększaniem stężenia substancji powierzchniowo-czynnej, prędkości gazu i powierzchni swobodnej półki oraz zmniejszaniem obciążenia fazą ciekłą. Obecność substancji powierzchniowo-czynnej, przy niezmiennych pozostałych wielkościach, zwiększa porywanie cieczy z dwóch przyczyn:

- 1^o - zmniejszenia się wysokości przestrzeni separacyjnej H_s ,
/na skutek wzrostu wysokości piany H_f /,
- 2^o - zmniejszenia się gęstości fazy ciągłej /drobnopełcherzykowej piany/, która porywana jest w postaci drobnych płatków.

W oparciu o wyniki uzyskane w 524 pomiarach opracowano zależność pozwalającą obliczyć względną szybkość porywania

cieczy, e_{mG} [kg/kg gazu]:

$$e_{mG} = 1,281 \cdot 10^{-2} Re_{Go}^{0,628} r_A^{1,252} \overline{Re}_L^{-0,099} (\pi_{wzgl} + 0,001)^{-0,495} \left(\frac{ZP + 0,001}{L_1} \right)^{0,994} (TP + 1)^{0,245} \left(\frac{H_f}{H_s} \right)^{0,499} \quad 8.16$$

gdzie:

$$L_1 = 1 \text{ m}$$

$$Re_{Go} = w_{Go} d_o / \nu_G$$

$$Re_L = w_L (ZP + 0,001) / \nu_L$$

Współczynnik korelacji wielokrotnej wynosi $R_m = 0,995$, a błąd resztowy $\sigma_R = 0,4937$ /w układzie logarytmicznym/.

Ilość porywanej cieczy obliczyć można alternatywnie z podanej poniżej zależności, której postać zbliżona jest do korelacji dostępnych w literaturze [3, 75, 87, 239, 290]:

$$e_{mG} = 9,858 \cdot 10^{-4} (TP+1)^{1,016} \left(\frac{w_G}{H_S} \right)^{1,43} \quad 8.17$$

Współczynnik korelacji wielokrotnej wynosi $R_m = 0,995$, a błąd resztowy $\sigma_R = 0,4674$ /w układzie logarytmicznym/.

W przypadku równania /8.17/, przy założonym poziomie istotności 95 %, do układu regresji nie włączone zostały zmienne związane ze zdolnością pianotwórczą roztworu i obniżeniem napięcia powierzchniowego. Jest to zrozumiałe, gdyż wpływ tych wielkości zawiera w sobie wartość H_S .

Równania /8.16/ i /8.17/ dotyczą następujących zakresów przebadanych zmiennych:

$$w_{Go} = 4,8 - 20 \text{ m/s} \quad /w_G = 2 - 4 \text{ m/s/}$$

$$w_L = 0,00025 - 0,006 \text{ m/s}$$

$$r_A = 0,150 - 0,416$$

$$\pi_{wzgl} = 0,0 - 0,514$$

$$ZP = 0,0 - 0,054 \text{ m}$$

$$TP = 0,0 - 0,879$$

8.2. Wymiana masy

8.2.1. Opór wnikania po stronie fazy ciekłej

Na podstawie 280 pomiarów desorpcji dwutlenku węgla powietrzem z wody i wodnych roztworów Rokafenolu N8 i Rokanolu L10 opracowano zależność na liczbę jednostek wnikania w fazie ciekłej:

$$N_L \cdot Sc_L^{0,5} = 5,459 \cdot 10^3 Re_{Go}^{0,486} r_A^{-0,5} \bar{Re}_L^{-0,543} (\pi_{wzgl} + 0,001)^{-0,783} \left(\frac{ZP + 0,001}{L_1} \right)^{1,924} (TP + 1)^{-0,544} \quad 8.18$$

gdzie

$$L_1 = 1 \text{ m}$$

$$Sc_L = \nu_L / D_{AL}$$

$$Re_{Go} = w_{Go} d_o / \nu_G$$

$$\bar{Re}_L = w_L / (ZP + 0,001) // \nu_L$$

dla której współczynnik korelacji wielokrotnej wynosi $R_m = 0,996$ a błąd resztowy $\sigma_R = 0,48488$ /w układzie logarytmicznym/.

Równanie /8.18/ jest ważne w następującym zakresie przebadanych zmiennych:

$$w_{Go} = 2,4 - 20 \text{ m/s} \quad /w_G = 1 - 4 \text{ m/S/}$$

$$w_L = 0,00025 - 0,006 \text{ m/s}$$

$$r_A = 0,150 - 0,416$$

$$\pi_{wzgl} = 0,0 - 0,513$$

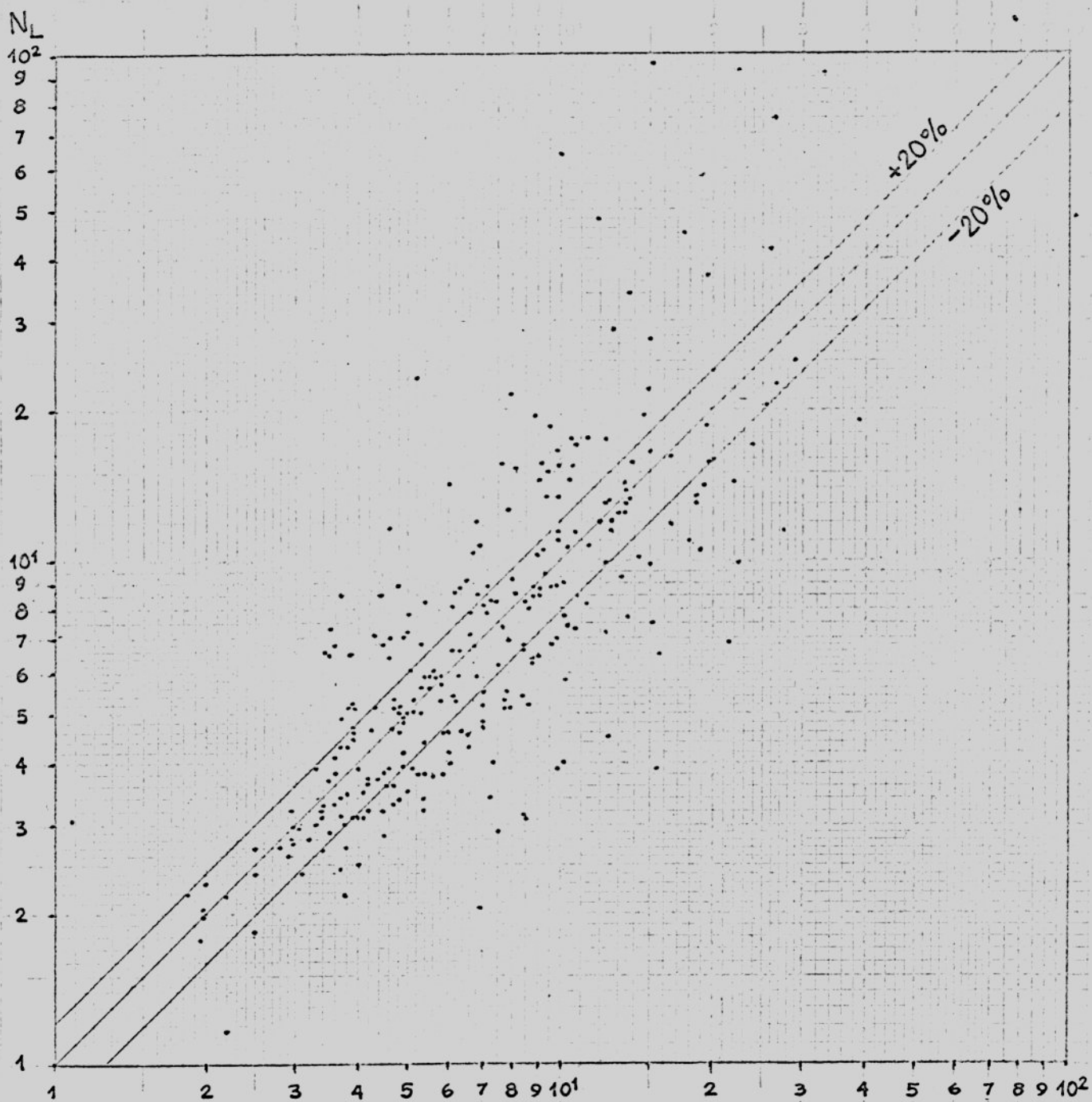
$$ZP = 0,0 - 0,054 \text{ m}$$

$$TP = 0,0 - 0,876$$

Wykres korelacyjny przedstawiony jest na rys. 8.10. Największe rozbieżności między zmierzonymi i obliczonymi wartościami N_L występują przy małych obciążeniach fazą ciekłą $w_L < 0,001 \text{ m/s/}$ oraz w pobliżu punktu zalania kolumny.

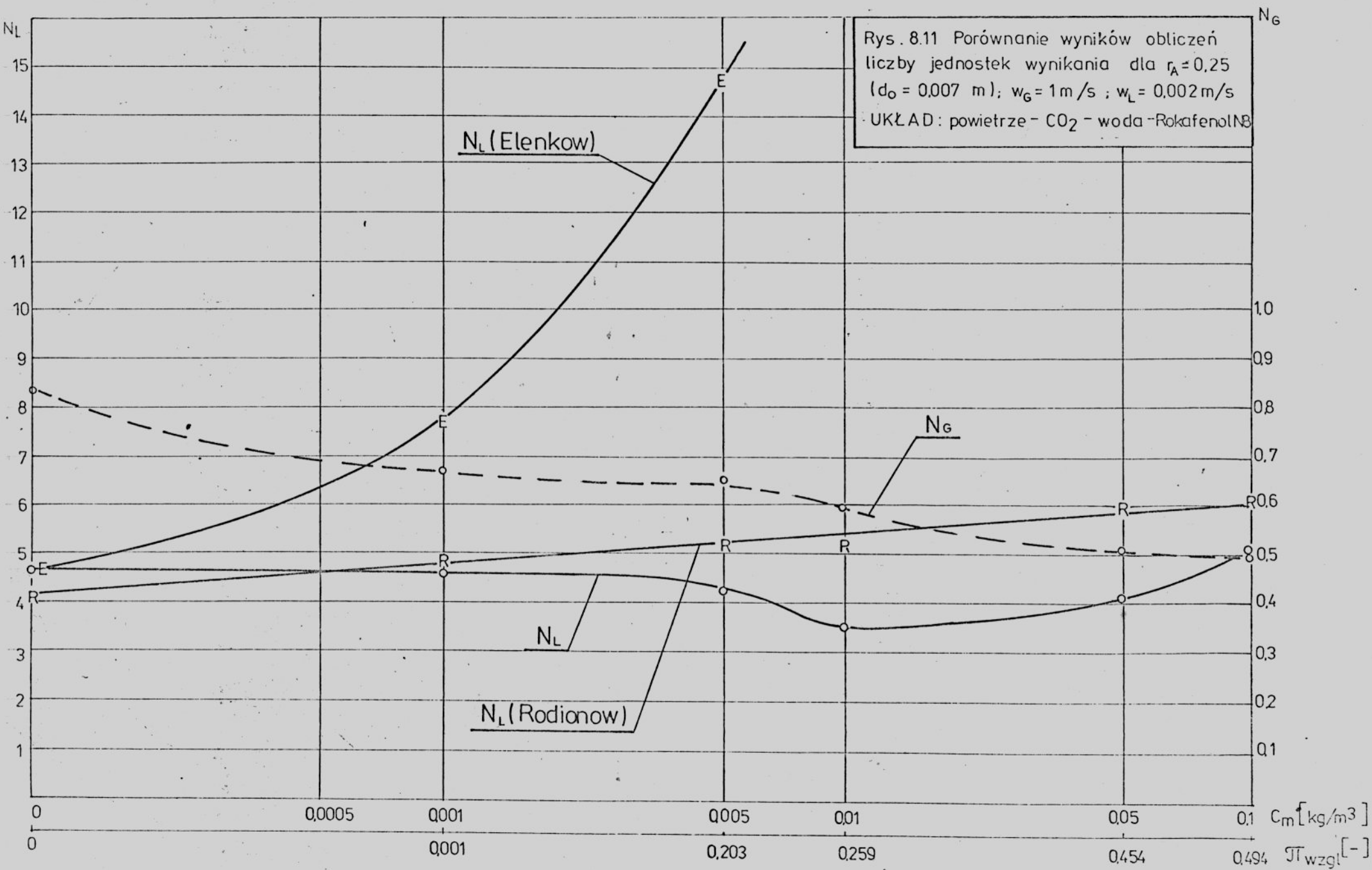
Dokładna analiza wyników badań oraz równania /8.18/ wskazuje na istnienie minimum w zależności liczby jednostek wnika-
nia N_L od stężenia substancji powierzchniowo-czynnej /rys. 8.11/,
które odpowiada początkowi obszaru krytycznego stężenia micelar-
nego CMC. Można to wytłumaczyć zmianą warunków hydrodynamicznych
na półce. Początkowo wzrost stężenia nieznacznie zmienia struktu-
rę warstwy dwufazowej na półce i wartości N_L praktycznie nie za-
leżą od stężenia. Gdy fazą zwartą staje się drobnopęcherzykowa
piana, kontakt cieczy z gazem pogarsza się. Świeża ciecz dopro-
wadzana na półkę rozplywa się w pianie i część jej przecieka
przez otwory półki nie kontaktując się z fazą gazową. Dalszy
wzrost stężenia powoduje szybki wzrost wysokości piany, co
znacznie wydłuża czas przebywania cieczy na półce i powoduje
wzrost wartości N_L .

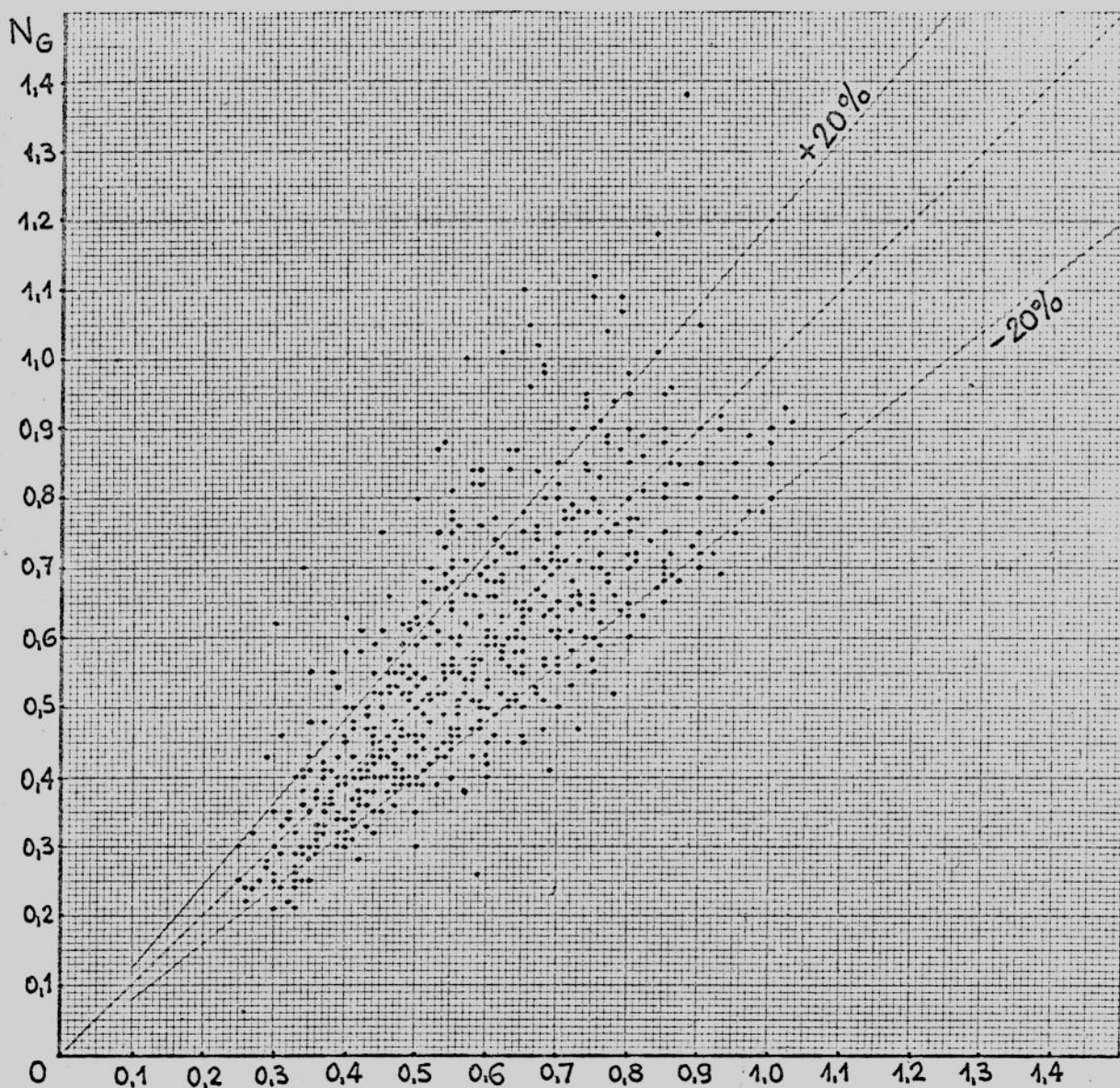
Na rys. 8.11 przedstawiono porównanie wyników obliczeń
własnych liczby jednostek wnika-
nia z wynikami uzyskanymi za po-
mocą równania /5.17/ /Rodionow/ i /5.22/ /Elenkow/. Równanie
Elenkowa daje wartości N_L bardzo zawyżone, a ponadto wskazuje



$$5,459 \cdot 10^3 \text{Sc}_L^{-0,5} \text{Re}_{G0}^{0,486} r_A^{-0,5} \text{Re}_L^{-0,543} (\pi_w + 0,001)^{-0,783} \left(\frac{ZP + 0,001}{L_1} \right)^{1,924} (TP + 1)^{-0,544}$$

Rys.8.10. Wykres korelacyjny równania (8.18).





$$0,13422 Sc_G^{-0,5} Re_{Go}^{-0,205} r_A^{-0,519} Re_L^{-0,105} (\pi_w + 0,001)^{0,194} \left(\frac{ZP + 0,001}{L_1} \right)^{-0,539} (TP + 1)^{-0,185}$$

Rys.8.12. Wykres korelacyjny równania (8.19).

na zupełnie odmienny wpływ substancji powierzchniowo-czynnej, niż stwierdzono to w badaniach własnych. Podobne wnioski wyciągnąć można odnośnie równania Rodionowa, choć rozbieżność wyników jest tu znacznie mniejsza.

8.2.2. Opór wnikania po stronie fazy gazowej

Liczbę jednostek wnikania w fazie gazowej N_G wyznaczono za pomocą równania /7.33/, wykorzystując opracowaną wcześniej korelację na liczbę jednostek wnikania w fazie ciekłej N_L /8.18/. Na podstawie 510 pomiarów desorpcji amoniaku powietrzem z wody i wodnych roztworów Rokafenolu N8 opracowano następującą korelację:

$$N_G \cdot Sc_G^{0,5} = 1,3422 \cdot 10^{-1} Re_{Go}^{-0,205} r_A^{-0,519} \overline{Re}_L^{0,105} (\pi_{wzgl} + 0,001)^{0,194} \left(\frac{ZP + 0,001}{L_1} \right)^{-0,539} (TP + 1)^{-0,185} \quad 8.19$$

gdzie $L_1 = 1 \text{ m}$

$$Sc_G = \nu_G / D_{AG}$$

$$Re_{Go} = w_{Go} d_o / \nu_G$$

$$\overline{Re}_L = w_L / ZP + 0,001 // \nu_L$$

Współczynnik korelacji wielokrotnej wynosi $R_m = 0,975$, a błąd resztowy $\sigma_R = 0,20235$ /w układzie logarytmicznym/.

Równanie /8.19/ ważne jest w następującym zakresie przebadanych zmiennych:

$$w_{Go} = 2,4 - 20 \text{ m/s} \quad /w_G = 1 - 4 \text{ m/s/}$$

$$w_L = 0,00025 - 0,006 \text{ m/s}$$

$$r_A = 0,150 - 0,416$$

$$\pi_{wzgl} = 0,0 - 0,512$$

$$ZP = 0,0 - 0,045$$

$$TP = 0,0 - 0,879$$

Wykres korelacyjny przedstawiony jest na rys. 8.12. Największy rozrzut wyników występuje dla małych prędkości gazu $w_G \leq 2 \text{ m/s}$ oraz w pobliżu punktu zalania kolumny.

Otrzymane wyniki wskazują na ciągłe zmniejszanie się liczby jednostek wnikania N_G w miarę wzrostu stężenia substancji powierzchniowo-czynnej /rys. 8.11/. Przyczyną pogorszenia się warunków wymiany masy w fazie gazowej jest to, że wraz ze wzrostem stężenia coraz większa część gazu przepływa przez warstwę piany w postaci dużych pęcherzy lub strug, szczególnie w obszarze II, gdy fazą zwartą staje się drobnopęcherzykowa piana o małej gęstości.

8.3. Kolumna dwupółkowa

Wyniki eksperymentów przeprowadzonych na układzie: powietrze - CO_2 - woda i wodne roztwory Rokanolu L10 w kolumnie dwupółkowej wskazują na pewne różnice w pracy półki górnej i dolnej /tab. 10.6/. Przyczyną tego jest fakt, że na półkę górną faza ciekła doprowadzana jest w postaci cieczy, natomiast na półkę dolną dopływa jako piana. Na dolnej półce następuje dalsze rozdrobnienie pęcherzy, w wyniku czego wysokość warstwy piany jest o kilka do kilkunastu procent wyższa niż na półce górnej. Wysokość czystej cieczy h_0 jest nieco mniejsza, co oznacza zmniejszenie się stopnia zatrzymania fazy ciekłej. Opór przepływu gazu pozostaje praktycznie taki sam, natomiast wyraźnemu pogorszeniu ulegają warunki wymiany masy: wartości liczby jednostek

wnikania N_L dla półki dolnej są średnio o 40 % niższe niż dla półki górnej. Problem ten wymaga dalszych badań.

Uwzględniając te różnice, tylko wyniki pomiarów otrzymane z półki górnej stanowiły część danych stanowiących podstawę do opracowywania przedstawionych w tym rozdziale korelacji.

8.4. Omówienie wyników

W przedstawionych korelacjach wpływ środków powierzchniowo-czynnych uwzględniano przez wprowadzenie trzech członów, zawierających:

- względne obniżenie napięcia powierzchniowego, π_{wzgl} ,
- zdolność pianotwórczą roztworu, ZP,
- trwałość piany, TP.

Branie pod uwagę tylko wielkości π_{wzgl} powodowało kilkukrotne zwiększenie sumy kwadratów błędów ESS i znaczne zmniejszenie się współczynnika korelacji wielokrotnej, R_m .

Przyjęcie w liczbie Reynoldsa, $\overline{Re}_L$, parametru liniowego związanego ze zdolnością pianotwórczą, $/ZP + 0,001/$ dało mniejszy błąd korelacji, w porównaniu z przyjęciem wysokości czystej cieczy, h_0 . Jest to równoznaczne z założeniem, że danej prędkości roztworu odpowiada większa prędkość czystej cieczy.

Wpływ parametrów geometrycznych półki oraz prędkości fazy gazowej ujmuje liczba Reynoldsa liczona w otworach półki, Re_{Go} oraz powierzchnia swobodna półki r_A .

Mimo, że zmienność wartości liczb Schmidta: Sc_L i Sc_G , wynikała tylko ze zmian temperatury, to jednak wprowadzenie ich do korelacji znacznie zmniejszyło błąd.

W miarę wzrostu stężenia substancji powierzchniowo-czynnej coraz większa część gazu przepływała przez warstwę piany w postaci dużych pęcherzy, a równocześnie faza ciągła /piana/ stawała się coraz bardziej drobnopęcherzykowa. Nasuwa to przypuszczenie, że metoda depolaryzacji światła, użyta przez Rodionowa do pomiaru powierzchni międzyfazowej [227, 230] dawała w rezultacie wielkość zawyżoną /można ją określić jako geometryczną powierzchnię międzyfazową/, której nie można odnosić do wymiany masy. Podobne wyniki uzyskano fotografując rozkład wielkości pęcherzy widocznych na ścianie kolumny. Struktura warstwy dwufazowej na półce, szczególnie w obszarze - II znacznie odbiega od struktury piany dynamicznej powstałej na półce z czystej cieczy [23, 119, 121, 122, 225, 226, 232].

Wydaje się, że w przypadku cieczy pieniających wielkość powierzchni międzyfazowej, aktywnej w procesie wymiany masy, określić można metodą chemiczną [248, 249, 252, 257].

8.5. Obliczanie kolumny półkowej odpylająco-absorpcyjnej

W oparciu o przedstawiony przegląd literatury oraz wyniki badań własnych proponuje się następujący tok postępowania przy projektowaniu półkowej kolumny odpylająco-absorpcyjnej:

A/ Dobór rodzaju i stężenia substancji powierzchniowo-czynnej:

- Wybrany środek powierzchniowo-czynny powinien być tanim, niejonowym produktem o dużej aktywności powierzchniowej, co pozwoli na stosowanie go w małych stężeniach. Wymagania te spełniają produkty polioksyetylenowania alkoholi lub alkilofenoli, które ponadto wykazują dużą odporność na

zmiany warunków fizykochemicznych.

- Minimalne stężenie wybranego środka powierzchniowo-czynnego powinno zapewnić zwilżalność pyłu znajdującego się w oczyszczanym gazie /rozdział 3/.
- Frakcyjne sprawności odpylania oszacować należy stosując zależności słuszne dla pyłów zwilżalnych [217, 221, 283].

B/. Dobór parametrów konstrukcyjnych półki i natężeń przepływu faz:

- Powierzchnię swobodną półki zakłada się w przedziale $0,25 \leq r_A \leq 0,35$ przy średnicy otworów $0,005 \leq d_o \leq 0,01m$.
- Prędkość gazu w przekroju kolumny można przyjąć w zakresie $2 \leq w_G \leq 3,5$ m/s; obciążenie fazą ciekłą nie powinno być mniejsze niż $L_m = 0,5$ kg/m²s / $w_L \geq 0,0005$ m/s/. Górną granicę obciążenia fazą ciekłą /wynikającą z bilansu wymiany masy/ należy orientacyjnie sprawdzić na zalewanie /równanie 8.7/.
- Wysokość kolumny jednopółkowej lub odstęp między półkami w kolumnie dwupółkowej należy wyznaczyć z zależności:

$$H_p \geq H_f + H_s \quad 8.29$$

gdzie H_f - określa wzór /8.15/, a H_s - równanie /8.16/ lub /8.17/, przy założeniu, że porywanie nie może przekraczać 10 % doprowadzanej na półkę cieczy / $e_{mL} < 0,1$ /.

W przypadku kolumny dwupółkowej, wysokość piany na półce dolnej należy zwiększyć o 20 %.

- Spadek ciśnienia na półce można wyznaczyć za pomocą równań /5.4/, /8.9/, /8.14/ i /5.3/. Współczynnik oporu przy przepływie gazu przez otwory półki, ζ można określić w

oparciu o korelacje dostępne dla półek sitowych /rys. 8.3/, które dają wartości ξ zbliżone do otrzymanych w badaniach własnych lub nieco wyższe.

- W przestrzeni przeciekowej pod półką /dolną/ należy przewidzieć wykonanie przewodu odprowadzającego pianę, umieszczonego na wysokości kilku centymetrów nad poziomem lustra cieczy wynikającym z położenia zamknięcia hydraulicznego.
- Własności pianotwórcze cieczy należy określać uwzględniając obecność w niej cząstek pyłu [142].

C/ Liczbę jednostek przenikania /sprawność półki lub odpowiednie współczynniki przenikania masy/ należy wyznaczyć w oparciu o zależności /8.18/ i /8.19/. W przypadku kolumny dwupółkowej, liczbę jednostek wnikania na półce dolnej należy zmniejszyć o ok. 40 %.

8.6. Wnioski

W pracy przedstawiono obszerny przegląd literatury na temat wpływu substancji powierzchniowo-czynnych na hydrodynamikę, odpylanie i wymianę masy w układzie gaz - ciecz ze szczególnym uwzględnieniem kolumn półkowych jako urządzeń odpylająco-absorpcyjnych. Wykazano celowość stosowania wodnych roztworów substancji powierzchniowo-czynnych w procesie oczyszczania gazów z pyłów trudno zwilżalnych; równocześnie stwierdzono, że obecny stan wiedzy nie pozwala na pewne zaprojektowanie kolumny odpylająco-absorpcyjnej o dużej przepustowości.

Na zaprojektowanej i wykonanej w Instytucie Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych instalacji doświadczalnej prze-

proawdzono badania wpływu wybranych środków powierzchniowo-czynnych na hydrodynamikę i wymianę masy w kolumnie z bezprzelewową półką sitową. Eksperymentalnie badano wpływ parametrów geometrycznych półki, prędkości przepływu faz oraz własności fizykochemicznych i pianotwórczych cieczy na opór przepływu gazu przez półkę, wysokość piany, porywanie cieczy z półki oraz kinetykę wymiany masy w fazie ciekłej i gazowej.

Wyniki 1037 pomiarów hydrodynamiki, 280 pomiarów kinetyki wymiany masy w fazie ciekłej i 510 pomiarów kinetyki wymiany masy w fazie gazowej pozwalają sformułować następujące wnioski:

- 1^o Wpływ środków powierzchniowo-czynnych na hydrodynamikę i wymianę masy w kolumnie półkowej określić można za pomocą trzech parametrów:
 - względnego obniżenia napięcia powierzchniowego cieczy, $\pi_{wzgl.}$
 - zdolności pianotwórczej cieczy, ZP,
 - trwałości powstałej piany, TP
- 2^o W miarę wzrostu stężenia substancji powierzchniowo-czynnej wyróżnić można trzy obszary pracy półek, różniące się strukturą warstwy dwufazowej, zależną od własności pianotwórczych cieczy.
- 3^o Obecność substancji powierzchniowo-czynnych przesuwaa zakres pracy półki w kierunku mniejszych obciążeń fazą gazową i ciekłą, szczególnie w przypadku półek o małej powierzchni swobodnej, $r_A < 0,2$. Opracowano zależność /8.7/ pozwalającą określić w przybliżeniu prędkości faz w punkcie zalania.

- 4° Obecność substancji powierzchniowo-czynnych powoduje wzrost oporu przepływu gazu, wysokości warstwy piany i wysokości czystej cieczy, co odbywa się przy zmniejszającym się stopniu zatrzymania fazy ciekłej. Opracowano korelacje /8.14/, /8.15/ i /8.15A/ na obliczenie tych wielkości.
- 5° W obecności substancji powierzchniowo-czynnych szybkość porywania cieczy wzrasta na skutek zmniejszenia się wysokości przestrzeni separacyjnej i zmiany struktury warstwy piany na półce. Opracowano korelacje /8.16/ I /8.17/ pozwalające obliczyć względną szybkość porywania cieczy.
- 6° Na skutek zmiany warunków hydrodynamicznych, w miarę wzrostu stężenia substancji powierzchniowo-czynnej, zmniejszają się wartości liczby jednostek wnikania w fazie ciekłej i gazowej, przy czym liczba jednostek wnikania w fazie ciekłej osiąga minimum w pobliżu krytycznego stężenia micelnego.
- 7° Jeżeli ciecz doprowadzana jest na półkę w postaci piany /praca półki dolnej w kolumnie dwupółkowej/, wówczas wysokość warstwy dwufazowej wzrasta przy równoczesnym pogorszeniu warunków wymiany masy w porównaniu z półką górną.
- 8° Na podstawie danych literaturowych i wyników badań własnych przedstawiono sposób obliczania kolumny półkowej odpylająco-absorpcyjnej.
- 9° Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki wskazują na możliwość podjęcia badań w następujących kierunkach:
 - wpływ substancji powierzchniowo-czynnych na absorpcję z reakcją chemiczną /brak danych literaturowych/,
 - wpływ własności pianotwórczych cieczy /ZP, TP/ na hydrodynamikę i wymianę masy w kolumnach wielopółkowych,

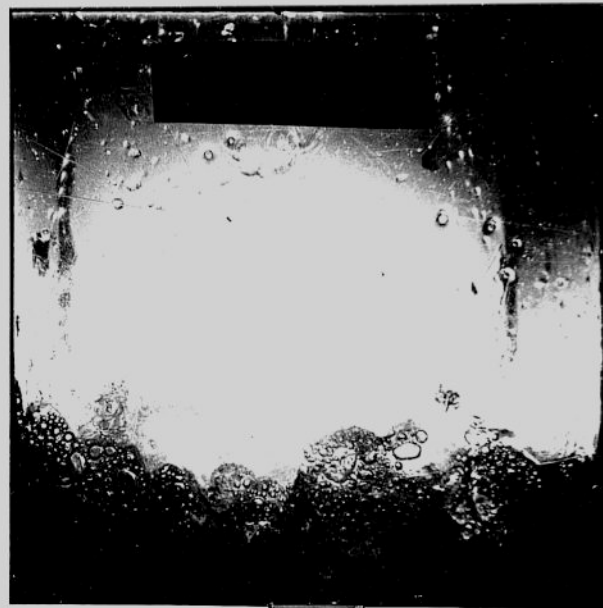
- wpływ własności pianotwórczych cieczy /ZP, TP/ na hydrodynamicę kolumn z półkami przelewowymi.
- optymalizacja doboru własności pianotwórczych cieczy z punktu widzenia odpylania, hydrodynamiki i wymiany masy.

STRUKTURA PIANY NA PÓŁCE SITOWEJ

$\Gamma_A = 0,214$ $W_G = 1 \text{ m/s}$ $W_L = 0,002 \text{ m/s}$ $\text{H}_2\text{O} + \text{RDKAFENOL N8}$



$C = 0.0 \text{ kg/m}^3$



$C = 0.001 \text{ kg/m}^3$



$C = 0.002 \text{ kg/m}^3$

STRUKTURA PIANY NA PÓŁCE SITOWEJ

$\Gamma_A = 0,214$ $W_G = 1 \text{ m/s}$ $W_L = 0,002 \text{ m/s}$ $\text{H}_2\text{O} + \text{ROKAFENOL N 8}$



$C = 0,004 \text{ kg/m}^3$



$C = 0,01 \text{ kg/m}^3$



$C = 0,015 \text{ kg/m}^3$

9. LITERATURA

1. Amijan A.V. "Issledovaniya v oblasti reologii dvuchfaznoj peny" - "NEFTOPROM. DELO" 1971, 8, 14-17.
2. Anderson J.L., Quinn J.A. - "Bubble columns: flow transitions in the presence of trace contaminants" - "CHEM.ENG.SCI.". 1970, 25, 373-380.
3. Aleksandrov I.A. - "MASSOPEREDAČA PRI REKTIFIKACII I ABSORBCII MNOGOKOMPONENTNYCH SMESEJ" - Izd. "Chimija", Moskva, 1975.
4. Adamson A.W. - "CHEMIA FIZYCZNA POWIERZCHNI", PWN, Warszawa 1963.
5. Anastasiu S., Jelescu E. - "SRODKI POWIERZCHNIOWO-CZYNNE" WNT, Warszawa 1973.
6. Andrzejewski R., Gutowski W. - "FIZYCZNE WŁASNOSCI PYŁÓW" Wyd. "Śląsk", Katowice, 1968.
7. Burge H.L. - "Nitrogen oxide removal from gases" - GER. OFFEN. 2 238 883, 22.02.1973.
8. Bikerman J.J. - "Foam fractionation and drainage" - "SEPAR. SCI." 1972, 7,6, 647-651.
9. Brumbaugh K.H., Berg J.C. - "Effect of surface - active agents on a sieve plate distillation column" - "AIChE JOURNAL" 1973, 19, 5, 1078 - 1080.
10. Bozhov J., Elenkov D. - "The influence of surfactants on mass transfer, determined by the liquid boundary layer on plates without downcomers" - "INTERN. CHEM. ENG." 1967, 7, 2, 316 - 320.
11. Boyadzhiev L., Levich V.G., Krylov V.S. - "The effect of surface active materials on mass transfer in laminar film flow. I. Improvement of the theory of convective diffusion" - "INTERN. CHEM. ENG." 1968, 8, 393 - 396.

12. Bikerman J.J. - "FOAMS - THEORY AND INDUSTRIAL APPLICATION", Reinhold, New York, 1953.
13. Brian P.L.T., Vivian J.E., Mayr S.T. - "Cellular convection in desorbing surface tension - lowering solutes from water" "IND.ENG. CHEM., FUND." 1971, 10, 1, 75-83.
14. Blank M., Roughton F.J.W. - "The permeability of monolayers to carbon dioxide" - "TRANS. FARADAY SOC." 1960, 56, 12, 1832-1841.
15. Boyd D.P., Marchello J.M. - "Role of films and waves on gas absorption" - "CHEM.ENG.SCI." 1966, 21, 769 - 776.
16. Bockman D.D. - "Interfacial mass transfer" - "IND.ENG.CHEM. - FUND." 1969, 8, 1, 77-80.
17. Blank M. - "Monolayer permeability and the properties of natural membranes" - "J. PHYS. CHEM." 1962, 66, 1911 - 1918.
18. Blank M. - "An approach to a theory of monolayer permeation by gases" - "J. PHYS. CHEM." 1964, 68, 10, 2793 - 2800.
19. Baird M.H.I., Davidson J.F. - "Gas absorption by large rising bubbles" - "CHEM.ENG.SCI." 1962, 17, 87-93.
20. Brian P.L.T. - "The effect of Gibbs adsorption on Marangoni instability in penetration mass transfer" - "AIChE JOURNAL" 1972, 18, 3, 582-590.
21. Berg J.C., Acrivos A. - "The effect of surface active agents on convection cells induced by surface tension" - "CHEM. ENG. SCI." 1965, 20, 737 - 745.
22. Brian P.L.T. - "Effect of Gibbs adsorption on Marangoni instability" - "AIChE JOURNAL" 1971, 17, 4, 765 - 772.
23. Burgess J.M., Calderbank P.H. - "The measurement of bubble parameters in two-phase dispersions - II. The structure of sieve tray froths" - "CHEM.ENG.SCI." 1975, 30, 1107-1121.

24. Babaljan G.A. - "FIZIKO-CHIMIČESKIJE PROCESSY W DOBYČE NEFTI", Izd. "Nedra", Moskva, 1974.
25. Beitel A., Heideger W.J. - "Surfactant effect on mass transfer from drops subject to interfacial instability" - "CHEM. ENG. SCI." 1971, 26, 711-717.
26. Bozhov I., Elenkov D. - "On the effect of surface - active substances on the absorption rate of some gases" - "COMPT. REND. ACAD. BULG. SCI." 1963, 16, 3, 277-280.
27. Boyadzhiev L., Elenkov D., Boyadjiev H. "On the hydrodynamics of laminar liquid film containing surface - active agents" - "COMPT. REND. ACAD. BULG. SCI." 1964, 17, 10, 933-936.
28. Božov J., Elenkov D. "Vlijanie na povrchnostno - aktivnite veščestva v rchu masoprenasjaneto, opredeljano ot tečniya graničen sloj na tarelki bez prelivnici" - "IZV. INST. OBŠČ. NEORG. CHIM. B.A.N." 1966, 4, 173-180.
29. Burnett J.C., Himmelblau D.M. - "The effect of surface active agents on interphase mass transfer" - "AIChE JOURNAL" 1970, 16, 2, 185-193.
30. Blank M. - "The effect of vapors on monolayer permeability to carbon dioxide" - "J. PHYS. CHEM." 1961, 65, 1698-1703.
31. Boye Christensen G., Terjesen - "On the mechanism of interfacial resistance to mass transfer in liquid - liquid extraction" - "CHEM. ENG. SCI." 1958, 7, 222-228.
32. Boye - Christensen G., Terjesen S.G. - "On the action of surface active agents on mass transfer in liquid - liquid extraction" "CHEM. ENG. SCI." 1959, 9, 225-241.
33. Bakker C.A.P., van Buytensen P.M., Beek W.J. - "Interfacial phenomena and mass transfer" - "CHEM.ENG.SCI." 1966, 21, 1039-1046.

34. Brown A.H. - "Interfacial resistance to mass transfer in liquid - liquid systems" - "BRIT.CHEM. ENG." 1965, 10, 9, 622-626.
35. Bojadžiev Ch., Elenkov D. - "V"rchu chidrodinamikata na njakoi dvufazni tečenija. 3. Vlijanie na povrchnostno aktivnite veščestva" - IZV. OTDEL. CHIM.NAUK., B.A.N." 1969, 2, 4, 803-812.
36. Bojadžiev Ch., Elenkov D. - "V"rchu absorbcijata na gazove v larninaren tečen film, c"d"ržašč pov"rchnostno aktivni veščestwa" - "IZD.OTDEL.CHIM.NAUK., B.A.N." 1971, 4,2,165-171.
37. Calderbank P.H. - "Review series no 3. Gas absorption from bubbles" - "CHEM.ENGR." 1967, 45, 212, CE209 - CE233.
38. Caskey J.A., Barlage W.B. - "A study of the effect of soluble surfactants on gas absorption using liquid laminar jets" - "J. COLLOID INTERF. SCI." 1972, 41, 1, 52-62.
39. Calderbank P.H., Rennie J. - "The physical properties of foams and froths formed on sieve plates" - "TRANS. INSTN.CHEM. ENGRS" 1962, 40, 1, 3-12.
40. Červenka J., Kolář V. - "The structure and height of the gaseours - liquid mixture on sieve plates without downcomers" "CHEM.ENG.J." 1973, 6, 1, 45-49.
41. Calderbank P.H., Moo-Young M.B. - "The continuous phase heat and mass transfer properties of dispersions" - "CHEM.ENG.SCI." 1961, 16, 1/2, 39-54.
42. Červenka J., Kolář V. "Hydrodynamics of plate columns. VIII. The dry-plate pressure drop of sieve - plate separating columns". "COLL. CZECH. CHEM. COMM." 1973, 38, 10, 2891-2897.
43. Coughlin R.W. - "Surface resistance in transport from vapor to liquid" - "CHEM.ENG.SCI." 1967, 22, 1503-1511.

44. Chen D.H.T. "Correlation of interphase mass transfer coefficients for transport of gases through insoluble monolayers" "AIChE JOURNAL" 1969, 15, 4, 617-619.
45. Cullen E.J., Davidson J.F. - "The effect of surface active agents on the rate of absorption of carbon dioxide by water" - "CHEM.ENG.SCI." 1956, 6, 2, 49-56.
46. Calus W.F., Davies J.E. - "A new stabilizing index to correlate foam height" - "AIChE JOURNAL" 1974, 21, 3, 599-600.
47. Ciborowski J., Iwiński J. - "Uzuwanie aerozoli siarki w skrubrze Venturiego" - "PRZEM.CHEM." 1962, 41, 12, 719-723.
48. Cullen E.J., Davidson J.F. - "Absorption of gases in liquid jets" - "TRANS. FARADAY SOC." 1957, 53, 1, 113-120.
49. Chiang S.H., Toor H.L. - "Interfacial resistance in the absorption of oxygen by water" - "AIChE JOURNAL" 1959, 5, 2, 165-168.
50. Chiang S.H., Toor H.L. - "Mass transfer with interfacial adsorption methyl chloride into water" - "AIChE JOURNAL" 1960, 6, 4, 539-542.
51. Dolinskij A.A., Kigel' T.B., Korčinskij A.A. - "Nekotorye osobennosti gidrodinamiki i massobmena pri barbotirovanii /141-146/ TEPLOMASSOBMEN", Izd. "Naukova Dumka", Kiev. 1968,
52. Dankwerts P.V. - "GAZO-ŽIDKOSTNYJE REAKCII" , Izd. "Chimija", Moskva, 1973.
53. Davies J.T., Kilner A.A., Ratcliff G.A. - "The effect of diffusivities and surface films on rates of gas absorption" "CHEM.ENG.SCI". 1964, 19, 583-590.
54. Davies J.T., Rideal E.K. - "INTERFACIAL PHENOMENA" Academic Press, New York London, 1963,

55. Davies J.T. - "TURBULENCE PHENOMENA" , Academic Press,
New York London, 1972.
56. Davenport W.G., Richardson F.D., Bradshaw A.V. - "Spherical
cap bubbles in low density liquids" - "CHEM.ENG.SCI." 1967,
22, 1221-1235.
57. Davies J.T. - "Interfacial renewal" - "CHEM.ENG.PROGR."
1966, 62, 9, 89-94.
58. Davies J.T. - "Mass transfer and interfacial phenomena" -
"ADVAN. CHEM. ENG." 1963, 4, 1-50.
59. Davies J.T. "The importance of surfaces in chemical enginee-
ring" - "TRANS.INSTN.CHEM.ENGRS" 1960, 38, 289-293.
60. Davies J.T., Ritchie I.M., Southward D.C. - "Surface effects
in a rotating disk contactor" - "TRANS.INSTN. CHEM.ENGRS",
1960, 38, 331-334.
61. Defay R., Prigogine I., Bellemans A., Everett D.H. -
"SURFACE TENSION AND ADSORPTION", Longmans, Green Co. Ltd,
London 1966.
62. Davies J.T., Mayers G.R.A. - "The effect of interfacial
films on mass transfer rates in liquid - liquid systems" - "
"CHEM.ENG.SCI." 1961, 16, 55-66.
63. Downing A.L., Melbourne K.V., Bruce A.M. - "The effect of
contaminants on the rate of aeration of water" - "J.APPL.
CHEM." 1957, 7, 590-596.
64. Davies J.T., Khan W. - "Surface clearing by eddies" -
"CHEM.ENG.SCI." 1965, 20, 713-715.
65. Davis R.E., Acrivos A. - "The influence of surfactants on
on the creeping motion of bubbles" - "CHEM.ENG.SCI." 1966,
21, 681-685.

66. Defay R., Hammelen J.R. - "III. The importance of diffusion in the adsorption process of some alcohols and acids in dilute aqueous solutions" - "J. COLLOID SCI." 1959, 14, 411-418.
67. Duchin S.S., Bujkov M.V. - "Teorija dinamičeskogo adsorbcion-nogo sloja dvižuščichsja sferičeskich častic. II. Teorija dinamičeskogo adsorbcionnogo sloja puzyrka /Kapli/ pri čisle Reynoldsa $Re \ll 1$ i silnoj zatormožennosti poverchnosti" - "ŽURN. FIZ. CHIM." 1965, 39, 4, 913-920.
68. Duchin S.S., Derjagin B.V. - "K Kinetike prilipanija mineralnych častic k puzyrkam pri flotacii. V. Dviženie poverchnosti puzyrka pri silnoj ee zatormožennosti rastvorimym poverchnostnoaktivnym veščestvom" - "ŽURN. FIZ. CHIM." 1961, 35, 7, 1453 - 1457.
69. Davies J.T. "The effects of surface films in damping eddies at a free surface of a turbulent liquid" - "PROC. ROY. SOC." 1966, A290, 515-526.
70. Dil'man V.V., Akseľrod Ju. V., Chutorjanskij F.M. - "Vlijanije mežfaznych javlenij na process massoperedači v geterogennych sistemach gaz - židkost'." - "CHIM. PROM." 1976, 9, 53 /693/ - 55 /695/.
71. Duchin S.S. Derjagin V.B. - "K Kinetike prilipanija mineral'nych častic k puzyrkam pri flotacii. IV. Tormoženie poverchnosti puzyrka poverchnostnoaktivnymi veščestvami i ich raspredele-nie po ego poverchnosti" - "ŽURN. FIZ. CHIM." 1961, 35, 7, 1246-1256.
72. Dytnierskij Ju. I. - "Očistka gazov v kolonnych apparatach s plastinčatnymi i proval'nymi tarielkami" - SERIJA: "ENERGOTEKNOLOGIČESKIJE PROCESY V CHIMIČESKOJ PROMYŠLENNOSTI" Izd. NIITECHIM, Moskva, 1973.

73. Eagland D. - "Colloidal state" - "CONTEMP. PHYS." 1973, 14, 2, 119-148.
74. Elenkov D., Boyadzhiev Khr. - "Hydrodynamics and mass transfer in a nozzleless Venturi absorber. II. Absorption of sulfur dioxide in water and aqueous solutions of surfactants" - "INTERN. CHEM. ENG." 1967, 7, 2, 191-193.
75. Elenkov D. - "Vlijanie dobavok poverchnostnoaktivnykh veščestv na massopeređachu v sistemach gaz - židkost' i židkost' - židkost'" - "TEORET. OSN. CHIM. TECHNOL." 1967, 1, 2, 158-175.
76. Elenkov D., Božov J. - "Vlijanie primesej s poverchnostno-aktivnom povedenijem na gidrodinamiku setčatych proval'nykh tarelok" - "DOKL. BOLG. AKADEM. NAUK" 1964, 17, 8, 733-736.
77. Eckenfelder W.W., Barnhart E.L. - "The effect of organic substances on the transfer of oxygen from air bubbles in water" - "AIChE JOURNAL" 1961, 7, 4, 631-634.
78. England D.C., Berg J.C. - "Transfer of surface - active agents across a liquid - liquid interface" - "AIChE JOURNAL" 1971, 17, 2, 313 - 322.
79. Engibarjan S.N., Tarat E.Ja., Muchlenov I.P., Bartov A.T. - "O strukture i miežfaznoj poverchnosti sistem gaz - židkost' /g-ž/ i gaz - židkost' - tverdye /g-ž-t/ obrazujuščichsja v pennnykh apparatach" - "ŽURN. PRIKL. CHIM." 1970, 43, 5, 1178-1182.
80. Elenkov D., Kolev N. - "Issledovanie vlijanija penoobrazujuščich veščestv na gidrodinamiku skruberov" - "CHIM. PROM." 1962, 10, 61 /761/ - 64 /764/.
81. Elenkov D., Kolev N. - "Vlijanie dobavok s poverchnostno - aktivnym povedenijem na kontrolirovannyj židkostnym pograničnym sloem massoobmen v skrubberach /nasadočnykh kolonnach/" -

- "IZV.INST.OBŠČ.NEORG.CHIM., B" LG. AKAD.NAUK." 1965, 3, 119-127.
82. Elenkov D., Kolev N. - "Izsledovane na vlijaniето na primesite s pov" rchnostno aktivni otnasjanija /peniteli/ v"rchu maso-obmena v koloni s p"lnež, kontroliran ot gazovija graničen sloj" - "IZV.INST.OBŠČ.NEORG.CHIM.B"LG.AKAD.NAUK." 1965, 3, 129-135.
83. Elzinga E.R. Banchero J.T. - "Some observatons on the mechanics of drops in liquid - liquid systems" - "AICHH JORUNAL" 1961, 7, 3, 394-399.
84. Emmert R.E., Pigford R.L. - "A study of gas absorption in falling liquid films" - "CHEM.ENG.PROGR." 1954, 50, 2, 87-93.
85. Elenkov D., Boyadjiev Chr., Boyadzhiev L. - "The role of surface - active agents in masstransfer" - "BULG.ACAD.SCI., COMM. DEP.CHEM." 1969, 2, 3, 527-537.
86. Elenkov D., Balarew C. - "Effect of certain surface active agents of the sodium alkylsulphate type on the rate of absorption" - "COMPT.REND.ACAD.BULG.SCI." 1963, 16, 2, 153-156.
87. Elenkov D., Vulchev L. - "Effect of soluble surface - active agents on entrainment of liquid in sieve plate columns" - "COMPT.REND.ACAD.BULG.SCI." 1968, 21, 6, 545-548.
88. Elenkov D., Ikonopisov S., Nankov N. - "Vlijanie na povrchnostno aktivnite veščestva v"rchy skorossta na absorbcija na seren dvoukis v"v voda pri statični uslovija" - "GOD.CHIM.technol. INST." 1962, 9, 2, 17-26.
89. Elenkov D., Bojadžiev Ch. "Chidrodinamika i massoobmen v bezdjuzen absorber "Venturi". II. Absorbciya na seren dvoukis s voda i vodni raztvori na pov"rchnostno-aktivni veščestwa" - "IZV.INST.OBŠČ.NEORG.CHIM.,B"LG.AKAD.NAUK." 1966, 4, 167-172.
90. Fürst H., Nitsch W. - "Zur Frage des Grenzflächenwiderstandes bei der physikalischen Gasabsorption" - "CHEMIE - ING. - TECHNOL."

- 1970, 42, 3, 108,123.
91. Frumkin A., Levič V. - "O vlijanii poverchnostno - aktivnykh veščestv na dviženie na granice židkich sred" - "ŽURN.FIZ. CHIM." 1947, 21, 10, 1183-1204.
 92. Fedosov A.I. - "Tormoženie dviženija gazovykh puzyrkov poverchnostno - aktivnymi veščestvami pri umerennykh čislach Rejnołdsa" - "ŽURN.FIZ.CHEM." 1959, 33, 8, 1681-1686.
 93. Fedosov A.I. - "Vlijanie poverchnostno-aktivnykh veščestv na dviženie kapel' v židkostjach" - "ŽURN.FIZ.CHEM." 1956, 30, 1, 223-227.
 94. Gal-Or B., Klinzing G.E., Tavlarides L.L. - "Bubble and drop phenomena" - "IND.ENG.CHEM." 1969, 61, 2, 21-34.
 95. Grishina N.P. - "Effect of surfactants on the degree of foaming" - "TR. KAZAN.KHIM. - TEKHNOL. INST." 1971, 44, 19-22 /wg CA-1973-78-4-18040 h/.
 96. Grishina N.P. - "Distribution of surfactants in structured foam layers" - "TR. KAZAN.KHIM. - TEKHNOL.INST." 1972, 48, 107-110 /wg CA-1973-78-24-149195 k/.
 97. Grishina N.P. - "Effect of surfactants on the structure of dynamic foam" - "TR. KAZAN.KHIM.-TEKHNOL.INST." 1972, 48, 111-114 /wg CA-1973-79-2-10146 x/.
 98. Gal-Or B., Yaron I. - "Convective mass and heat transfer from size - distributed ensembles of drops, bubbles and solid particles" - "PROGR.HEAT MASS TRANSFER" 1972, 5, 309-326.
 99. Goldberg M., Rubin E. - "Mechanical foam breaking" - "IND. ENG.CHEM.PROC.DES.DEVELOP." 1967, 6, 2, 195-200.
 100. Gal-Or B., Walatka V., - "A theoretical analysis of some interrelationships and mechanism of heat and mass transfer in dispersions" - "AIChE JOURNAL" 1967, 13, 4, 650-657.

101. Gal-Or B., Waslo S. - "Hydrodynamics of an ensemble of drops or bubbles, in the presence or absence of surfactants" - "CHEM.ENG.SCI." 1968, 23, 1431-1446.
102. Gal-Or B., Padmanabhan L. - "Coupled energy and multicomponent mass transfer in dispersions and suspensions with residence time and size distributions" - "AIChE JOURNAL" 1968, 14, 5, 709-714.
103. Gal-Or B., Hoelscher H.E. - "A mathematical treatment of the effect of particle size distribution on mass transfer in dispersions" - "AIChE JOURNAL" 1966, 12, 3, 499-508.
104. Goodridge F., Robb I.D. - "Mechanism of interfacial resistance in gas absorption" - "IND.ENG.CHEM.FUND." 1965, 4, 1, 49-55.
105. Grohse E.W., Stark J. - "Grid type plates... mass transfer characteristics" - "CHEM.ENG.PROGR." 1963, 59, 11, 72-78.
106. Goodridge F., Bricknell D.J. - "Interfacial resistance in the carbon dioxide - water system" - "TRANS.INSTN.CHEM.ENGRS." 1962, 40, 1, 54-60.
107. Garner F.H., Hale A.R. - "Effect of surface active agents in liquid extraction processes" - "CHEM.ENG.SCI." 1953, 2, 157-163.
108. Guthrie R.I.L., Bradshaw A.V. - "Spherical capped gas bubbles rising in aqueous media" - "CHEM.ENG.SCI." 1973, 28, 1, 191-203.
109. Griffith R.M. - "The effect of surfactants on the terminal velocity of drops and bubbles" - "CHEM.ENG.SCI." 1962, 17, 1057-1070.
110. Garner F.H., Skelland A.H.P. - "Effects of surface active agents on extraction from droplets" - "IND.ENG.CHEM." 1956, 48, 1, 51-58.

111. Gorodetskaja A.V. - "Skorost' podnjatja puzyrkov v vode i vodnych rastvorach pri bol'sich čislach Rejnol'dsa" - "ŽURN. FIZ.CHIM." 1949, 23, 1, 71-77.
112. Garner F.H., Skelland A.H.P. - "Some factors affecting droplet behaviour in liquid - liquid systems" - "CHEM.ENG.SCI." 1955, 4, 4, 149-158.
113. Garner F.H., Hammerton D. - "Circulation inside gas bubbles" - "CHEM.ENG.SCI." 1954, 3, 1, 1-11.
114. Griffith R.M. - "Mass transfer from drops and bubbles" - "CHEM.ENG.SCI." 1960, 12, 198-213.
115. Gaudin A.M. - "FLOTACJA", Wyd. "Śląsk", Katowice, 1963.
116. Huppke G.P. - "Apparatus for separating impurities from a gas" GER. OFFEN. 2, 250 828, 26.04.1973.
117. Haas P.A., Johnson H.F. - "Foam columns for countercurrent surface - liquid extraction of surface - active solutes" - "AIChE JOURNAL" 1965, 11, 2, 319-324.
118. Haas P.A., Johnson H.F. - "A model and experimental results for drainage of solution between foam bubbles" - "IND.ENG. CHEM., PROC. DES. DEVELOP." 1967, 6, 2, 225-233.
119. Ho G.E., Prince R.G.H. - "Characteristics of cellular foam on perforated plates" - "V.D.I. BERICHTE" 1972, 182, 79-89.
120. Hoffer M.S., Rubin E. - "Flow regimes of stable foams" - "IND.ENG.CHEM., FUNDAM." 1969, 8, 3, 483-490.
121. Ho G.E., Muller R.L., Prince R.G.H. - "Characterisation of two-phase flow patterns in plate columns" - "I.CHEM.E., SYMP. SER." 1969, 32, 2:10 - 2:21.
122. Ho G.E., Prince R.G.H. - "Plate efficiency - the effect of bubble size distribution on the liquid phase efficiency" - "CHEM.ENG.SCI." 1968, 23, 948-950.

123. Haas P.A. - "Engineering development of a foam column for countercurrent surface - liquid extraction of surface - active solutes" - ORNL - 3527, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, June 1965.
124. Hawke J.G., White I. - "An activation energy for the transport of carbon dioxide through a monolayer of hexadecanol at the air - water interface" - "J. PHYS.CHEM." 1966, 70, 10, 3369-3370.
125. Huang W.S., Kintner R.C. - "Effect of surfactants on mass transfer inside drops" - "AIChE JOURNAL" 1969, 15, 5, 735-744.
126. Hawke J.G., Parts A.G. - "A coefficient to characterize gaseous diffusion through monolayers at the air/water interface" - "J. COLLOID SCI." 1964, 19, 448-456.
127. Hammerton D., Garner F.H. - "Gas absorption from single bubbles" - "TRANS.INSTN.CHEM.ENGRS." 1954, 32, SUPPL., S18-S24.
128. Harper J.F. - "The motion of bubbles and drops through liquids" - "ADV.APPL.MECH." 1972, 12, 59-129.
129. Harper J.F. "On spherical bubbles rising steadily in dilute surfactant solutions" - "QUART. J. MECH.APPL.MATH." 1974, 27, 1, 87-100.
130. Hayashi T., Koide K., Sato T. - "Bubbles generated from porous plate in organic solutions and aqueous solutions of organic substances" - "J.CHEM.ENG.JAPAN", 1975,8,1,16-20.
131. Hites F., Ormos Z. - "Investigation of the fluid mechanics of foam columns" - "PROC. 2 CONF. APPL.PHYS.CHEM." /Veszprem, 1971/, 1971, 2, 159-166.
132. Harvey E.A., Smith W. - "The absorption of carbon dioxide by a quiescent liquid" - "CHEM.ENG.SCI." 1959,10, 274-280.

133. Holm A., Terjesen S.G. - "The effect of a surface - active agent on mass transfer in a stirred liquid - liquid extractor" - "CHEM.ENG.SCI." 1954, 3, 265-268.
134. Horton T.J., Fritsch T.R., Kintner R.C. - "Experimental determination of circulation velocities inside drops" - "CANAD.J.CHEM.ENG." 1965, 43, 143-146.
135. Hughmark G.A. - "Point efficiencies for tray distillation" - "CHEM. ENG. PROGR." 1965, 61, 7, 97-100.
136. Housch R. - "Tensidostrukturen und ihre technische anwendung" - "TENSIDE - DETERGENTS" 1975, 12, 2, 81-92.
137. Hansen R.S., Wallace T.C. - "The kinetics of adsorption of organic acids at the air - water interface" - "J. PHYS.CHEM." 1959, 63, 1085-1091.
138. Harper J.F., Moore D.W., Pearson J.R.A. - "The effect of the variation of surface tension with temperature on the motion of bubbles and drops" - "J.FLUID.MECH." 1967, 27, 2, 361-366.
139. Hobler T. - "Dyfuzyjny ruch masy i absorber" - WNT, Warszawa 1976.
140. Ishii T., Johnson A.I. - "Mass transfer without and with chemical reaction in dispersed gas - liquid two - phase flow" - "CANAD. J. CHEM.ENG." 1970, 48, 56-63.
141. Instytut Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej Politechniki Wrocławskiej - RAPRT Nr R-70/71, "Odpylające i transportujące układy pianowe laboratoryjne, Etap I, II, III.
142. Instytut Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej - RAPORT Nr R-84/74 i R-64/75 - "Urządzenia do absorpcji szkodliwych składników gazów w ruchomym złożu piany trwałej".

143. Javorsky B.S. - "Gas cleaning with the foam scrubber" - "FILTRATION SEPARATION" 1972, 9, 2, 173-175.
144. Jacobi W.M., Woodcock K.E., Grove C.S. - "Theoretical investigation of foam drainage" - "IND.ENG.CHEM." 1956, 48, 11, 2046-2051.
145. Javorski B.S. - "Facilitation of the reaction between liquids and gases by foaming" - "GER.OFFEN." 2231, 911, 1.02.1973.
146. Jackson J. - "Gas cleaning by the foam method" - "BRIT.CHEM.ENG." 1963, 8, 5, 319-321.
147. Jameson G.J., del Cerro M.C.G. - "Theory for the equilibrium contact angle between a gas, a liquid and a solid" - "J. CHEM. SOC., FARADAY TRANS." 1976, 72, 4, 883-895.
148. Johns L.E., Beckmann R.B., Ellis W.B. - "Fundamentals of mass transfer in liquid - liquid extraction" - "BRIT.CHEM.ENG." 1965, 10, 2, 86-92.
149. Juda J., Chrosciel S. - "OCHRONA POWIETRZA ATMOSFERYCZNEGO", WNT, Warszawa 1974.
150. Javorskij I.A., Terebenin A.N., Bykov A.P., "ULAVLIVANIE AERO-ZOLEJ V OLOVJANNOJ PROMYŠLENNOSTI" Izd."Nauka", Novosibirsk, 1974.
151. Juda J. - "POMIARY ZAPYLENIA I TECHNIKA ODPYLANIA" WNT, Warszawa 1974.
152. Kajl M. - "Środki powierzchniowo-czynne. Budowa chemiczna, klasyfikacja, własności" - "POLLENA" 1972, 16, 3, 3-18.
153. Kiyoshi K. - "Scrubbing of air pollutants with surfactants foams" - JAPAN KOKAI 7, 300, 271, 5.01.1973.
154. Konieczny G., Wyczałkowski W. - "Oczyszczanie gazu w ruchomym złożu piany trwałej" - PRACE NAUKOWE Instytutu Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej, nr 23", Seria: Studia i Materiały nr 10, Wrocław 1974.
155. Kumar R., Kuloor N.R. - "Formation of bubbles and drops" - "ADVAN. CHEM.ENG." 1970, 8, 255-368.
156. Koch R., Kuciel E. - "Wymiana masy na półkach rusztowych bezprzelewowych" - "CHEM.STOS." 1969, 6, 1B, 69-89.

157. Koltunova L.N., Pozin L.S. - "Rasčet gazosoderžanija pennogo sloja na proval'nych tarelkach" - "CHIM.PROM." 1975, 6, 53 /453/ - 55 /455/.
158. Koch R., Kuciel E., - "II. Obliczanie kolumn z półkami rusztowymi" - "NAJN. ROZW. KONSTR. W BUD. AP. CHEM." 1965/66, 72 41-67.
159. Koide K., Hayashi T., Sumino K., Iwamoto S. "Mass transfer from single bubbles in aqueous solutions of surfactants" - "CHEM.ENG.SCI." 1976, 31, 10, 963-967.
160. Koide K., Orito Y., Hara Y. - "Mass transfer from single bubbles in newtonian liquids" - "CHEM.ENG.SCI." 1974, 29, 417-425.
161. Koval' Ž.A., Bezpalov A.V., Kulešov O.G., Afanasova J.J. Ul'janov A.T. - "Massootdača v židkoj faze na tarelkach proval'nogo tipa s bol'sim svobodnym sečeniem" - "CHIM.PROM." 1976, 9, 51 /691/ - 53 /693/.
162. Kabsch P. - "Metody badania zwilżalności pyłów" - Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, nr 28", Seria: Monografie nr 7, Wrocław, 1976
163. Kuciel E. - "Obliczanie liczby półek kolumn bezprzelewowych z uwzględnieniem rzeczywistego modułu napędowego" - "CHEM. STOS." 1969, 6, 4B, 435-441.
164. Kintner R.C. - "Drop phenomena affecting liquid extraction" - "ADVAN. CHEM. ENG." 1963, 4, 52-94.
165. Kuźkin S.F., Colman A.M. - "FLOTACIJA IONOV I MOLEKULA", Izd. "Nedra", Moskva, 1971.
166. Kenning D.B.R. - "The effect of surface energy variations on the motion of bubbles and drops" - "CHEM.ENG.SCI." 1969, 24, 1385-1386.

167. Kaldor T.G., Phillips C.R. - "Aerosol scrubbing by foam" - "IND.ENG.CHEM., PROC.DES.DEVELOP." 1976, 15, 1, 199-206.
168. Lemlich R. - "Some physical aspects of foam" - "J. SOC. COSMET. CHEM." 1972, 23, 6, 299-311.
169. Lane J.E. - "Surface models": A short history" - "PROC. ROY. AUSTRALIAN CHEM.INST." 1973, 40, 4, 99-104.
170. Lemlich R. - "Adsorptive bubble separation methods" - "IND.ENG.CHEM." 1968, 60,10, 16-29.
171. Leonard R.A., Lemlich R. - "A study of interstitial liquid flow in foam Part I II." - "AIChE JOURNAL" 1965, 11, 1, 18-29.
172. Lowry R.P., van Winkle M. - "Foaming and frothing related to system physical properties in a small perforated plate distillation column" - "AIChE JOURNAL" 1969, 15, 5, 665-670.
173. Lemlich R. - "ADSORPTIVE BUBBLE SEPARATION TECHNIQUES", Academic Press, New York London, 1972.
174. Levič V.G. - "FIZIKO - CHIMIČESKAJA GIDRODINAMIKA", Izd. AN SSSR, Moskva, 1959.
175. Leonov L.F., Prochorov P.S. - "Vlijanie poverchnostnoaktiv-^{na} nych veščestv isparenije melkich vodjanykh kapel' - "IZV. AKAD. NAUK. SSR, SER. CHIM." 1967, 4, 735-742.
176. Leonard J.H., Houghton G. - "Mass transfer and velocity of rise phenomena for single bubbles" - "CHEM.ENG.SCI." 1963, 18, 133-142.
177. Lee J.C., Meyrick D.L. - "Gas-liquid interfacial areas in salt solutions in an agitated tank" - "TRANS. INSTN CHEM. ENGRS" 1970, 48, T37-T45. .
178. Lindland P.K., Terjesen S.G. - "The effect of a surface - active agent on mass transfer in falling drop extraction" "CHEM. ENG. SCI." 1956, 5, 1, 1-12.

179. Levan M.D., Newman J. - "The effect of surfactant on the terminal and interfacial velocities of a bubble or drop" - "AIChE JOURNAL" 1976, 22, 4, 695 - 701.
180. Lochiel A.C. - "The influence of surfactants on mass transfer around spheres" - "CANAD. J.CHEM.ENG." 1965, 43, 40-44.
181. Lucassen - Reynders E.H. - "Adsorption of surfactant monolayers at gas/liquid and liquid/liquid interfaces" - "PROGR. SURF. MEMBR. SCI." 1976, 10, 253 - 360.
182. Linton M., Sutherland K.L. - "The solution of oxygen through a monolayer" - "AUSTRAL. J. APPL. SCI." 1958, 9, 18-23.
183. Lynn S., Straatemeier J.R., Kramers H. - "Absorption studies in the light of the penetration theory. I II: Long and short wetted wall columns" - "CHEM.ENG.SCI." 1955, 4, 2, 49-57, 58-62.
184. LaMer V.K. - "RETARDATION OF EVAPORATION BY MONOLAYERS", Academic Press, New York 1962.
185. van der Meer D. - "Foam stabilisation in small and large bubble columns" - "VDI BERICHTE" 1972, 182, 99-108.
186. Moo-Young M., Shoda M. - "Gas absorption rates at the free surface of a flowing water stream. Effect of a surfactant and of surface baffles" - "IND.ENG.CHEM., PROC.DES.DEVELOP." 1973, 12, 4, 410 - 414.
187. Metzner A.B., Brown L.F. - "Mass transfer in foams" - "IND. ENG.CHEM." 1956, 48, 11, 2040-2045.
188. Medrow R.A. - "An application of bubble shape theory to the determination of air transfer through adsorbed surface films - J. COLLOID INTERF. SCI." 1972, 41, 1, 175-177.
189. Meijboom F.W., Vogtlander J.G. - "The influence of surface - active agents on the mass transfer from gas bubbles in a liquid - I" - "CHEM.ENG.SCI." 1974, 29, 3, 857-861.

190. Mysels K.J., Shinoda K., Frankel S. - "SOAP FILMS", STUDIES OF THEIR THINNING", Pergamon Press, New York, 1959.
191. Morikawa A., Keii T. - "Change of interfacial tension during mass transfer - II. Evaporation rate of alcohols from aqueous pendant drop" - "CHEM.ENG.SCI". 1967, 22, 127-133.
192. Mancy K.H., Okun D.A. - "The effects of surface active agents on aeration" - J. WATER POLL. CONTR. FED." 1965, 37, 2, 212-227.
193. Mori K., Sano M. - "Effect of surface active agents on convection and mass transfer" - "KINET. METALL. PROC. STEEL., PROC. INT. CONF." Dusseldorf, 1975, 492-512 /wg CA-1976 - 84-6-33198h/.
- ✓ 194. Manev E.D., Vassilieff Ch.S., Ivanov I.B. - "Hydrodynamics of thin liquid films. Effect of surface diffusion on the rate of thinning of foam films" - "COLLOID POLYMER SCI." 1976, 254, 99-102.
195. Maini B.B. - "The effect of surface active agents on mass transfer in agitated gas - liquid dispersions" 1976, Univ. Washington /wg Ca-1976-85-24-179596d/.
196. Mirev D., Elenkov D., Balarev C. - "Effect of certain surface active agents on the rate of absorption" - "COMPT. REND.ACAD.BULG.SCI." 1961, 14, 4, 349-352.
197. Merson R.L., Quinn J.A. - "Stagnation in a fluid interface: Properties of the stagnant film" - "AIChE JOURNAL" 1965, 11, 3, 391-395.
198. Mayers G.R.A. - "The correlation of individual film coefficients of mass transfer in a stirred cell" - "CHEM.ENG.SCI." 1961, 16, 69-75.

199. Mancy K.H., Okun D.A. - "Effects of surface active agents on bubble aeration" - "J. WATER POLL. CONTR. FED." 1960, 32, 4, 351 - 364.
200. Melrose J.C. - "Thermodynamic aspect of capillarity" - "IND. ENG. CHEM." 1968, 60, 3, 53-70.
201. Materiały konferencyjne "NOWOCZESNE KIERUNKI W DZIEDZINIE OCZYSZCZANIA GAZÓW PRZEMYSŁOWYCH METODAMI MOKRYMI" - Wyd. "S.I.T.P.H." Katowice, 1969.
202. Nitsch W. - "Über die Hemmung der Stoffübertragung durch grenzflächenaktive Komponenten" - "CHEMIE - ING. TECHN." 1968, 40, 8, 390-392.
203. Nonhebel G. - "GAS PURIFICATION PROCESSES FOR AIR POLLUTION CONTROL", Newness-Butterworths, London, 1972.
204. Newman J. - "Retardation of falling drops" - "CHEM.ENG.SCI." 1967, 22, 83-85.
205. Nysing T.O., Kramers H. - "Absorption of CO_2 in carbonate-bicarbonante buffer solutions in a wetted wall column" - "CHEM.ENG.SCI." 1958, 8, 81-89.
206. Otto W., Schügerl K. - "Einfluss von grenzflächenaktiven Stoffen auf den Stoffübergang an der Phasengrenze flüssig-flüssig" - "CHEMIE - ING. - TECHN." 1973, 45, 8, 563-566.
207. Ościk J. - "ADSORPCJA", PWN, Warszawa 1973.
208. Oprogramowanie maszyny cyfrowej ODRA 1304. Analiza statystyczna. WZE ELWRO, NR 13108, czerwiec 1972.
209. Prigorodov V.N. - "Kriterij ocenki ustojčivosti pen i metod ego opredelenija" - "KOLLOID. Ž." 1971, 33, 3, 459-463.

210. Porter K.E., Davies B.T., Wong P.F.Y. - "Mass transfer and bubble sizes in cellular foams and froths" - "TRANS.INSTN. CHEM.ENGRS." 1967, 45, T265-T273.
211. Princen H.M., Overbeek J.Th. G., Mason S.G. - "The permeability of soap films to gases. II. A simple mechanism of monolayer permeability" - "J. COLLID. INTERF. SCI." 1967, 24, 125-130.
212. Plevan R.E., Quinn J.A. - "The effect of monomolecular films on the rate of gas absorption into a quiescent liquid" - "AICHE JOURNAL" 1966, 12, 5, 894-902.
213. Pritchard C.L., Biswas S.K. - "Effect of surface impurities on the evaporation of drops in free fall" - "INDIAN CHEM. ENG." 1967, 9, T154-T160.
214. Princen H.M., Mason S.G. - "The permeability of soap films to gases" - "J. COLLOID SCI." 1965, 20, 353-375.
215. Przondo J. - "Przegląd niejonowych środków powierzchniowo-czynnych produkowanych w NZPO "Rokita" - "POLLENA" 1973, 17, 6, 299-309.
216. Park U.Sun - "Effect of surface active agents on liquid - liquid interfacial mass transfer" 1974, Univ. Washington /wg CA-1975-82-16-103592 s/.
217. Pozin M.E., Muchlenov I.P., Demšin V.Ja - "Vlijanije svojstv pyli na ulavlivaniye ee iz gazov pennym sposobom" - ŽURN. PRIKL.CHIM." 1955, 28, 8, 841-488.
218. POLSKA NORMA PN-66/C-04801 "Środki powierzchniowo-czynne. Oznaczanie własności pianotwórczych.
219. Posner A.M., Alexander A.E. - "The kinetics of adsorption from solution to the air/water interface" - "J.COLLOID SCI." 1953, 8, 6, 575-592.

220. POLSKA NORMA PN-65/M-53950 "Pomiar natężenia przepływu płynów za pomocą zwężek".
221. Pozin M.E., Muchlenow I.P., Tarat E.J. - "PIANOWE OCZYSZCZALNIKI GAZU, WYMIENNIKI CIEPŁA I ABSORBERY", WNT, WARSZAWA 1962.
222. Ross S. - "Bubbles and foam" - "IND.ENG.CHEM." 1969, 61, 10 48-57.
223. Rubin E., LaMantia Ch.R., Gaden E.L. - "Properties of dynamic foam columns" - "CHEM.ENG.SCI." 1967, 22, 1117-1125.
224. Rubin E., Golt M. - "Foam breaking with a high speed rotating disk" - "IND.ENG.CHEM., PROC.DES.DEVELOP." 1970, 9,2,341-344.
225. Rennie J., Smith W. - "A photographic study of the formation and properties of large gas bubbles and their breakdown into froths" - "AIChE - I.CHEM.E. SYMP.SER." 1965, 6, 6:67 - 6:73, /London: Instn. Chem. Engrs./.
226. Rennie J., Evans F. - "The formation of froths and foams above sieve plates" - "BRIT.CHEM.ENG." 1962, 7, 7, 498-502.
227. Rodionov A.I., Šabdanbekov U. - "K voprosu o vlijanii poverchnostnoaktivnyh veščestv na gidrodinamiku gazo-židkostnoj sistemy i na poverchnost' kontakta faz na sitčatoj tarelke" - "TRUDY MOSK.CHIM.technol.INST." 1970, 65, 183-186.
228. Rodionov A.I., Radikovskij V.M. - "Massopereдача через жидкую фазу на провалной тарелке в присутствии пoverchnostnoaktivnyh veščestv" - "ŽURN.RPIKL.CHIM." 1962, 35, 8, 1709-1714.
229. Rodionov A.I., Radikovskij V.M. - "Ispytanie provalnoj sitčanoj tarelki v prisutstvii poverchnostnoaktivnyh veščestv" - "TRUDY MOSK.CHEM.technol.INST." 1963, 40, 61-65.
230. Rodionov A.I., Šabdanbekov U. - "Vlijanie poverchnostnoaktivnyh veščestv na poverchnost' kontakta faz na sitčanoj peretočnoj tarelke" - "IZV.VYS.UČEB.ZAVED,CHIM.CHIM.technol." 1971, 14, 11, 1742-1745.

231. Ruckenstein E. - "Effect of surface active agents on turbulent mass transfer" - "REV.ROUMANIE CHIM." 1966, 11, 1427-1435.
232. Redwine D.A., Flint E.M., van Winkle M. - "Froth and foam height studies" - "IND.ENG.CHEM.PROC.DES.DEVELOP." 1967, 6, 4, 525-532.
233. Resnick W., Gal-Or B. - "Gas-liquid dispersions" - "ADVAN. CHEM.ENG." 1968, 7, 295-395.
234. Raymond D.R., Zieminski S.A. - "Mass transfer and drag coefficients of bubbles rising in dilute aqueous solutions" - "AIChE JOURNAL" 1971, 17, 1, 57-65.
235. Raimondi P., Toor H.L. - "Interfacial resistance in gas absorption" - "AIChE JOURNAL" 1959, 5, 1, 86-92.
236. Ruckenstein E. - "On mass transfer in the continuous phase from spherical bubbles or drops" - "CHEM.ENG.SCI." 1964, 19, 131-146.
237. Ruckenstein E. - "Effect of surface active agents on the mass transfer in falling liquid films" - "CHEM.ENG.SCI." 1965, 20, 853-856.
238. Ruckenstein E. - "On the mechanism of mass transfer between a continuous phase and another one dispersed in it. I. Interfacial resistance" - "REV.CHIM." 1961, 6, 221-234.
239. Ramm V.M. - "ABSORBCIJA GAZOV", Izd. "Chimija", Moskva, 1966.
240. Rusanov A.I. - "POVERCHNOSTNYJE JAVLENIJA V ŽIDKOSTJACH", Izd. Leningrad. Universiteta, Leningrad, 1975.
241. Sasvári G., Hites F., Blickle T. - "A study of dynamic foams" "ACTA CHIM.ACAD.SCI.HUNG." 1971, 70, 4, 395-412.
242. Skole R. - "Swedish scrubber a hit at British Meeting" - "CHEM.ENG." 1973, 80, 25, 60F - 60H.
243. Shedlovsky L. - "Interface properties of detergent films" - "IND.ENG.CHEM." 1968, 60, 10, 47-52.

244. Shih F.S., Lemlich R. - "A study of interstitial liquid flow in foam Part III." - "AIChE JOURNAL" 1967, 13, 4, 751-754.
245. Strobel W.J., Whitaker S. - "The effect of surfactants on the flow characteristics of falling liquid films" - "AIChE JOURNAL" 1969, 15, 4, 527-532.
246. Sakata K.E., Berg J.C. - "Surface diffusion in monolayers" "IND.ENG.CHEM.,FUND." 1969, 8, 3, 570-575.
247. Sada E., Himmelblau D.M. - "Transport of gases through insoluble monolayers" - "AIChE JOURNAL" 1967, 13, 5, 860-865.
248. Sharma M.M., Danckworts P.V. - "Chemical methods of measuring interfacial area and mass transfer coefficients in two - fluid systems" - "BRIT.CHEM.ENG." 1970, 15, 4, 522 /206/ - 528 /212/.
249. Sharma M.M., Mashelkar R.A., Mehta V.D. - "Mass transfer in plate columns" - "BRIT.CHEM.ENG." 1969, 14, 1, 70 /37/ - 76/43/.
250. Springer T.G., Pigford R.L. - "Influence of surface turbulence and surfactants on gas transport through liquid interfaces" - "IND.ENG.CHEM., FUND." 1970, 9, 3, 458-465.
251. Scheludko A. - "CHEMIA KOLOIDOW", WNT, Warszawa 1969.
252. Sharma M.M., Gupta R.K. - "Mass transfer characteristics of plate columns without downcomers" - "TRANS.INSTN.CHEM. ENGRS" 1967, 45, T169-T175.
253. Smith J.H., Quinn E.L. - "Absorption rates of carbon dioxide in sodium carbonate solutions" - "IND.ENG.CHEM." 1941, 33, 9, 1129-1131.
254. Sherwood T.K., Holloway F.A.L. - "Performance of packed towers - experimental studies of absorption and desorption liquid film data for several packings" - "TRANS.AM.INST.CHEM.ENG." 1940, 36, 21-70.

255. Steiner L., El Rasheed A.R. El Awad - "Mass transfer in a froth" - "VERFAHRENSTECHNIK" 1974, 8, 11, 327-329.
256. Shih Y., Coughanowr D.R. - "Evaporation of liquid droplets containing surface impurities" - "AIChE JOURNAL" 1968, 14, 3, 502-504.
257. Sideman S., Hortacsu O., Fulton J.W. - "Mass transfer in gas - liquid contacting systems" - "IND.ENG.CHEM." 1966, 58, 7, 32-47.
258. Schechter R.S., Farley R.W. - "Mass transfer and interfacial phenomena" - "BRIT.CHM.ENG." 1963, 8, 1, 37-42.
259. Sawistowski H. - "Surface - tension - induced interfacial convection and its effect on rates of mass transfer" - "CHEMIE - ING. - TECHN." 1973, 45, 18, 1093-1098.
260. Sawistowski H. - "Influence of mass - transfer - induced Marangoni effects on magnitude of interfacial area and equipment performance in mass transfer operations" - "CHEMIE- ING. TECHN." 1973, 45, 18, 1114 - 1117.
261. Schechter R.S., Farley R.W. - "Interfacial tension gradients and droplet behavior" - "CANAD. J. CHEM.ENG." 1963, 41, 103-107.
262. Skelland A.H.P., Caenepeel C.L. - "Effects of surface - active agents on mass transfer during droplet formation, fall and coalescence" - "AIChE JOURNAL" 1972, 18, 6, 1154-1163.
263. Saville D.A. - "The effects of interfacial tension gradients on the motion of drops and bubbles" - "CHEM.ENG.J." 1973, 5, 251-259.
264. Sum-Šik L.E. - "Gazosoderžanie i vysota dvuchfaznogo sloja na barbotážnych tarelkach" - "CHIM. TECHNOL. TOPLIV. MASEL" 1976, 2, 37-40.
265. Sternling C.V., Scriven L.E. - "Interfacial turbulence:

- Hydrodynamic instability and the Maragnoni effect" - AICHE JOURNAL" 1959, 5, 4, 514-523.
266. Scriven L.E., Pigford R.L. - "On phase equilibrium at the gas-liquid interface during absorption" - "AICHE JOURNAL" 1958, 4, 4, 439-444.
267. Schick M.J. - "NONIONIC SURFACTANTS" VOL.1, Marcell Decker Inc., New York, 1967.
268. Savic P. - "Circulation and distortion of liquid drops falling through a viscous medium", NAT. RES.COUNC.CAN., DIV.MECH.ENG. REP. MT-22, 1953.
269. Scriven L.E., Sternling C.V. - "On cellular convection driven by surface tension gradients. Effect of mean surface tension and surface viscosity" - "J. FLUID MECH." 1964, 19, 321-340.
270. Skelland A.H.P., Huang Y.F. - "Effect of surface active agents on fall velocities of drops" - "CAN.J.CHEM.ENG." 1977, 55, 3, 240-245.
271. Szarawara J. - "TERMODYNAMIKA CHEMICZNA", WNT, Warszawa 1969.
272. Shabdanbekov U. - "Effect of anionic surfactant on the hydraulic indexes of a contact apparatus with a sieve plate" - "TR.FRUNZ.POLITEKH.INST." 1974, 79, 58-63 /wg CA-1977-86-24-173617 k/.
273. Smith D.B. - "DESIGN OF EQUILIBRIUM STAGE PROCESSES" - "CHEMICAL ENGINEERING SERIES", McGraw-Hill Book Co. Inc.
274. Tavlarides L.L., Coulaloglou C.A., Zeitlin M.A., Klinzing G.E., Gal-Or B. - "Bubble and drop phenomena" - "IND.ENG.CHEM." 1970, 62, 11, 6-27.
275. Ternowskaja A.N., Belopol'skij A.P. - "Absorbcija gazov v prisutstvii poverchnostno-aktivnych veščestv. I. Vlijanie poverchnostno-aktivnych veščestv na skorost' absorbcii sernistogo gaza vodoj" - "ŽURN.FIZ.CHIM." 1950, 24, 1, 43-57.

276. Ternovskaja A.N., Belopol'skij A.P. - "Absorbcija gazov v prisutstvii poverchnostno-aktivnych veščestv. II. O roli adsorbcionnoj plenki poverchnostno-aktivnogo veščestva v absorbcionnom processe" - "ŽURN.FIZ.CHIM." 1950, 24, 8, 981-987.
277. Thompson D.W. - "Effect of interfacial mobility on mass transfer in gas-liquid systems" - "IND.ENG.CHEM.FUNDAM." 1970, 9, 2, 243-248.
278. Ternovskaja A.N., Belopol'skij A.P. - "Absorbcija gazov v prisutstvii poverchnostno-aktivnych veščestv. III. O mehanizme vlijanija poverchnostno-aktivnych veščestv na skorost' absorbicii" - "ŽURN.FIZ.CHIM." 1952, 26, 8, 1090-1096.
279. Ternovskaja A.N., Belopol'skij A.P. - "Absorbcija gazov v prisutstvii poverchnostno-aktivnych veščestv. IV. Vlijanie poverchnostno-aktivnych veščestv na skorost' absorbicii CO_2 i NH_3 vodoj" - "ŽURN.FIZ.CHIM." 1952, 26, 8, 1097-1102.
280. Timson W.J., Dunn C.G. - "Mechanism of gas absorption from bubbles under shear" - "IND.ENG.CHEM." 1960, 52, 9, 799-802.
281. Tichomirov V.K. - "PENY- TEORIJA I PRAKTIKA ICH POLUČENIJA I RAZRUŠENIJA", Izd. "Chimija", Moskva, 1975.
282. Tailby S.R., Portalski S. - "The optimum concentration of surface active agents for the suppression of ripples" - "TRANS.INSTN CHEM.ENGRS" 1961, 39, 328-336.
283. Tarat E.Ja., Val'dberg A. Ju., Zajcev M.M. - "O mehanizme processa pylavlevanija v pennnych apparatach s polnym protekaniem židkosti čerez otverstija rešetok" - "TEORET. OSN.CHIM:TECHNOL." 1970, 4, 3, 393-399.
284. Thorsen G., Terjesen S.G. - "On the mechanism of mass transfer in liquid - liquid extraction" - "CHEM.ENG.SCI." 1962, 17, 137-148.

285. Udani L.H., Gordon K.F. - "Interfacial resistance due to thin films of alcohols and its effect on the rate of evaporation of water" - "AIChE JOURNAL" 1959, 5,4, 510-513.
286. Vochten R. - "Physicochemical properties of saponin solutions and stability factors of their gas-liquid dispersions" - "VERH. KON. VLAAM. ACAD. WETENSCH., LETT. SCHONE KUNSTEN BELG. KL. WETENSCH." 1971, 33 /118/, 1-146.
287. Veber V., Pauček M. - "Hodnocení metod k měření pěnovosti" - "CHEM.PRŮM." 1973, 23, 4, 181-184.
288. Vogtländer J.G., Meijboom F.W. - "Influence of surfactants on the mass transfer from gas bubbles in a liquid - II" - "CHEM.ENG.SCI." 1974, 29, 4, 949-955.
289. Vogtländer J.G., Meijboom F.W. - "A new method for measuring the transfer of oxygen in liquids. Measurements of oxygen transfer from bubbles in water and water + 1 - butanol" - "CHEM.ENG.SCI." 1974, 29, 3, 799-803.
290. Vulchev L., Elenkov D. - "Effect of soluble surface - active agents on the entrainment of liquid in bubble - cap plate columns" - "COMPT.REND.ACAD.BULG.SCI." 1968, 21, 7, 657-660.
291. Weissman E.Y., Calvert S. - "Mass transfer in horizontally moving stable aqueous foams" - "AIChE JOURNAL" 1965, 22, 2, 356-363.
292. Weissman E.Y., Calvert S. - "Flow characteristics of horizontally moving stable aqueous foams" - "AIChE JOURNAL" 1967, 14, 4, 788-792.
293. West F.B., Gilbert W.D., Shimizu T. - "Mechanism of mass transfer on bubble plates. Plate efficiencies" - "IND.ENG. CHEM." 1952, 44, 10, 2470-2478.

294. Whitaker S., Pigford R.L. - "Response of a gas-liquid interface to concentration pulses" - "AIChE JOURNAL" 1966, 12, 4, 741-746.
295. Wasserman M.L., Slattery J.C. - "Creeping flow past a fluid globule when a trace of surfactant is present" - "AIChE JOURNAL" 1969, 15, 4, 533-547.
296. Weber M.E. - "The effect of surface active agents on mass transfer from spherical cap bubbles" - "CHEM.ENG.SCI." 1975, 30, 12, 1507 - 1510.
297. Whitaker S. - "Effect of surface active agents on the stability of falling liquid films" - "IND.ENG.CHEM., FUND." 1964, 3, 2, 132-142.
298. West F.B., Herrman A.J., Chong A.T., Thomas L.E.K. - "Addition agents and interfacial barriers in liquid - liquid extraction" - "IND.ENG.CHEM." 1952, 44, 3, 625-631.
299. Wilke C.R. - "MODERN CHEMICAL ENGINEERING. VOL.1 - PHYSICAL OPERATIONS", Reinhold Publishing Corp., New York, 1963.
300. Ward A.F., Tordai L. - "Time dependence of boundary tensions of solutions. I. The role of diffusion in time effects" - "J. CHEM.PHYS." 1946, 14, 7, 453-461.
301. Vojuckij S.S. - "KURS KOLLOIDNOJ CHMII", Izd. "Chimija", Moskva, 1975.
302. Wyczałkowski W. - "Badania procesu niszczenia pian trwałych w cyklonach" - Praca doktorska w Instytucie Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej. Promotor - prof. dr hab. inż. R. Koch.
303. Yen V.Nguyen, Phillips C.R. - "Calculation of surface excess" - "CANAD. J. CHEM.ENG." 1974, 52, 4, 541-542.

304. Zieminski S.A., Lessard R.R. - "Effect of chemical additives on performance of an air-water contactor" - "IND.ENG.CHEM., PROC.DES. DEVELOP." 1969, 8, 1, 69-75.
305. Zuiderweg F.J., Harmens A. - "The influence of surface phenomena on the performance of distillation columns" - "CHEM. ENG.SCI." 1958, 9, 2/3, 89-103.
306. Zieminski S.A., Whittemore R.C. - "Behavior of gas bubbles in aqueous electrolyte solutions" - "CHEM.ENG.SCI." 1971, 26, 509-520.
307. Zieminski S.A., Caron M.M., Blackmore R.B. - "Behavior of air bubbles in dilute aqueous solutions" - "IND. ENG. CHEM. FUND." 1967, 6, 2, 233-242.
308. Zieminski S.A., Goodwin C.C., Hill R.L. - "The effect of some organic substances on oxygen absorption in bubble aeration" "TAPPI" 1960, 43, 12, 1029-1034.
309. Zimon A.D. - "ADGEZIJA ŽIDKOSTI I SMAČIVANIJE", Izd. "Chimija", Moskva, 1974.
310. Zimon A.D. - "ADGEZIJA PYLI I POROŠKOV", Izd. "Chimija", Moskva, 1976.

Tabela 10.1. Napięcie powierzchniowe /statyczne/ i własności pianotwórcze wodnych roztworów
Rokafenolu N8 /M = 572 kg/kmol/ w temperaturze 20 °C

Nr roztw.	Stężenie		Logarytm stężenia		Napięcie powierz. σ	Wysokość piany H_{RM}				Trwa- łość piany TP -	Uwagi
	C_m	C_M	$\ln C_M$	$\lg C_M$		$\tau=0$	$\tau=1mm$	$\tau=5mm$	$\tau=10mm$		
	kg/m ³	kmol/m ³				mm	mm	mm	mm		
1	0,0	0,0	-16,118	-7,000	72,750	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
2	0,00025	0,000000437	-14,643	-6,359	70,157	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
3	0,001	0,000001748	-13,257	-5,757	67,642	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
4	0,002	0,000003496	-12,564	-5,456	64,151	15,7	0,0	0,0	0,0	0,0	
5	0,004	0,000006993	-11,871	-5,155	60,858	16,7	0,0	0,0	0,0	0,0	
6	0,005	0,000008741	-11,647	-5,058	57,952	18,3	9,0	0,0	0,0	0,0	
7	0,01	0,00001748	-10,954	-4,757	53,852	21,3	13,0	8,0	5,7	0,438	
8	0,015	0,00002622	-10,549	-4,581	50,077	26,7	20,3	16,0	13,0	0,640	
9	0,0157	0,00002745	-10,503	-4,561	49,082	27,0	21,3	18,3	15,7	0,737	
10	0,025	0,00004371	-10,038	-4,359	45,696	32,7	26,0	23,3	20,7	0,796	
11	0,04	0,00006993	-9,568	-4,155	41,077	35,3	30,3	29,0	27,7	0,914	
12	0,05	0,00008741	-9,345	-4,058	39,696	36,7	31,7	29,0	27,7	0,874	
13	0,06	0,0001049	-9,163	-3,979	37,944	38,7	35,0	31,7	29,3	0,837	
14	0,1	0,0001748	-8,652	-3,757	36,788	45,3	39,3	36,7	34,0	0,865	
15	0,105	0,0001836	-8,603	-3,736	34,952	47,0	41,3	38,7	36,7	0,888	
16	0,2	0,0003496	-7,959	-3,456	32,675	58,0	50,0	48,0	43,0	0,860	
17	0,5	0,0008741	-7,042	-3,058	32,135	80,3	74,0	69,0	65,0	0,878	
18	1,0	0,0017482	-6,349	-2,757	32,133	98,0	87,0	82,5	76,0	0,874	
19	2,0	0,0034965	-5,656	-2,456	32,130	103,0	117,0	94,3	90,0	0,874	

Tabela 10.2. Napięcie powierzchniowe /statyczne/ i własności pianotwórcze wodnych roztworów
Rokanolu /M = 626 kg/kmol/ w temperaturze 20 °C

Nr roztw.	Stężenie		Logarytm stężenia		Napięcie powierz. mN/m	Wysokość piany H_{RM}				Trwałość piany TP	Uwagi
	C_m	C_M	$\ln C_M$	$\lg C_M$		$\tau=0$	$\tau=1\text{min}$	$\tau=5\text{min}$	$\tau=10\text{min}$		
	kg/m ³	kmol/m ³			σ	mm	mm	mm	mm	-	
1	0,0	0,0	-16,118	-7,000	72,750	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
2	0,0005	0,000000799	-14,040	-6,098	68,203	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
3	0,005	0,000007987	-11,749	-5,098	56,801	19,3	0,0	0,0	0,0	0,0	
4	0,015	0,00002396	-10,642	-4,620	49,145	29,3	19,7	15,7	14,0	0,711	
5	0,04	0,0000639	-9,660	-4,195	39,503	51,7	41,7	38,0	36,7	0,880	
6	0,2	0,0003195	-8,049	-3,495	33,717	76,0	68,3	60,3	54,7	0,801	
7	0,5	0,0007987	-7,133	-3,098	33,238	90,0	80,2	74,3	67,7	0,844	

Tabela 10.3. Parametry pracy kolumny w punkcie zalania

	PÓŁKA			GAZ		CIECZ							
	d_o	t_o	r_A	w_G	w_{Go}	C_m	$20^{\circ}C$	H_{RM0}	H_{RM1}	H_{RM10}	TP	L_m	
	mm	mm	-	m/s	m/s	kg/m ³	mN/m	m	m	m	-	kg/m ² s	
1	8,0	18,75	0,150	3,0	20,0	0,0	72,75	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	
2	8,0	18,75	0,150	3,0	20,0	0,01	53,852	0,0213	0,0130	0,0057	0,438	4,0	
3	8,0	18,75	0,150	3,0	20,0	0,015	50,077	0,0267	0,0203	0,0130	0,640	2,0	
4	8,0	18,75	0,150	1,0	6,66	0,025	45,696	0,0327	0,0260	0,0207	0,796	4,0	
5	8,0	18,75	0,150	2,0	13,3	0,025	45,696	0,0327	0,0260	0,0207	0,796	2,0	
6	5,0	10,0	0,214	4,0	18,7	0,025	45,696	0,0327	0,0260	0,0207	0,796	4,0	
7	8,0	18,75	0,150	2,0	13,3	0,04	41,077	0,0353	0,0303	0,0277	0,914	1,0	
8	8,0	18,75	0,150	3,0	20,0	0,04	41,077	0,0353	0,0303	0,0277	0,914	1,0	
9	5,0	10,0	0,214	4,0	18,7	0,04	41,077	0,0353	0,0303	0,0277	0,914	3,0	
10	8,0	18,75	0,150	2,0	13,3	0,05	39,696	0,0367	0,0317	0,0277	0,874	1,0	
11	5,0	10,0	0,214	3,0	14,0	0,05	39,696	0,0367	0,0317	0,0217	0,874	4,0	
12	8,0	18,75	0,150	1,0	6,66	0,06	37,944	0,0387	0,0350	0,0293	0,837	2,0	
13	8,0	18,75	0,150	2,0	13,3	0,06	37,944	0,0387	0,0350	0,0293	0,837	0,5	
14	8,0	18,75	0,150	2,0	13,3	0,1	36,788	0,0453	0,0393	0,0340	0,865	0,25	

Tab.40.4. Wyniki badań hydrodynamiki płatek sitowych.
UKŁAD: POWIETRZE - WODA - ROKAFENOL N8.

NR	ρ_a	C_m	t	σ	π_{wzgl}	ZP	TP	W_c	W_L	m_L	Δp	Δp_f	h_0	H_f	e_{mg}
—	kg/m ³	—	°C	N/m	—	m	—	m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg
1	0,132	0,000	21,30	0,07251	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00012	0,027	245,	106,	0,012	0,055	0,0000
2	0,132	0,000	21,30	0,07248	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00020	0,155	255,	116,	0,013	0,055	0,0000
3	0,132	0,000	21,30	0,07248	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00040	0,311	275,	136,	0,014	0,050	0,0000
4	0,132	0,000	21,33	0,07251	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00059	0,467	304,	156,	0,015	0,050	0,0000
5	0,132	0,000	21,40	0,07250	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00080	0,633	314,	175,	0,015	0,050	0,0000
6	0,132	0,000	21,37	0,07247	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00100	0,789	324,	185,	0,017	0,055	0,0000
7	0,132	0,000	21,17	0,07253	0,0000	0,0000	0,000	1,63	0,00015	0,077	343,	127,	0,010	0,050	0,0000
8	0,132	0,000	21,00	0,07247	0,0000	0,0000	0,000	1,63	0,00030	0,156	365,	146,	0,010	0,050	0,0000
9	0,132	0,000	20,77	0,07256	0,0000	0,0000	0,000	1,63	0,00060	0,312	382,	156,	0,010	0,105	0,0000
10	0,132	0,000	20,77	0,07259	0,0000	0,0000	0,000	1,63	0,00090	0,465	402,	186,	0,011	0,115	0,0000
11	0,132	0,000	21,27	0,07252	0,0000	0,0000	0,000	1,63	0,00121	0,626	422,	205,	0,011	0,125	0,0000
12	0,132	0,000	21,27	0,07244	0,0000	0,0000	0,000	1,63	0,00151	0,781	451,	235,	0,013	0,135	0,0000
13	0,132	0,000	20,87	0,07258	0,0000	0,0000	0,000	2,14	0,00020	0,077	412,	110,	0,004	0,100	0,0000
14	0,132	0,000	21,23	0,07252	0,0000	0,0000	0,000	2,14	0,00040	0,157	441,	140,	0,005	0,115	0,0000
15	0,132	0,000	21,23	0,07252	0,0000	0,0000	0,000	2,14	0,00080	0,314	481,	172,	0,006	0,135	0,0000
16	0,132	0,000	21,07	0,07255	0,0000	0,0000	0,000	2,14	0,00120	0,469	520,	218,	0,008	0,165	0,0000
17	0,132	0,000	21,00	0,07256	0,0000	0,0000	0,000	2,14	0,00160	0,628	588,	267,	0,012	0,190	0,0000
18	0,132	0,000	21,07	0,07255	0,0000	0,0000	0,000	2,14	0,00200	0,783	618,	316,	0,015	0,230	0,0000
19	0,132	0,000	21,17	0,07244	0,0000	0,0000	0,000	2,70	0,00025	0,078	537,	152,	0,002	0,120	0,0000
20	0,132	0,000	21,87	0,07243	0,0000	0,0000	0,000	2,70	0,00050	0,154	573,	171,	0,003	0,180	0,0000
21	0,132	0,000	21,83	0,07246	0,0000	0,0000	0,000	2,69	0,00100	0,309	655,	280,	0,007	0,240	0,0000
22	0,132	0,000	21,87	0,07246	0,0000	0,0000	0,000	2,70	0,00149	0,461	745,	339,	0,013	0,290	0,0000
23	0,132	0,000	21,70	0,07245	0,0000	0,0000	0,000	2,70	0,00201	0,621	804,	377,	0,018	0,320	0,0000
24	0,132	0,000	21,87	0,07246	0,0000	0,0000	0,000	2,70	0,00251	0,773	873,	456,	0,020	0,350	0,0000
25	0,132	0,000	20,77	0,07259	0,0000	0,0000	0,000	3,20	0,00030	0,078	585,	171,	0,001	0,200	0,0000
26	0,132	0,000	21,07	0,07255	0,0000	0,0000	0,000	3,12	0,00060	0,160	834,	337,	0,005	0,275	0,0000
27	0,132	0,000	21,37	0,07250	0,0000	0,0000	0,000	3,07	0,00120	0,322	751,	476,	0,013	0,320	0,0000
28	0,132	0,000	21,80	0,07244	0,0000	0,0000	0,000	3,05	0,00179	0,485	1029,	616,	0,020	0,420	0,0000
29	0,132	0,000	21,77	0,07241	0,0000	0,0000	0,000	3,08	0,00241	0,645	1225,	716,	0,027	0,460	0,0000
30	0,132	0,000	22,07	0,07259	0,0000	0,0000	0,000	2,25	0,00300	0,841	1422,	762,	0,030	0,500	0,0000
31	0,214	0,000	17,83	0,07304	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00012	0,027	137,	40,	0,005	0,050	0,0000
32	0,214	0,000	17,37	0,07311	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00020	0,155	157,	52,	0,005	0,050	0,0000
33	0,214	0,000	18,20	0,07294	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00044	0,348	167,	62,	0,007	0,055	0,0000
34	0,214	0,000	18,10	0,07300	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00059	0,464	177,	72,	0,007	0,060	0,0000
35	0,214	0,000	18,00	0,07302	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00080	0,628	185,	82,	0,008	0,060	0,0000
36	0,214	0,000	18,00	0,07302	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00099	0,774	194,	94,	0,008	0,065	0,0000
37	0,214	0,000	18,33	0,07297	0,0000	0,0000	0,000	1,62	0,00015	0,076	157,	25,	0,007	0,060	0,0000
38	0,214	0,000	18,23	0,07287	0,0000	0,0000	0,000	1,62	0,00031	0,159	167,	35,	0,007	0,060	0,0000
39	0,214	0,000	17,80	0,07283	0,0000	0,0000	0,000	1,63	0,00075	0,376	177,	65,	0,008	0,065	0,0000
40	0,214	0,000	18,83	0,07289	0,0000	0,0000	0,000	1,62	0,00090	0,465	195,	84,	0,008	0,060	0,0000
41	0,214	0,000	18,87	0,07288	0,0000	0,0000	0,000	1,62	0,00121	0,624	215,	94,	0,009	0,060	0,0000
42	0,214	0,000	18,00	0,07302	0,0000	0,0000	0,000	1,62	0,00148	0,762	235,	103,	0,009	0,070	0,0000
43	0,214	0,000	18,07	0,07292	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00020	0,077	205,	37,	0,005	0,050	0,0000
44	0,214	0,000	18,80	0,07290	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00040	0,154	215,	47,	0,006	0,055	0,0000
45	0,214	0,000	18,37	0,07293	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00080	0,313	245,	76,	0,006	0,065	0,0000
46	0,214	0,000	18,37	0,07293	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00120	0,468	255,	76,	0,007	0,075	0,0000
47	0,214	0,000	18,87	0,07292	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00160	0,627	275,	106,	0,008	0,070	0,0000
48	0,214	0,000	18,70	0,07291	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00198	0,772	284,	116,	0,008	0,075	0,0000
49	0,214	0,000	18,83	0,07292	0,0000	0,0000	0,000	2,68	0,00025	0,076	235,	21,	0,004	0,060	0,0000
50	0,214	0,000	17,23	0,07283	0,0000	0,0000	0,000	2,69	0,00049	0,152	265,	50,	0,004	0,070	0,0000
51	0,214	0,000	17,03	0,07286	0,0000	0,0000	0,000	2,68	0,00100	0,308	304,	89,	0,006	0,100	0,0000
52	0,214	0,000	17,17	0,07284	0,0000	0,0000	0,000	2,68	0,00148	0,457	314,	79,	0,006	0,110	0,0000
53	0,214	0,000	17,20	0,07283	0,0000	0,0000	0,000	2,68	0,00204	0,628	333,	112,	0,006	0,135	0,0000
54	0,214	0,000	17,30	0,07282	0,0000	0,0000	0,000	2,68	0,00247	0,762	343,	122,	0,007	0,140	0,0000
55	0,214	0,000	18,80	0,07290	0,0000	0,0000	0,000	3,21	0,00031	0,079	324,	50,	0,003	0,100	0,0000
56	0,214	0,000	17,13	0,07284	0,0000	0,0000	0,000	3,21	0,00060	0,155	343,	80,	0,003	0,110	0,0000
57	0,214	0,000	17,07	0,07285	0,0000	0,0000	0,000	3,20	0,00120	0,307	382,	120,	0,004	0,135	0,0000
58	0,214	0,000	17,33	0,07281	0,0000	0,0000	0,000	3,20	0,00179	0,458	392,	122,	0,005	0,150	0,0000
59	0,214	0,000	17,37	0,07281	0,0000	0,0000	0,000	3,20	0,00241	0,616	431,	152,	0,006	0,185	0,0000
60	0,214	0,000	17,43	0,07280	0,0000	0,0000	0,000	3,20	0,00296	0,759	451,	188,	0,008	0,215	0,0000
61	0,214	0,000	20,23	0,07268	0,0000	0,0000	0,000	3,42	0,00036	0,086	333,	42,	0,002	0,130	0,0000
62	0,214	0,000	20,17	0,07269	0,0000	0,0000	0,000	3,42	0,00070	0,169	373,	89,	0,002	0,170	0,0000
63	0,214	0,000	20,10	0,07270	0,0000	0,0000	0,000	3,42	0,00142	0,340	402,	118,	0,004	0,185	0,0000
64	0,214	0,000	20,00	0,07271	0,0000	0,0000	0,000	3,41	0,00210	0,505	441,	158,	0,005	0,220	0,0000
65	0,214	0,000	17,83	0,07274	0,0000	0,0000	0,000	3,38	0,00284	0,688	470,	210,	0,008	0,260	0,0000
66	0,214	0,000	17,80	0,07273	0,0000	0,0000	0,000	3,37	0,00346	0,841	532,	240,	0,009	0,290	0,0000
67	0,308	0,000	20,13	0,07269	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00012	0,027	88,	22,	0,003	0,060	0,0000
68	0,308	0,000	20,13	0,07260	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00020	0,156	78,	31,	0,003	0,065	0,0000
69	0,308	0,000	20,13	0,07260	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00040	0,311	108,	41,	0,004	0,068	0,0000
70	0,308	0,000	21,17	0,07244	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00059	0,468	108,	41,	0,004	0,068	0,0000
71	0,308	0,000	22,03	0,07240	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00080	0,634	127,	51,	0,004	0,070	0,0000
72	0,308	0,000	22,23	0,07237	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00100	0,791	137,	71,	0,004	0,070	0,0000
73	0,308	0,000	21,43	0,07249	0,0000	0,0000	0,000	1,63	0,00030	0,157	88,	6,	0,003	0,050	0,0000
74	0,308	0,000	22,20	0,07237	0,000										

Tab. 40.4. c.d.

NR	α	c_m	t	σ	π_{wzql}	ZP	TP	WG	WL	m_{10}	Δp	Δp_t	h_0	H_t	c_{mg}
	—	kg/m ³	°C	N/m	—	m	—	m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg
85	0.308	0.500	21.10	0.03209	0.5576	0.0807	0.868	1.07	0.00005	0.039	422.	382.	0.029	0.500	0.0000
86	0.308	0.500	20.90	0.03210	0.5577	0.0808	0.867	1.63	0.00007	0.038	510.	455.	0.038	0.500	0.0000
87	0.308	0.500	21.23	0.03209	0.5576	0.0802	0.868	2.14	0.00010	0.039	431.	382.	0.030	0.500	0.0000
88	0.308	0.500	21.90	0.03206	0.5573	0.0813	0.868	2.69	0.00012	0.039	324.	250.	0.017	0.500	0.0000
89	0.308	0.500	22.00	0.03205	0.5573	0.0813	0.868	3.21	0.00015	0.039	245.	150.	0.008	0.500	0.0000
90	0.308	0.500	20.57	0.03211	0.5578	0.0805	0.867	1.07	0.00010	0.077	481.	441.	0.040	0.500	0.0000
91	0.308	0.500	21.57	0.03207	0.5574	0.0811	0.868	1.63	0.00015	0.078	567.	514.	0.046	0.500	0.0000
92	0.308	0.500	22.17	0.03205	0.5572	0.0814	0.869	2.14	0.00020	0.077	510.	438.	0.035	0.500	0.0000
93	0.308	0.500	22.37	0.03204	0.5571	0.0815	0.869	2.69	0.00025	0.078	412.	318.	0.027	0.500	0.0000
94	0.308	0.500	22.50	0.03203	0.5571	0.0815	0.869	3.22	0.00030	0.078	324.	208.	0.015	0.500	0.0000
95	0.419	0.500	22.33	0.03204	0.5572	0.0815	0.869	1.07	0.00005	0.039	157.	131.	0.007	0.500	0.0000
96	0.419	0.500	22.57	0.03203	0.5571	0.0816	0.869	1.63	0.00007	0.039	177.	145.	0.007	0.500	0.0000
97	0.419	0.500	21.83	0.03206	0.5573	0.0812	0.868	2.14	0.00010	0.039	175.	158.	0.013	0.500	0.0000
98	0.419	0.500	22.40	0.03204	0.5571	0.0815	0.869	2.69	0.00012	0.039	275.	228.	0.016	0.500	0.0000
99	0.419	0.500	21.83	0.03206	0.5573	0.0812	0.868	3.21	0.00015	0.039	147.	72.	0.007	0.500	0.0000
100	0.419	0.500	21.07	0.03209	0.5576	0.0808	0.868	1.07	0.00010	0.077	78.	73.	0.005	0.500	0.0000
101	0.419	0.500	22.37	0.03204	0.5571	0.0815	0.869	1.63	0.00015	0.078	147.	115.	0.005	0.500	0.0000
102	0.419	0.500	22.50	0.03203	0.5570	0.0817	0.869	2.14	0.00020	0.079	177.	136.	0.007	0.500	0.0000
103	0.419	0.500	22.90	0.03202	0.5569	0.0818	0.869	2.69	0.00025	0.078	275.	228.	0.022	0.500	0.0000
104	0.419	0.500	22.67	0.03203	0.5570	0.0815	0.869	3.22	0.00030	0.078	255.	177.	0.014	0.500	0.0000
105	0.308	1.000	20.50	0.03211	0.5579	0.0983	0.864	1.07	0.00005	0.039	441.	402.	0.034	0.500	0.0000
106	0.308	1.000	20.83	0.03210	0.5577	0.0984	0.864	1.62	0.00010	0.079	520.	440.	0.043	0.500	0.0000
107	0.308	1.000	21.00	0.03210	0.5577	0.0985	0.864	1.62	0.00007	0.038	304.	247.	0.022	0.500	0.0000
108	0.308	1.000	21.33	0.03208	0.5575	0.0987	0.865	1.63	0.00015	0.038	373.	317.	0.027	0.500	0.0000
109	0.308	1.000	20.33	0.03212	0.5579	0.0982	0.864	2.13	0.00010	0.039	275.	202.	0.017	0.500	0.0000
110	0.308	1.000	20.83	0.03210	0.5577	0.0984	0.864	2.14	0.00020	0.078	343.	271.	0.023	0.500	0.0000
111	0.308	1.000	20.17	0.03213	0.5580	0.0981	0.864	2.68	0.00012	0.039	245.	152.	0.013	0.500	0.0000
112	0.308	1.000	20.50	0.03211	0.5579	0.0983	0.864	2.69	0.00025	0.077	304.	211.	0.017	0.500	0.0000
113	0.308	1.000	17.67	0.03215	0.5582	0.0978	0.863	3.20	0.00015	0.039	205.	70.	0.007	0.500	0.0000
114	0.308	1.000	20.00	0.03213	0.5580	0.0980	0.864	3.20	0.00030	0.077	284.	157.	0.013	0.500	0.0000
115	0.419	1.000	20.67	0.03211	0.5578	0.0983	0.864	1.07	0.00005	0.039	174.	171.	0.015	0.500	0.0000
116	0.419	1.000	21.27	0.03208	0.5576	0.0985	0.865	1.07	0.00010	0.077	422.	376.	0.032	0.500	0.0000
117	0.419	1.000	22.00	0.03205	0.5573	0.0970	0.865	1.63	0.00007	0.038	333.	302.	0.025	0.500	0.0000
118	0.419	1.000	21.07	0.03209	0.5576	0.0985	0.864	1.63	0.00015	0.078	373.	341.	0.025	0.500	0.0000
119	0.419	1.000	21.23	0.03209	0.5576	0.0985	0.865	2.14	0.00010	0.039	255.	216.	0.016	0.500	0.0000
120	0.419	1.000	21.23	0.03209	0.5576	0.0985	0.865	2.14	0.00020	0.078	304.	256.	0.023	0.500	0.0000
121	0.419	1.000	21.37	0.03208	0.5575	0.0987	0.865	2.69	0.00012	0.039	225.	177.	0.014	0.500	0.0000
122	0.419	1.000	21.27	0.03208	0.5576	0.0985	0.865	2.69	0.00025	0.078	275.	228.	0.017	0.500	0.0000
123	0.419	1.000	21.33	0.03208	0.5575	0.0987	0.865	3.21	0.00015	0.039	177.	121.	0.008	0.500	0.0000
124	0.419	1.000	21.33	0.03208	0.5575	0.0987	0.865	3.21	0.00030	0.077	225.	170.	0.013	0.500	0.0000
125	0.547	1.000	21.57	0.03207	0.5574	0.0988	0.865	1.07	0.00005	0.039	177.	158.	0.014	0.500	0.0000
126	0.547	1.000	21.00	0.03210	0.5577	0.0985	0.864	1.07	0.00010	0.077	175.	178.	0.017	0.500	0.0000
127	0.547	1.000	20.83	0.03210	0.5577	0.0984	0.864	1.63	0.00007	0.038	205.	155.	0.015	0.500	0.0000
128	0.547	1.000	18.67	0.03219	0.5586	0.0973	0.863	1.62	0.00015	0.078	225.	205.	0.017	0.500	0.0000
129	0.547	1.000	17.67	0.03215	0.5582	0.0978	0.863	2.13	0.00010	0.039	235.	214.	0.017	0.500	0.0000
130	0.547	1.000	20.17	0.03213	0.5580	0.0981	0.864	2.13	0.00020	0.078	284.	263.	0.022	0.500	0.0000
131	0.547	1.000	20.17	0.03213	0.5580	0.0981	0.864	2.68	0.00012	0.038	333.	307.	0.014	0.500	0.0000
132	0.547	1.000	20.17	0.03213	0.5580	0.0981	0.864	2.69	0.00025	0.077	353.	337.	0.021	0.500	0.0000
133	0.547	1.000	20.33	0.03212	0.5579	0.0982	0.864	3.20	0.00015	0.039	137.	111.	0.007	0.500	0.0000
134	0.547	1.000	20.50	0.03211	0.5579	0.0983	0.864	3.20	0.00030	0.077	225.	177.	0.013	0.500	0.0000
135	0.419	2.000	20.77	0.03210	0.5578	0.1174	0.866	1.07	0.00005	0.039	145.	151.	0.012	0.500	0.0000
136	0.419	2.000	21.77	0.03206	0.5573	0.1180	0.867	1.62	0.00007	0.039	147.	115.	0.005	0.500	0.0000
137	0.419	2.000	22.37	0.03204	0.5571	0.1182	0.867	2.13	0.00010	0.039	137.	77.	0.008	0.500	0.0000
138	0.419	2.000	21.30	0.03208	0.5576	0.1177	0.866	2.69	0.00012	0.039	147.	100.	0.005	0.500	0.0000
139	0.419	2.000	21.70	0.03207	0.5574	0.1177	0.866	3.21	0.00015	0.039	215.	150.	0.010	0.500	0.0000

Tab.10.4. c.d.

NR	T _A	C _m	t	σ	Π _{uzgl}	ZP	TP	W _G	W _L	m _{LG}	Δp	Δp _f	h ₀	H _f	e _{mg}
—	—	kg/m ³	°C	N/m	—	m	—	m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg
140	0.150	0.000	25.05	0.07194	0.0000	0.0000	0.000	1.08	0.00025	0.127	225.	117.	0.013	0.060	0.0000
141	0.150	0.000	25.40	0.07181	0.0000	0.0000	0.000	1.09	0.00050	0.325	245.	137.	0.014	0.065	0.0000
142	0.150	0.000	25.55	0.07186	0.0000	0.0000	0.000	1.09	0.00100	0.788	284.	176.	0.017	0.080	0.0000
143	0.150	0.000	25.57	0.07189	0.0000	0.0000	0.000	1.08	0.00200	1.575	343.	235.	0.020	0.105	0.0000
144	0.150	0.000	25.50	0.07187	0.0000	0.0000	0.000	1.09	0.00300	2.362	372.	284.	0.023	0.125	0.0000
145	0.150	0.000	25.47	0.07187	0.0000	0.0000	0.000	1.09	0.00400	3.149	431.	323.	0.027	0.140	0.0000
146	0.150	0.000	25.40	0.07188	0.0000	0.0000	0.000	1.08	0.00500	3.936	470.	382.	0.030	0.150	0.0000
147	0.150	0.000	24.47	0.07203	0.0000	0.0000	0.000	2.16	0.00025	0.028	333.	74.	0.002	0.070	0.0042
148	0.150	0.000	24.57	0.07204	0.0000	0.0000	0.000	2.16	0.00050	0.196	343.	103.	0.003	0.100	0.0044
149	0.150	0.000	24.60	0.07201	0.0000	0.0000	0.000	2.16	0.00100	0.392	363.	123.	0.008	0.105	0.0040
150	0.150	0.000	24.55	0.07196	0.0000	0.0000	0.000	2.16	0.00200	0.785	402.	152.	0.013	0.130	0.0031
151	0.150	0.000	24.85	0.07197	0.0000	0.0000	0.000	2.16	0.00300	1.177	510.	270.	0.017	0.175	0.0017
152	0.150	0.000	24.85	0.07197	0.0000	0.0000	0.000	2.16	0.00400	1.569	578.	358.	0.021	0.210	0.0014
153	0.150	0.000	24.77	0.07198	0.0000	0.0000	0.000	2.16	0.00500	1.961	628.	387.	0.024	0.240	0.0017
154	0.150	0.000	24.25	0.07206	0.0000	0.0000	0.000	3.26	0.00100	0.259	530.	116.	0.003	0.160	0.0147
155	0.150	0.000	24.27	0.07206	0.0000	0.0000	0.000	3.26	0.00200	0.518	603.	174.	0.003	0.230	0.0051
156	0.150	0.000	24.57	0.07204	0.0000	0.0000	0.000	3.26	0.00300	0.777	685.	273.	0.015	0.330	0.0043
157	0.150	0.000	24.50	0.07205	0.0000	0.0000	0.000	3.26	0.00400	1.036	765.	351.	0.024	0.380	0.0027
158	0.150	0.000	24.07	0.07209	0.0000	0.0000	0.000	3.26	0.00500	1.293	834.	420.	0.040	0.300	0.0051
159	0.150	0.000	24.07	0.07209	0.0000	0.0000	0.000	3.26	0.00500	1.293	834.	420.	0.040	0.300	0.0051
160	0.214	0.000	22.15	0.07238	0.0000	0.0000	0.000	1.09	0.00025	0.128	175.	78.	0.011	0.040	0.0000
161	0.214	0.000	22.15	0.07238	0.0000	0.0000	0.000	1.09	0.00050	0.326	206.	108.	0.011	0.045	0.0000
162	0.214	0.000	22.57	0.07235	0.0000	0.0000	0.000	1.09	0.00100	0.793	215.	118.	0.012	0.050	0.0000
163	0.214	0.000	22.50	0.07233	0.0000	0.0000	0.000	1.09	0.00200	1.585	225.	128.	0.013	0.050	0.0000
164	0.214	0.000	22.50	0.07233	0.0000	0.0000	0.000	1.09	0.00300	2.378	245.	147.	0.014	0.070	0.0000
165	0.214	0.000	22.47	0.07233	0.0000	0.0000	0.000	1.09	0.00400	3.170	245.	147.	0.015	0.075	0.0000
166	0.214	0.000	22.55	0.07232	0.0000	0.0000	0.000	1.09	0.00500	3.963	255.	157.	0.017	0.085	0.0000
167	0.214	0.000	22.80	0.07228	0.0000	0.0000	0.000	2.17	0.00025	0.099	235.	55.	0.008	0.055	0.0054
168	0.214	0.000	22.80	0.07228	0.0000	0.0000	0.000	2.17	0.00050	0.198	245.	75.	0.008	0.060	0.0052
169	0.214	0.000	22.77	0.07229	0.0000	0.0000	0.000	2.17	0.00100	0.397	265.	75.	0.009	0.075	0.0042
170	0.214	0.000	22.87	0.07227	0.0000	0.0000	0.000	2.17	0.00200	0.789	274.	124.	0.010	0.090	0.0033
171	0.214	0.000	22.27	0.07236	0.0000	0.0000	0.000	2.16	0.00300	1.184	314.	144.	0.010	0.100	0.0028
172	0.214	0.000	22.20	0.07237	0.0000	0.0000	0.000	2.16	0.00400	1.579	324.	154.	0.010	0.115	0.0025
173	0.214	0.000	22.15	0.07238	0.0000	0.0000	0.000	2.16	0.00500	1.974	343.	174.	0.011	0.125	0.0027
174	0.214	0.000	22.60	0.07231	0.0000	0.0000	0.000	3.27	0.00050	0.130	324.	58.	0.004	0.100	0.0111
175	0.214	0.000	22.57	0.07235	0.0000	0.0000	0.000	3.27	0.00100	0.261	333.	58.	0.005	0.130	0.0105
176	0.214	0.000	22.20	0.07237	0.0000	0.0000	0.000	3.27	0.00200	0.521	373.	108.	0.005	0.130	0.0098
177	0.214	0.000	22.05	0.07240	0.0000	0.0000	0.000	3.26	0.00300	0.782	382.	118.	0.005	0.175	0.0057
178	0.214	0.000	21.57	0.07241	0.0000	0.0000	0.000	3.26	0.00400	1.042	402.	137.	0.007	0.200	0.0055
179	0.214	0.000	21.85	0.07243	0.0000	0.0000	0.000	3.26	0.00500	1.303	431.	157.	0.008	0.215	0.0043
180	0.214	0.000	21.77	0.07244	0.0000	0.0000	0.000	3.26	0.00600	1.563	471.	206.	0.009	0.230	0.0044
181	0.214	0.000	25.50	0.07218	0.0000	0.0000	0.000	4.35	0.00200	0.390	471.	75.	0.002	0.230	0.0079
182	0.214	0.000	25.55	0.07220	0.0000	0.0000	0.000	4.34	0.00300	0.585	510.	134.	0.003	0.280	0.0028
183	0.214	0.000	25.17	0.07223	0.0000	0.0000	0.000	4.34	0.00400	0.780	557.	173.	0.005	0.310	0.0170
184	0.214	0.000	22.87	0.07227	0.0000	0.0000	0.000	4.34	0.00500	0.975	603.	233.	0.007	0.340	0.0150
185	0.214	0.000	22.85	0.07231	0.0000	0.0000	0.000	4.33	0.00600	1.169	637.	262.	0.010	0.370	0.0144

Tab.10.4. c.d.

NR	τ_a	C_m	t	σ	π_{mzgl}	ZP	TP	WG	WL	m_{LG}	Δp	Δp_f	h_0	H_f	e_{MG}
	—	kg/m ³	°C	N/m	—	m	—	m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg
186	0,308	0,000	21,40	0,07250	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00050	0,323	127	51,	0,007	0,050	0,0000
187	0,308	0,000	22,50	0,07236	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00100	0,789	137	71,	0,007	0,055	0,0000
188	0,308	0,000	22,55	0,07235	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00200	1,579	147	81,	0,010	0,060	0,0000
189	0,308	0,000	22,55	0,07232	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00300	2,370	157	100,	0,010	0,065	0,0000
190	0,308	0,000	22,65	0,07231	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00400	3,161	177	110,	0,011	0,065	0,0000
191	0,308	0,000	22,60	0,07228	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00500	3,953	185	120,	0,012	0,070	0,0000
192	0,308	0,000	23,05	0,07225	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00600	4,744	185	120,	0,015	0,070	0,0000
193	0,308	0,000	22,40	0,07234	0,0000	0,0000	0,000	1,08	0,00600	4,744	185	120,	0,015	0,070	0,0000
194	0,308	0,000	23,15	0,07223	0,0000	0,0000	0,000	2,16	0,00025	0,029	147	48,	0,007	0,045	0,0355
195	0,308	0,000	22,71	0,07226	0,0000	0,0000	0,000	2,16	0,00050	0,128	157	57,	0,007	0,050	0,0344
196	0,308	0,000	22,80	0,07228	0,0000	0,0000	0,000	2,16	0,00100	0,326	185	87,	0,007	0,055	0,0340
197	0,308	0,000	22,80	0,07228	0,0000	0,0000	0,000	2,16	0,00200	0,722	175	77,	0,010	0,065	0,0357
198	0,308	0,000	22,50	0,07231	0,0000	0,0000	0,000	2,16	0,00300	1,187	205	105,	0,011	0,075	0,0357
199	0,308	0,000	22,50	0,07231	0,0000	0,0000	0,000	2,16	0,00400	1,582	215	116,	0,011	0,080	0,0354
200	0,308	0,000	22,61	0,07227	0,0000	0,0000	0,000	2,16	0,00500	1,979	225	126,	0,015	0,085	0,0354
201	0,308	0,000	22,71	0,07229	0,0000	0,0000	0,000	2,16	0,00600	2,374	225	126,	0,015	0,090	0,0355
202	0,308	0,000	20,60	0,07262	0,0000	0,0000	0,000	3,24	0,00050	0,130	175	55,	0,005	0,100	0,0356
203	0,308	0,000	20,55	0,07263	0,0000	0,0000	0,000	3,24	0,00100	0,260	205	64,	0,005	0,120	0,0351
204	0,308	0,000	20,10	0,07270	0,0000	0,0000	0,000	3,24	0,00200	0,519	215	73,	0,007	0,150	0,0376
205	0,308	0,000	20,01	0,07270	0,0000	0,0000	0,000	3,24	0,00300	0,778	225	82,	0,007	0,160	0,0372
206	0,308	0,000	20,00	0,07271	0,0000	0,0000	0,000	3,24	0,00400	1,037	225	92,	0,007	0,165	0,0375
207	0,308	0,000	20,05	0,07271	0,0000	0,0000	0,000	3,24	0,00500	1,296	235	72,	0,007	0,185	0,0370
208	0,308	0,000	20,00	0,07271	0,0000	0,0000	0,000	3,24	0,00600	1,555	235	72,	0,008	0,190	0,0358
209	0,308	0,000	20,27	0,07267	0,0000	0,0000	0,000	3,24	0,00600	1,558	245	102,	0,008	0,185	0,0356
210	0,308	0,000	20,55	0,07263	0,0000	0,0000	0,000	4,31	0,00100	0,125	255	51,	0,004	0,220	0,0188
211	0,308	0,000	20,71	0,07269	0,0000	0,0000	0,000	4,31	0,00200	0,320	275	81,	0,005	0,255	0,0180
212	0,308	0,000	20,05	0,07271	0,0000	0,0000	0,000	4,31	0,00300	0,584	284	71,	0,005	0,240	0,0184
213	0,308	0,000	19,80	0,07274	0,0000	0,0000	0,000	4,31	0,00400	0,778	274	101,	0,005	0,240	0,0180
214	0,308	0,000	19,75	0,07275	0,0000	0,0000	0,000	4,31	0,00500	0,973	314	120,	0,005	0,245	0,0185
215	0,308	0,000	19,57	0,07278	0,0000	0,0000	0,000	4,30	0,00600	1,167	333	140,	0,005	0,250	0,0188
216	0,416	0,000	18,05	0,07301	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00100	0,779	88	48,	0,005	0,050	0,0300
217	0,416	0,000	18,15	0,07300	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00200	1,559	88	48,	0,005	0,055	0,0300
218	0,416	0,000	18,15	0,07300	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00300	2,338	78	57,	0,007	0,040	0,0300
219	0,416	0,000	18,17	0,07299	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00400	3,119	108	57,	0,008	0,050	0,0300
220	0,416	0,000	18,17	0,07299	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00500	3,898	118	77,	0,008	0,050	0,0300
221	0,416	0,000	18,15	0,07300	0,0000	0,0000	0,000	1,07	0,00600	4,678	127	87,	0,008	0,055	0,0300
222	0,416	0,000	18,75	0,07291	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00050	0,125	78	43,	0,007	0,050	0,0352
223	0,416	0,000	18,65	0,07292	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00100	0,320	108	55,	0,008	0,060	0,0351
224	0,416	0,000	18,47	0,07295	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00200	0,781	118	52,	0,008	0,065	0,0352
225	0,416	0,000	18,55	0,07294	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00300	1,171	118	52,	0,008	0,070	0,0350
226	0,416	0,000	18,57	0,07293	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00400	1,562	127	72,	0,007	0,080	0,0352
227	0,416	0,000	18,57	0,07293	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00500	1,953	137	82,	0,007	0,090	0,0340
228	0,416	0,000	18,60	0,07293	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00600	2,343	147	72,	0,007	0,100	0,0346
229	0,416	0,000	18,57	0,07296	0,0000	0,0000	0,000	2,13	0,00600	2,340	157	82,	0,008	0,090	0,0355
230	0,416	0,000	18,57	0,07288	0,0000	0,0000	0,000	3,25	0,00050	0,129	118	43,	0,005	0,120	0,0374
231	0,416	0,000	18,75	0,07291	0,0000	0,0000	0,000	3,25	0,00100	0,259	127	53,	0,005	0,130	0,0359
232	0,416	0,000	18,70	0,07291	0,0000	0,0000	0,000	3,25	0,00200	0,518	147	72,	0,007	0,140	0,0370
233	0,416	0,000	18,70	0,07291	0,0000	0,0000	0,000	3,25	0,00300	0,777	157	82,	0,007	0,160	0,0359
234	0,416	0,000	18,57	0,07292	0,0000	0,0000	0,000	3,25	0,00400	1,036	157	72,	0,007	0,165	0,0374
235	0,416	0,000	18,57	0,07292	0,0000	0,0000	0,000	3,25	0,00500	1,295	157	72,	0,005	0,175	0,0378
236	0,416	0,000	18,55	0,07294	0,0000	0,0000	0,000	3,25	0,00600	1,553	177	102,	0,005	0,200	0,0352
237	0,416	0,000	18,57	0,07288	0,0000	0,0000	0,000	3,26	0,00600	1,564	167	72,	0,007	0,190	0,0379
238	0,416	0,000	18,80	0,07290	0,0000	0,0000	0,000	4,35	0,00100	0,126	157	52,	0,005	0,250	0,0157
239	0,416	0,000	18,57	0,07292	0,0000	0,0000	0,000	4,35	0,00200	0,321	157	52,	0,005	0,260	0,0174
240	0,416	0,000	18,60	0,07293	0,0000	0,0000	0,000	4,35	0,00300	0,587	177	72,	0,005	0,270	0,0151
241	0,416	0,000	18,50	0,07294	0,0000	0,0000	0,000	4,35	0,00400	0,783	177	72,	0,004	0,300	0,0159
242	0,416	0,000	18,47	0,07295	0,0000	0,0000	0,000	4,35	0,00500	0,979	175	78,	0,005	0,310	0,0207
243	0,416	0,000	18,45	0,07295	0,0000	0,0000	0,000	4,35	0,00600	1,174	215	114,	0,005	0,320	0,0217
244	0,416	0,000	19,00	0,07286	0,0000	0,0000	0,000	4,34	0,00600	1,174	205	105,	0,005	0,320	0,0212
245	0,416	0,000	18,70	0,07288	0,0000	0,0000	0,000	4,35	0,00600	1,163	175	78,	0,005	0,320	0,0227
246	0,416	0,000	19,00	0,07286	0,0000	0,0000	0,000	4,35	0,00600	1,163	205	105,	0,007	0,310	0,0221
247	0,416	0,000	18,80	0,07290	0,0000	0,0000	0,000	4,35	0,00600	1,166	215	114,	0,007	0,320	0,0130

Tab. 40.5. Wyniki pomiarów desorpcji CO₂
UKŁAD: POWIETRZE - CO₂ - H₂O - ROKAFENOL NR

NR	r _a	C _m	t	δ	π _{wzgl}	ZP	TP	W _g	W _L	m _{LG}	Δp	Δp _f	h ₀	H _f	e _{mg}	N _L	N _{Lobl}	δ _{wzgl}
—	—	kg/m ³	°C	N/m	—	m	—	m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg	—	—	—
1	0,150	0,000	21,7	0,0724	0,000	0,000	0,000	1,07	0,00050	0,34	235	127	0,013	0,050	0,0000	13,74	13,38	-0,338
2	0,150	0,000	22,3	0,0723	0,000	0,000	0,000	1,08	0,00100	0,74	275	164	0,015	0,080	0,0000	11,34	12,72	-0,132
3	0,150	0,000	22,4	0,0724	0,000	0,000	0,000	1,07	0,00200	1,37	314	203	0,020	0,100	0,0000	6,33	8,70	-0,334
4	0,150	0,000	22,4	0,0724	0,000	0,000	0,000	1,08	0,00300	2,36	353	245	0,022	0,115	0,0000	4,68	5,78	-0,471
5	0,150	0,000	22,1	0,0724	0,000	0,000	0,000	1,08	0,00400	3,14	402	274	0,024	0,125	0,0000	4,17	5,77	-0,425
6	0,150	0,000	23,4	0,0722	0,000	0,000	0,000	2,16	0,00100	0,40	373	133	0,003	0,100	0,0000	11,05	17,71	-0,520
7	0,150	0,000	22,7	0,0723	0,000	0,000	0,000	2,16	0,00200	0,74	412	172	0,011	0,125	0,0000	7,23	12,26	-0,571
8	0,150	0,000	22,8	0,0723	0,000	0,000	0,000	2,16	0,00300	1,18	481	241	0,015	0,185	0,0000	7,05	7,83	-0,371
9	0,150	0,000	22,8	0,0723	0,000	0,000	0,000	2,16	0,00400	1,38	520	280	0,018	0,200	0,0000	5,82	8,40	-0,232
10	0,150	0,000	22,8	0,0723	0,000	0,000	0,000	2,16	0,00500	1,97	557	312	0,022	0,230	0,0000	6,24	7,45	-0,174
11	0,150	0,000	22,8	0,0723	0,000	0,000	0,000	2,17	0,00500	1,98	618	378	0,023	0,235	0,0000	4,03	7,43	-0,344
12	0,150	0,000	23,0	0,0722	0,000	0,000	0,000	3,28	0,00200	0,52	637	223	0,010	0,240	0,0000	9,87	15,00	-0,519
13	0,150	0,000	22,8	0,0723	0,000	0,000	0,000	3,29	0,00300	0,78	735	321	0,015	0,335	0,0000	11,75	12,01	-0,007
14	0,150	0,000	22,8	0,0723	0,000	0,000	0,000	3,29	0,00400	1,03	785	370	0,023	0,330	0,0000	10,67	10,27	0,360
15	0,214	0,000	21,8	0,0724	0,000	0,000	0,000	1,08	0,00050	0,34	157	52	0,010	0,040	0,0000	17,34	10,27	0,436
16	0,214	0,000	22,8	0,0723	0,000	0,000	0,000	1,08	0,00100	0,74	186	82	0,012	0,045	0,0000	7,85	7,14	0,372
17	0,214	0,000	22,3	0,0724	0,000	0,000	0,000	1,08	0,00200	1,38	206	108	0,013	0,050	0,0000	4,78	4,88	-0,020
18	0,214	0,000	22,1	0,0724	0,000	0,000	0,000	1,08	0,00300	2,36	226	129	0,015	0,070	0,0000	3,10	3,70	-0,250
19	0,214	0,000	22,1	0,0724	0,000	0,000	0,000	1,08	0,00400	3,15	235	139	0,015	0,080	0,0000	2,43	3,34	-0,365
20	0,214	0,000	22,1	0,0724	0,000	0,000	0,000	1,08	0,00500	3,94	245	149	0,013	0,070	0,0000	2,75	2,76	-0,005
21	0,214	0,000	21,7	0,0724	0,000	0,000	0,000	1,08	0,00500	3,93	245	149	0,017	0,075	0,0000	2,80	2,75	-0,034
22	0,214	0,000	23,3	0,0722	0,000	0,000	0,000	2,16	0,00050	0,20	235	64	0,002	0,055	0,0000	19,62	14,66	0,253
23	0,214	0,000	22,3	0,0723	0,000	0,000	0,000	2,15	0,00100	0,34	255	85	0,002	0,080	0,0000	11,30	7,38	0,153
24	0,214	0,000	22,1	0,0724	0,000	0,000	0,000	2,15	0,00200	0,74	265	75	0,002	0,075	0,0000	5,75	5,82	-0,146
25	0,214	0,000	23,0	0,0723	0,000	0,000	0,000	2,15	0,00300	1,18	265	95	0,010	0,105	0,0000	5,70	5,52	0,354
26	0,214	0,000	22,8	0,0723	0,000	0,000	0,000	2,15	0,00400	1,38	275	105	0,010	0,115	0,0000	3,37	4,72	-0,319
27	0,214	0,000	22,8	0,0723	0,000	0,000	0,000	2,15	0,00500	1,97	284	115	0,012	0,130	0,0000	3,20	4,18	-0,307
28	0,214	0,000	22,8	0,0723	0,000	0,000	0,000	2,15	0,00600	2,36	294	125	0,012	0,140	0,0000	3,01	3,78	-0,257
29	0,214	0,000	23,3	0,0722	0,000	0,000	0,000	2,16	0,00600	2,37	343	174	0,012	0,135	0,0000	4,27	3,81	0,138
30	0,214	0,000	23,3	0,0722	0,000	0,000	0,000	2,16	0,00600	2,37	343	174	0,012	0,140	0,0000	3,44	3,81	-0,107
31	0,214	0,000	23,7	0,0721	0,000	0,000	0,000	3,28	0,00100	0,26	324	59	0,004	0,120	0,0000	17,65	12,36	0,300
32	0,214	0,000	23,0	0,0722	0,000	0,000	0,000	3,27	0,00200	0,52	333	69	0,005	0,140	0,0000	8,31	8,46	-0,118
33	0,214	0,000	23,3	0,0722	0,000	0,000	0,000	3,28	0,00300	0,78	373	107	0,005	0,155	0,0000	5,75	6,78	-0,303
34	0,214	0,000	23,3	0,0722	0,000	0,000	0,000	3,28	0,00400	1,03	392	127	0,007	0,180	0,0000	5,74	5,80	-0,023
35	0,214	0,000	23,3	0,0722	0,000	0,000	0,000	3,28	0,00500	1,31	422	154	0,008	0,200	0,0000	5,33	5,14	0,260
36	0,214	0,000	23,3	0,0722	0,000	0,000	0,000	3,28	0,00600	1,57	441	174	0,010	0,220	0,0000	4,65	4,66	0,001
37	0,214	0,000	24,7	0,0720	0,000	0,000	0,000	3,27	0,00600	1,57	431	163	0,002	0,230	0,0000	5,13	4,73	0,379
38	0,214	0,000	24,8	0,0720	0,000	0,000	0,000	4,35	0,00200	0,34	471	95	0,002	0,250	0,0000	13,44	7,88	0,257
39	0,214	0,000	24,7	0,0720	0,000	0,000	0,000	4,35	0,00400	0,78	530	154	0,005	0,300	0,0000	8,47	5,77	0,201
40	0,214	0,000	24,6	0,0720	0,000	0,000	0,000	4,35	0,00600	1,17	567	193	0,002	0,330	0,0000	8,33	5,43	0,348
41	0,214	0,000	22,1	0,0724	0,000	0,000	0,000	4,34	0,00600	1,17	677	301	0,010	0,340	0,0000	6,84	5,29	0,227

Tab.10.5. c.d.

NR	r_a	c_m	t	G	π_{weigl}	ZP	TP	W_G	W_L	m_{LG}	Δp	Δp_f	h_0	H_f	e_{mg}	N_L	$N_{L,0.01}$	δ_{weigl}
		kg/m ³	°C	N/m		m		m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg			
42	0.308	0.000	22.1	0.0724	0.000	0.000	0.000	1.08	0.00050	0.40	137	71	0.007	0.030	0.0003	21.44	1.86	0.353
43	0.308	0.000	21.6	0.0725	0.000	0.000	0.000	1.08	0.00100	0.79	147	81	0.003	0.035	0.0003	4.42	3.37	-0.415
44	0.308	0.000	21.4	0.0725	0.000	0.000	0.000	1.08	0.00200	1.58	157	90	0.002	0.040	0.0003	4.27	3.63	0.144
45	0.308	0.000	21.1	0.0725	0.000	0.000	0.000	1.08	0.00300	2.37	167	100	0.010	0.045	0.0003	3.21	2.24	0.335
46	0.308	0.000	19.1	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00300	2.35	167	100	0.011	0.045	0.0003	2.60	2.88	-0.137
47	0.308	0.000	19.1	0.0728	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00400	3.14	177	110	0.011	0.045	0.0003	2.40	2.46	-0.028
48	0.308	0.000	19.1	0.0728	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00500	3.92	186	120	0.012	0.050	0.0003	2.21	2.18	0.314
49	0.308	0.000	19.2	0.0723	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00600	4.70	186	120	0.015	0.050	0.0003	1.97	1.28	0.305
50	0.308	0.000	20.1	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00600	4.69	186	130	0.014	0.045	0.0003	2.30	2.00	0.127
51	0.308	0.000	20.8	0.0725	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00050	0.39	118	51	0.003	0.030	0.0003	12.67	1.77	0.356
52	0.308	0.000	20.3	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00100	0.78	127	61	0.002	0.035	0.0003	3.75	3.30	-0.410
53	0.308	0.000	20.1	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00200	1.57	147	81	0.010	0.040	0.0003	4.05	3.63	0.197
54	0.308	0.000	19.9	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00400	3.13	167	100	0.011	0.050	0.0003	2.67	1.47	0.376
55	0.308	0.000	19.8	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00600	4.70	186	120	0.011	0.050	0.0003	2.03	1.22	0.312
56	0.308	0.000	20.3	0.0727	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00050	0.20	167	67	0.003	0.050	0.0003	17.04	10.77	0.357
57	0.308	0.000	19.7	0.0723	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00100	0.39	186	87	0.010	0.055	0.0003	8.17	1.35	0.102
58	0.308	0.000	19.3	0.0723	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00200	0.79	196	97	0.010	0.075	0.0003	4.98	3.04	-0.312
59	0.308	0.000	19.4	0.0723	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00300	1.18	206	105	0.007	0.080	0.0003	3.73	4.04	-0.327
60	0.308	0.000	19.4	0.0723	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00400	1.57	206	105	0.007	0.085	0.0003	3.67	3.45	0.358
61	0.308	0.000	19.4	0.0723	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00500	1.97	206	105	0.007	0.090	0.0003	2.94	3.06	-0.345
62	0.308	0.000	19.4	0.0723	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00600	2.36	216	115	0.007	0.095	0.0003	2.74	2.77	-0.315
63	0.308	0.000	19.3	0.0723	0.000	0.000	0.000	3.26	0.00100	0.26	206	63	0.005	0.125	0.0003	10.30	8.74	0.132
64	0.308	0.000	19.1	0.0727	0.000	0.000	0.000	3.25	0.00200	0.52	216	72	0.007	0.140	0.0003	6.35	3.12	0.356
65	0.308	0.000	19.0	0.0727	0.000	0.000	0.000	3.25	0.00300	0.78	226	82	0.007	0.145	0.0003	4.23	4.21	-0.151
66	0.308	0.000	19.0	0.0727	0.000	0.000	0.000	3.25	0.00400	1.04	235	92	0.009	0.155	0.0003	3.75	4.20	-0.121
67	0.308	0.000	19.0	0.0727	0.000	0.000	0.000	3.25	0.00500	1.30	245	102	0.007	0.155	0.0003	3.42	3.72	-0.359
68	0.308	0.000	19.0	0.0727	0.000	0.000	0.000	3.25	0.00600	1.56	255	112	0.009	0.180	0.0003	3.07	3.37	-0.358
69	0.308	0.000	18.3	0.0727	0.000	0.000	0.000	3.23	0.00600	1.55	255	112	0.007	0.175	0.0003	3.32	3.36	-0.311
70	0.308	0.000	18.6	0.0727	0.000	0.000	0.000	3.23	0.00600	1.55	255	112	0.007	0.185	0.0003	3.24	3.36	-0.332
71	0.308	0.000	19.3	0.0723	0.000	0.000	0.000	4.31	0.00100	0.19	255	42	0.002	0.230	0.0003	14.37	10.30	0.423
72	0.308	0.000	18.9	0.0727	0.000	0.000	0.000	4.31	0.00200	0.39	245	52	0.003	0.245	0.0003	8.12	1.04	0.133
73	0.308	0.000	19.0	0.0727	0.000	0.000	0.000	4.31	0.00300	0.58	265	71	0.004	0.250	0.0003	5.85	3.66	0.358
74	0.308	0.000	19.0	0.0727	0.000	0.000	0.000	4.31	0.00400	0.78	284	91	0.005	0.250	0.0003	5.07	4.84	0.366
75	0.308	0.000	18.8	0.0727	0.000	0.000	0.000	4.31	0.00500	0.97	294	101	0.005	0.250	0.0003	5.05	4.28	0.157
76	0.308	0.000	19.0	0.0727	0.000	0.000	0.000	4.31	0.00600	1.17	314	120	0.005	0.250	0.0003	5.21	3.88	0.254
77	0.308	0.000	18.9	0.0727	0.000	0.000	0.000	4.31	0.00600	1.17	314	120	0.005	0.270	0.0003	4.63	3.88	0.153
78	0.308	0.000	18.9	0.0727	0.000	0.000	0.000	4.31	0.00600	1.17	314	120	0.007	0.255	0.0003	5.13	3.88	0.432
79	0.308	0.000	18.5	0.0727	0.000	0.000	0.000	4.30	0.00600	1.17	304	111	0.004	0.250	0.0003	4.64	3.86	0.157
80	0.308	0.000	18.5	0.0727	0.000	0.000	0.000	4.30	0.00600	1.17	304	111	0.004	0.255	0.0003	4.43	3.86	0.153
81	0.416	0.000	17.7	0.0731	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00300	2.35	78	38	0.005	0.035	0.0003	0.74	2.55	-2.471
82	0.416	0.000	17.8	0.0730	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00400	3.13	88	48	0.005	0.040	0.0003	1.18	2.20	-0.351
83	0.416	0.000	17.8	0.0730	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00500	3.91	98	57	0.005	0.045	0.0003	1.74	1.25	-0.376
84	0.416	0.000	17.9	0.0730	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00600	4.70	108	67	0.007	0.045	0.0003	2.25	1.76	0.417
85	0.416	0.000	18.1	0.0730	0.000	0.000	0.000	2.13	0.00100	0.39	88	33	0.007	0.050	0.0003	4.25	0.55	-0.358
86	0.416	0.000	17.7	0.0731	0.000	0.000	0.000	2.13	0.00200	0.78	98	43	0.003	0.055	0.0003	2.72	4.48	-0.368
87	0.416	0.000	17.7	0.0731	0.000	0.000	0.000	2.13	0.00400	1.56	108	51	0.003	0.075	0.0003	2.44	3.05	-0.251
88	0.416	0.000	17.8	0.0731	0.000	0.000	0.000	2.13	0.00600	2.34	118	62	0.003	0.090	0.0003	1.84	2.47	-0.332
89	0.416	0.000	17.7	0.0731	0.000	0.000	0.000	3.22	0.00100	0.26	118	43	0.007	0.135	0.0003	7.13	1.28	0.128
90	0.416	0.000	17.3	0.0731	0.000	0.000	0.000	3.22	0.00200	0.52	127	53	0.007	0.150	0.0003	5.62	3.47	0.328
91	0.416	0.000	17.5	0.0731	0.000	0.000	0.000	3.22	0.00400	1.03	137	63	0.007	0.150	0.0003	3.12	3.75	-0.234
92	0.416	0.000	17.3	0.0731	0.000	0.000	0.000	3.22	0.00600	1.55	147	82	0.007	0.175	0.0003	2.93	3.01	-0.316
93	0.416	0.000	17.5	0.0731	0.000	0.000	0.000	4.27	0.00100	0.19	167	62	0.005	0.250	0.0003	15.72	1.16	0.417
94	0.416	0.000	17.3	0.0731	0.000	0.000	0.000	4.27	0.00200	0.39	186	82	0.005	0.260	0.0003	8.81	3.27	0.458
95	0.416	0.000	17.3	0.0731	0.000	0.000	0.000	4.27	0.00300	0.58	196	92	0.005	0.270	0.0003	7.83	3.03	0.352
96	0.416	0.000	17.2	0.0731	0.000	0.000	0.000	4.27	0.00400	0.77	216	115	0.005	0.285	0.0003	7.12	4.30	0.376
97	0.416	0.000	17.2	0.0731	0.000	0.000	0.000	4.27	0.00500	0.96	226	128	0.005	0.300	0.0003	6.34	3.31	0.417
98	0.416	0.000	17.2	0.0731	0.000	0.000	0.000	4.27	0.00600	1.16	235	138	0.005	0.310	0.0003	6.31	3.45	0.470
99	0.416	0.000	17.3	0.0731	0.000	0.000	0.000	4.27	0.00600	1.16	246	128	0.005	0.320	0.0003	6.60	3.45	0.476
100	0.416	0.000	17.4	0.0731	0.000	0.000	0.000	4.27	0.00600	1.16	255	138	0.005	0.330	0.0003	7.30	3.45	0.226

Tab.10.5. c.d.

NR	Γ_a	C_m	t	δ	Π_{wgl}	ZP	TP	W_G	W_L	m_{LG}	Δp	Δp_f	h_0	H_f	e_{mg}	N_L	N_{old}	δ_{wgl}
		kg/m ³	°C	N/m		m		m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg			
189	0.150	0.050	27.1	0.0391	0.454	0.040	0.862	1.05	0.00025	0.21	304	215	0.022	0.220	0.0000	24.82	27.24	-0.126
190	0.150	0.050	27.2	0.0391	0.454	0.040	0.862	1.05	0.00050	0.42	353	265	0.027	0.250	0.0000	18.67	17.21	-0.128
191	0.150	0.050	27.3	0.0391	0.454	0.040	0.862	1.05	0.00100	0.83	431	363	0.035	0.275	0.0000	14.23	13.23	-0.104
192	0.150	0.050	27.4	0.0391	0.454	0.040	0.863	1.05	0.00200	1.66	522	434	0.042	0.470	0.0000	14.44	7.12	-0.358
193	0.150	0.050	27.4	0.0391	0.454	0.040	0.862	2.08	0.00025	0.11	304	215	0.003	0.150	0.0000	12.13	39.29	-1.038
194	0.150	0.050	27.0	0.0392	0.454	0.040	0.862	2.08	0.00050	0.21	500	290	0.023	0.330	0.0027	22.35	25.64	-0.171
195	0.150	0.050	27.0	0.0392	0.454	0.040	0.862	2.08	0.00050	0.21	500	290	0.023	0.330	0.0027	22.35	25.64	-0.171
196	0.214	0.050	25.7	0.0392	0.454	0.040	0.862	1.05	0.00050	0.41	265	195	0.020	0.175	0.0000	15.34	10.69	-0.505
197	0.214	0.050	25.8	0.0392	0.453	0.040	0.862	1.05	0.00200	1.66	314	245	0.022	0.210	0.0000	7.24	5.03	-0.505
198	0.214	0.050	27.3	0.0391	0.454	0.040	0.863	2.07	0.00025	0.10	216	80	0.003	0.150	0.0075	14.40	22.05	-0.351
199	0.214	0.050	27.3	0.0391	0.454	0.040	0.862	2.07	0.00050	0.21	265	127	0.011	0.170	0.0057	16.81	15.06	-0.104
200	0.214	0.050	27.2	0.0391	0.454	0.040	0.862	2.07	0.00100	0.42	265	127	0.013	0.190	0.0073	9.04	10.32	-0.141
201	0.214	0.050	25.9	0.0392	0.454	0.040	0.862	2.07	0.00200	0.84	284	147	0.012	0.200	0.0080	5.24	7.04	-0.544
202	0.214	0.050	27.1	0.0391	0.454	0.040	0.862	2.07	0.00400	1.68	363	227	0.017	0.255	0.0057	5.05	4.85	-0.142
203	0.214	0.050	25.9	0.0392	0.454	0.040	0.862	3.14	0.00200	0.55	343	118	0.007	0.225	0.0273	8.10	5.60	-0.353
204	0.214	0.050	25.9	0.0392	0.454	0.040	0.862	3.14	0.00200	0.55	343	118	0.007	0.225	0.0273	8.10	5.60	-0.353
205	0.308	0.050	25.7	0.0392	0.453	0.040	0.861	1.05	0.00050	0.42	108	64	0.007	0.050	0.0000	15.28	8.12	-0.459
206	0.308	0.050	25.7	0.0392	0.453	0.040	0.861	1.05	0.00200	1.66	206	163	0.015	0.135	0.0000	5.07	5.82	-0.250
207	0.308	0.050	25.7	0.0392	0.453	0.040	0.861	2.07	0.00050	0.21	167	93	0.003	0.175	0.0054	17.73	11.33	-0.551
208	0.308	0.050	25.7	0.0392	0.453	0.040	0.861	2.07	0.00200	0.84	177	102	0.003	0.150	0.0084	5.14	5.33	-0.359
209	0.308	0.050	25.9	0.0392	0.454	0.040	0.862	3.14	0.00050	0.14	186	71	0.005	0.200	0.0187	15.65	15.22	-0.111
210	0.308	0.050	25.9	0.0392	0.454	0.040	0.862	3.14	0.00100	0.28	196	81	0.007	0.200	0.0235	8.91	7.56	-0.373
211	0.308	0.050	25.9	0.0392	0.454	0.040	0.862	3.14	0.00200	0.55	216	100	0.007	0.215	0.0255	4.37	5.56	-0.456
212	0.308	0.050	25.9	0.0392	0.454	0.040	0.862	3.14	0.00400	1.10	245	130	0.003	0.235	0.0280	3.77	4.51	-0.171
213	0.308	0.050	25.8	0.0392	0.453	0.040	0.861	3.14	0.00600	1.60	265	147	0.003	0.230	0.0207	3.75	3.61	-0.340
214	0.308	0.050	25.8	0.0392	0.453	0.040	0.861	4.20	0.00200	0.41	265	109	0.004	0.350	0.0304	15.28	7.57	-0.305
215	0.308	0.050	25.8	0.0392	0.453	0.040	0.861	4.20	0.00400	0.82	324	157	0.003	0.400	0.0304	23.17	5.19	-0.776
216	0.416	0.050	25.4	0.0392	0.453	0.040	0.861	1.05	0.00100	0.83	78	53	0.005	0.045	0.0000	3.47	3.00	-0.454
217	0.416	0.050	25.4	0.0392	0.453	0.040	0.861	1.05	0.00200	1.66	88	63	0.007	0.050	0.0000	2.67	5.43	-0.257
218	0.416	0.050	25.6	0.0392	0.453	0.040	0.861	2.08	0.00050	0.21	78	37	0.005	0.050	0.0037	5.75	10.21	-0.774
219	0.416	0.050	25.2	0.0392	0.453	0.040	0.860	2.07	0.00200	0.84	108	67	0.003	0.035	0.0074	3.38	4.77	-0.409
220	0.416	0.050	25.2	0.0392	0.453	0.040	0.860	3.14	0.00200	0.55	127	70	0.003	0.150	0.0207	5.71	5.83	-0.021
221	0.416	0.050	25.1	0.0392	0.453	0.040	0.860	3.14	0.00400	1.10	137	80	0.003	0.170	0.0245	2.51	4.00	-0.371
222	0.416	0.050	25.3	0.0392	0.453	0.040	0.861	4.21	0.00200	0.41	167	87	0.007	0.315	0.0260	12.05	5.80	-0.456
223	0.416	0.050	25.0	0.0392	0.453	0.040	0.860	4.21	0.00400	0.82	186	107	0.007	0.345	0.0303	11.68	4.61	-0.506
224	0.416	0.050	25.2	0.0392	0.453	0.040	0.860	4.21	0.00800	1.23	206	125	0.003	0.350	0.0364	8.65	5.72	-0.370

225	0.150	0.105	25.4	0.0355	0.512	0.050	0.876	1.04	0.00025	0.21	569	483	0.047	0.330	0.0000	31.65	35.13	-0.559
226	0.150	0.105	25.5	0.0355	0.512	0.050	0.876	1.04	0.00050	0.41	755	667	0.067	0.470	0.0000	23.33	22.77	-0.156
227	0.150	0.105	25.4	0.0355	0.512	0.050	0.876	1.04	0.00100	0.82	1040	954	0.065	0.500	0.0000	26.94	15.64	-0.559
228	0.150	0.105	25.3	0.0351	0.512	0.050	0.875	1.04	0.00100	0.82	1020	934	0.095	0.520	0.0000	127.68	15.60	-0.380
229	0.214	0.105	25.5	0.0355	0.512	0.050	0.876	1.04	0.00025	0.21	343	279	0.027	0.250	0.0000	37.05	15.61	-0.478
230	0.214	0.105	25.5	0.0355	0.512	0.050	0.876	1.04	0.00050	0.41	422	355	0.037	0.310	0.0000	28.87	12.82	-0.555
231	0.214	0.105	25.4	0.0355	0.512	0.050	0.876	1.04	0.00100	0.82	539	476	0.047	0.350	0.0000	17.25	8.76	-0.745
232	0.214	0.105	25.5	0.0355	0.512	0.050	0.876	1.04	0.00200	1.64	814	749	0.072	0.470	0.0000	14.05	6.02	-0.568
233	0.214	0.105	25.4	0.0355	0.512	0.050	0.876	2.05	0.00025	0.10	667	535	0.054	0.580	0.0070	41.70	25.23	-0.376
234	0.214	0.105	25.1	0.0351	0.513	0.050	0.875	2.05	0.00050	0.21	873	741	0.073	0.710	0.0114	44.78	17.65	-0.506
235	0.214	0.105	25.2	0.0351	0.513	0.050	0.875	2.05	0.00100	0.41	1079	947	0.092	0.850	0.0460	48.57	12.17	-0.749
236	0.308	0.105	25.3	0.0351	0.512	0.050	0.875	1.04	0.00050	0.41	216	175	0.013	0.220	0.0000	16.64	7.69	-0.418
237	0.308	0.105	25.2	0.0351	0.513	0.050	0.875	1.04	0.00100	0.82	166	155	0.015	0.200	0.0000	7.88	5.64	-0.157
238	0.308	0.105	25.2	0.0351	0.513	0.050	0.875	1.04	0.00100	0.82	196	155	0.015	0.230	0.0000	7.88	6.64	-0.157
239	0.308	0.105	25.6	0.0355	0.512	0.050	0.876	2.05	0.00050	0.21	186	115	0.010	0.220	0.0084	13.10	15.63	-0.341
240	0.308	0.105	25.2	0.0351	0.513	0.050	0.875	2.06	0.00100	0.42	167	95	0.007	0.170	0.0102	9.39	7.27	-0.312
241	0.308	0.105	25.1	0.0351	0.513	0.050	0.875	2.06	0.00200	0.83	186	115	0.007	0.190	0.0114	5.91	6.34	-0.373
242	0.308	0.105	25.2	0.0351	0.513	0.050	0.875	3.12	0.00050	0.14	206	94	0.003	0.275	0.0285	16.18	15.51	-0.320
243	0.308	0.105	25.1	0.0351	0.513	0.050	0.875	3.12	0.00100	0.28	206	94	0.007	0.250	0.0344	10.25	11.32	-0.103
244	0.308	0.105	25.1	0.0351	0.513	0.050	0.875	3.12	0.00200	0.55	216	104	0.003	0.280	0.0375	6.95	7.75	-0.116
245	0.308	0.105	25.0	0.0351	0.513	0.050	0.875	3.12	0.00400	1.10	245	133	0.003	0.270	0.0453	5.65	5.32	-0.055
246	0.416	0.105	25.3	0.0351	0.512	0.050	0.875	1.04	0.00100	0.82	78	55	0.003	0.050	0.0000	3.47	5.02	-0.518
247	0.416	0.105	25.1	0.0351	0.513	0.050	0.875	1.04	0.00200	1.63	88	65	0.003	0.070	0.0000	3.47	4.12	-0.179
248	0.416	0.105	25.6	0.0355	0.512	0.050	0.876	2.06	0.00050	0.21	78	41	0.007	0.055	0.0105	13.05	12.34	-0.353
249	0.416	0.105	25.3	0.0351	0.512	0.050	0.875	2.06	0.00100	0.42	108	71	0.003	0.110	0.0114	5.43	5.40	-0.348
250	0.416	0.105	25.3	0.0351	0.512	0.050	0.875	2.06	0.00200	0.83	108	71	0.003	0.110	0.0111	5.34	5.77	-0.331
251	0.416	0.105	25.2	0.0351	0.513	0.050	0.875	3.11	0.00050	0.14	108	52	0.003	0.170	0.0264	27.47	14.28	-0.455
252	0.416	0.105	25.3	0.0351	0.512	0.050	0.875	3.11	0.00100	0.28	118	62	0.007	0.170	0.0273	7.31	10.31	-0.329
253	0.416	0.105	25.3	0.0351	0.512	0.050	0.875	3.11	0.00200	0.55	127	72	0.003	0.195	0.0255	4.00	7.06	-0.472
254	0.416	0.105	25.3	0.0351	0.512	0.050	0.875	3.11	0.00400	1.10	127	72	0.003	0.170	0.0283	4.65	4.85	-0.343
255	0.416	0.105	25.4	0.0355	0.512	0.050	0.876	3.11	0.00400	1.10	127	72	0.003	0.190	0.0283	4.69	4.86	-0.305

Tab.10.6. Wyniki pomiarów desorpcji CO₂ w kolumnie dwupółkowej.
 UKŁAD : POWIETRZE - CO₂ - H₂O - ROKANOL L10.
 $r_A = 0,291$

NR	C _m	t	σ	π _{wzgl}	ZP	TP	W _G	W _L	Δp ^G	Δp ^D	h _o ^G	h _o ^D	H _f ^G	H _f ^D	e _{mg}	N _L ^G	N _L ^D
—	kg/m ³	°C	N/m	—	m	—	m/s	m/s	N/m ²	N/m ²	m	m	m	m	kg/kg	—	—
*256	0,000	23,95	0,0721	0,000	0,000	0,000	1,04	0,0010	98	98	0,006	0,006	0,035	0,040	0,0000	2,07	2,91
*257	0,000	23,55	0,0722	0,000	0,000	0,000	1,04	0,0020	108	118	0,007	0,008	0,040	0,045	0,0000	5,55	1,81
*258	0,000	23,70	0,0721	0,000	0,000	0,000	2,06	0,0005	137	147	0,007	0,008	0,075	0,080	0,0078	10,13	5,23
*259	0,000	23,62	0,0722	0,000	0,000	0,000	2,06	0,0020	177	167	0,009	0,009	0,075	0,085	0,0065	7,14	5,99
*260	0,000	23,48	0,0722	0,000	0,000	0,000	3,11	0,0020	216	206	0,006	0,007	0,140	0,145	0,0134	8,48	3,60
*261	0,000	23,23	0,0722	0,000	0,000	0,000	3,11	0,0040	245	235	0,008	0,008	0,155	0,160	0,0126	6,04	3,26
*262	0,005	24,10	0,0564	0,218	0,021	0,000	1,04	0,0010	127	137	0,007	0,008	0,040	0,045	0,0000	2,90	3,00
*263	0,005	23,83	0,0564	0,218	0,021	0,000	1,04	0,0020	137	157	0,007	0,008	0,050	0,050	0,0000	3,97	1,57
*264	0,005	24,52	0,0564	0,218	0,021	0,000	2,06	0,0005	157	157	0,008	0,008	0,080	0,090	0,0089	7,53	1,60
*265	0,005	23,90	0,0564	0,218	0,021	0,000	2,06	0,0020	177	177	0,010	0,011	0,075	0,105	0,0078	5,51	2,84
*266	0,005	23,48	0,0565	0,217	0,021	0,000	3,11	0,0020	216	216	0,006	0,007	0,150	0,175	0,0173	5,24	3,75
*267	0,005	23,57	0,0565	0,217	0,021	0,000	3,11	0,0040	255	255	0,007	0,008	0,180	0,195	0,0171	3,84	2,40
*268	0,015	25,10	0,0476	0,339	0,032	0,712	1,04	0,0005	108	118	0,007	0,008	0,045	0,070	0,0000	3,88	4,51
*269	0,015	24,78	0,0476	0,338	0,032	0,710	1,04	0,0020	157	177	0,008	0,008	0,070	0,075	0,0000	3,61	2,27
*270	0,015	24,48	0,0477	0,338	0,032	0,708	2,06	0,0005	157	157	0,008	0,008	0,070	0,115	0,0110	7,67	2,21
*271	0,015	24,55	0,0476	0,338	0,032	0,708	2,06	0,0020	186	177	0,010	0,010	0,125	0,130	0,0099	4,63	2,66
*272	0,015	24,55	0,0476	0,338	0,032	0,708	3,11	0,0020	216	226	0,007	0,008	0,130	0,200	0,0250	5,01	5,81
*273	0,015	24,50	0,0477	0,338	0,031	0,707	3,11	0,0040	255	255	0,008	0,008	0,210	0,220	0,0250	3,44	2,45
*274	0,040	25,03	0,0395	0,453	0,054	0,867	1,04	0,0005	137	147	0,007	0,008	0,070	0,150	0,0000	3,95	4,40
*275	0,040	24,85	0,0394	0,453	0,054	0,867	1,04	0,0020	177	177	0,009	0,010	0,120	0,140	0,0000	3,40	2,30
*276	0,040	24,78	0,0394	0,453	0,054	0,867	2,06	0,0005	167	167	0,008	0,007	0,075	0,145	0,0139	6,86	5,37
*277	0,040	24,80	0,0394	0,453	0,054	0,867	2,06	0,0020	196	186	0,010	0,011	0,140	0,150	0,0138	4,03	2,69
*278	0,040	24,90	0,0395	0,453	0,054	0,867	3,12	0,0020	226	235	0,007	0,008	0,220	0,240	0,0316	4,53	2,96
*279	0,040	24,90	0,0395	0,453	0,054	0,867	3,12	0,0040	255	265	0,008	0,009	0,240	0,270	0,0393	3,07	2,24
*280	0,040	24,90	0,0395	0,453	0,054	0,867	3,12	0,0040	265	265	0,009	0,008	0,240	0,270	0,0395	3,09	2,28

Tab. 10.7. Wyniki pomiarów desorpcji NH₃UKŁAD : POWIETRZE - NH₃ - H₂O - ROKAFENOL NX

NR	Γ_A	C_m	t	θ	π_{wzgl}	ZP	TP	W_G	W_L	m_{LG}	Δp	Δp_f	h_0	H_f	e_{mg}	N_{OG}	N_G	$N_{G,chl}$	δ_{wzgl}
		kg/m ³	°C	N/m		m		m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg				
1	0.150	0.000	20.0	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00025	0.20	226	117	0.013	0.055	0.0000	0.638	0.704	0.750	-0.055
2	0.150	0.000	20.0	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00050	0.39	235	127	0.014	0.070	0.0000	0.675	0.720	0.805	-0.112
3	0.150	0.000	17.0	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00100	0.78	284	175	0.019	0.085	0.0000	0.672	0.722	0.864	-0.127
4	0.150	0.000	18.6	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00200	1.57	333	225	0.022	0.115	0.0000	0.885	0.716	0.725	-0.014
5	0.150	0.000	18.7	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00300	2.35	392	284	0.025	0.135	0.0000	0.859	0.843	0.767	-0.086
6	0.150	0.000	18.4	0.0733	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00400	3.13	441	335	0.027	0.150	0.0000	0.854	0.893	0.775	-0.130
7	0.150	0.000	19.5	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00500	3.91	481	372	0.032	0.155	0.0000	0.714	0.753	1.022	-0.025
8	0.150	0.000	17.2	0.0725	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00050	0.20	324	85	0.003	0.110	0.0000	0.522	0.557	0.575	-0.265
9	0.150	0.000	18.7	0.0727	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00100	0.39	343	105	0.003	0.125	0.0000	0.547	0.571	0.747	-0.332
10	0.150	0.000	18.6	0.0727	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00200	0.79	382	144	0.010	0.145	0.0000	0.613	0.553	0.805	-0.252
11	0.150	0.000	18.6	0.0727	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00400	1.57	448	150	0.021	0.230	0.0000	0.827	0.854	0.864	-0.012
12	0.150	0.000	18.4	0.0733	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00600	2.35	505	226	0.035	0.300	0.0000	1.017	1.058	0.701	-0.160
13	0.150	0.000	17.5	0.0731	0.000	0.000	0.000	5.24	0.00100	0.20	530	117	0.003	0.120	0.0000	0.547	0.562	0.604	-0.293
14	0.150	0.000	17.5	0.0731	0.000	0.000	0.000	5.24	0.00200	0.39	548	184	0.009	0.235	0.0000	0.681	0.710	0.751	-0.055
15	0.150	0.000	17.5	0.0731	0.000	0.000	0.000	5.24	0.00300	0.79	607	254	0.015	0.310	0.0000	0.864	0.888	0.767	-0.154
16	0.150	0.000	17.2	0.0731	0.000	0.000	0.000	5.24	0.00400	1.03	626	315	0.029	0.420	0.0000	1.008	1.064	0.721	-0.258
17	0.150	0.000	18.0	0.0727	0.000	0.000	0.000	5.24	0.00600	1.04	632	312	0.033	0.400	0.0000	1.030	1.075	0.744	-0.275
18	0.214	0.000	21.2	0.0725	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00050	0.20	157	52	0.010	0.040	0.0000	0.627	0.648	0.741	-0.088
19	0.214	0.000	20.5	0.0725	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00100	0.39	167	63	0.010	0.045	0.0000	0.720	0.700	0.725	-0.115
20	0.214	0.000	17.7	0.0727	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00100	0.39	186	82	0.011	0.055	0.0000	0.651	0.574	0.854	-0.231
21	0.214	0.000	17.6	0.0725	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00200	1.57	226	125	0.013	0.070	0.0000	0.674	0.725	0.715	-0.255
22	0.214	0.000	17.4	0.0725	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00400	3.14	284	187	0.015	0.070	0.0000	0.752	0.776	0.787	-0.272
23	0.214	0.000	17.4	0.0725	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00600	4.71	333	235	0.019	0.110	0.0000	0.886	0.711	1.030	-0.130
24	0.214	0.000	17.7	0.0731	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00050	0.20	255	67	0.003	0.065	0.0000	0.539	0.502	0.685	-0.125
25	0.214	0.000	17.0	0.0732	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00100	0.39	255	84	0.007	0.080	0.0000	0.551	0.576	0.735	-0.235
26	0.214	0.000	17.1	0.0732	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00200	0.78	275	105	0.007	0.100	0.0000	0.612	0.545	0.792	-0.222
27	0.214	0.000	17.0	0.0732	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00400	1.56	294	125	0.010	0.110	0.0000	0.651	0.585	0.852	-0.244
28	0.214	0.000	16.9	0.0732	0.000	0.000	0.000	2.15	0.00600	2.35	333	165	0.012	0.120	0.0000	0.711	0.732	0.887	-0.212
29	0.214	0.000	17.3	0.0731	0.000	0.000	0.000	3.21	0.00100	0.20	314	51	0.003	0.140	0.0000	0.482	0.515	0.675	-0.312
30	0.214	0.000	17.3	0.0731	0.000	0.000	0.000	3.21	0.00200	0.39	324	61	0.004	0.150	0.0000	0.532	0.538	0.733	-0.308
31	0.214	0.000	17.2	0.0731	0.000	0.000	0.000	3.21	0.00300	0.77	333	70	0.005	0.185	0.0000	0.563	0.588	0.761	-0.225
32	0.214	0.000	17.2	0.0731	0.000	0.000	0.000	3.21	0.00400	1.03	343	80	0.007	0.200	0.0000	0.638	0.564	0.784	-0.141
33	0.214	0.000	17.2	0.0731	0.000	0.000	0.000	3.21	0.00600	1.54	363	100	0.010	0.235	0.0000	0.772	0.805	0.817	-0.015
34	0.214	0.000	15.6	0.0732	0.000	0.000	0.000	4.26	0.00100	0.19	401	90	0.002	0.250	0.0000	0.655	0.718	0.637	-0.110
35	0.214	0.000	15.5	0.0732	0.000	0.000	0.000	4.26	0.00200	0.38	481	107	0.003	0.270	0.0000	0.670	0.717	0.687	-0.044
36	0.214	0.000	15.4	0.0733	0.000	0.000	0.000	4.26	0.00400	0.77	510	138	0.007	0.290	0.0000	0.891	0.555	0.737	-0.227
37	0.214	0.000	15.4	0.0733	0.000	0.000	0.000	4.26	0.00600	1.15	579	207	0.013	0.350	0.0000	0.967	1.036	0.771	-0.255
38	0.308	0.000	15.9	0.0732	0.000	0.000	0.000	1.06	0.00050	0.39	157	70	0.007	0.035	0.0000	0.436	0.475	0.577	-0.431
39	0.308	0.000	15.3	0.0733	0.000	0.000	0.000	1.06	0.00100	0.78	157	70	0.003	0.040	0.0000	0.447	0.471	0.727	-0.547
40	0.308	0.000	16.1	0.0733	0.000	0.000	0.000	1.06	0.00200	1.55	147	80	0.003	0.045	0.0000	0.880	0.532	0.784	-0.165
41	0.308	0.000	15.7	0.0733	0.000	0.000	0.000	1.06	0.00400	3.10	167	107	0.007	0.050	0.0000	1.123	1.183	0.843	-0.288
42	0.308	0.000	15.8	0.0733	0.000	0.000	0.000	1.06	0.00600	4.65	177	110	0.010	0.055	0.0000	1.315	1.372	0.877	-0.352
43	0.308	0.000	15.3	0.0734	0.000	0.000	0.000	2.11	0.00050	0.19	167	67	0.010	0.055	0.0000	0.648	0.820	0.587	-0.285
44	0.308	0.000	15.3	0.0734	0.000	0.000	0.000	2.11	0.00100	0.39	186	87	0.013	0.060	0.0000	0.504	0.560	0.631	-0.127
45	0.308	0.000	15.3	0.0734	0.000	0.000	0.000	2.11	0.00200	0.77	196	97	0.010	0.070	0.0000	0.643	0.578	0.677	-0.027
46	0.308	0.000	15.2	0.0733	0.000	0.000	0.000	2.11	0.00400	1.55	206	105	0.011	0.080	0.0000	0.737	0.784	0.727	-0.070
47	0.308	0.000	15.2	0.0734	0.000	0.000	0.000	2.11	0.00600	2.32	216	115	0.010	0.070	0.0000	0.854	0.708	0.761	-0.152
48	0.308	0.000	15.2	0.0733	0.000	0.000	0.000	2.11	0.00600	2.32	226	125	0.003	0.085	0.0000	0.771	0.826	0.764	-0.075
49	0.308	0.000	15.4	0.0733	0.000	0.000	0.000	2.11	0.00600	2.32	226	125	0.007	0.070	0.0000	0.749	0.783	0.765	-0.023
50	0.308	0.000	15.4	0.0734	0.000	0.000	0.000	3.17	0.00100	0.20	266	83	0.005	0.130	0.0000	0.476	0.526	0.580	-0.044
51	0.308	0.000	15.0	0.0735	0.000	0.000	0.000	3.17	0.00200	0.39	245	103	0.005	0.140	0.0000	0.579	0.627	0.625	-0.005
52	0.308	0.000	15.0	0.0735	0.000	0.000	0.000	3.17	0.00400	1.02	255	112	0.005	0.150	0.0000	0.630	0.666	0.673	-0.007
53	0.308	0.000	15.1	0.0735	0.000	0.000	0.000	3.17	0.00600	1.55	284	142	0.007	0.180	0.0000	0.697	0.754	0.703	-0.047
54	0.308	0.000	15.4	0.0734	0.000	0.000	0.000	4.24	0.00100	0.19	265	72	0.003	0.220	0.0000	0.587	0.578	0.547	-0.122
55	0.308	0.000	15.4	0.0734	0.000	0.000	0.000	4.24	0.00200	0.38	275	82	0.003	0.235	0.0000	0.650	0.672	0.587	-0.142
56	0.308	0.000	15.5	0.0734	0.000	0.000	0.000	4.24	0.00400	0.77	284	92	0.003	0.250	0.0000	0.786	0.843	0.633	-0.242
57	0.308	0.000	15.3	0.0734	0.000	0.000	0.000	4.24	0.00600	1.15	294	102	0.004	0.270	0.0000	0.700	0.751	0.661	-0.312
58	0.416	0.000	15.8	0.0734	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00300	2.34	108	67	0.005	0.035	0.0000	0.630	0.554	0.680	-0.036
59	0.416	0.000	15.8	0.0735	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00400	3.13	108	67	0.005	0.040	0.0000	0.578	0.576	0.701	-0.176
60	0.416	0.000	15.8	0.0734	0.000	0.000	0.000	1.07	0.00500	3.91	118	77	0.005	0.040	0.0000	0.624	0.542	0.717	-

Tab.10.7. c.d.

NR	Γ_A	c_m	t	δ	π_{wgl}	ZP	TP	w_g	w_L	m_{LG}	Δp	Δp_f	h_c	H_f	E_{mc}	N_{CG}	N_G	N_{Cobl}	δ_{wrot}
		kg/m ³	°C	N/m		m		m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg				
76	0.150	0.001	13.5	0.0685	0.070	0.000	0.000	1.03	0.00025	0.20	196.	95	0.011	0.030	0.0000	0.825	0.782	0.675	0.510
77	0.150	0.001	12.8	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.03	0.00050	0.41	216.	114	0.012	0.055	0.0000	0.766	0.851	0.742	0.124
78	0.150	0.001	12.7	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.03	0.00100	0.82	265.	163	0.015	0.075	0.0000	0.675	0.718	0.722	0.111
79	0.150	0.001	12.8	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.03	0.00200	1.63	324.	222	0.017	0.075	0.0000	0.711	0.751	0.752	0.135
80	0.150	0.001	12.7	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.03	0.00400	3.26	382.	281	0.024	0.115	0.0000	0.875	0.702	0.725	0.026
81	0.150	0.001	13.3	0.0685	0.070	0.000	0.000	2.02	0.00050	0.20	324.	104	0.009	0.100	0.0032	0.563	0.501	0.641	0.057
82	0.150	0.001	13.1	0.0685	0.070	0.000	0.000	2.02	0.00100	0.41	353.	114	0.009	0.110	0.0033	0.573	0.512	0.624	0.116
83	0.150	0.001	13.0	0.0685	0.070	0.000	0.000	2.02	0.00200	0.82	373.	153	0.010	0.130	0.0027	0.577	0.545	0.747	0.155
84	0.150	0.001	13.1	0.0685	0.070	0.000	0.000	2.02	0.00400	1.63	547.	522	0.020	0.205	0.0015	0.727	0.727	0.765	0.122
85	0.150	0.001	13.1	0.0685	0.070	0.000	0.000	2.02	0.00600	2.45	726.	505	0.030	0.255	0.0016	0.748	0.735	0.767	0.125
86	0.150	0.001	13.0	0.0687	0.070	0.000	0.000	3.06	0.00100	0.27	510.	131	0.003	0.180	0.0127	0.566	0.542	0.532	0.124
87	0.150	0.001	12.9	0.0687	0.070	0.000	0.000	3.06	0.00200	0.54	618.	238	0.007	0.225	0.0064	0.657	0.710	0.507	0.153
88	0.150	0.001	12.9	0.0687	0.070	0.000	0.000	3.06	0.00300	0.81	785.	405	0.015	0.300	0.0027	0.856	0.727	0.713	0.131
89	0.150	0.001	12.6	0.0687	0.070	0.000	0.000	3.06	0.00400	1.07	912.	532	0.023	0.350	0.0027	0.727	0.855	0.765	0.153
90	0.150	0.001	12.2	0.0688	0.069	0.006	0.000	3.06	0.00400	1.07	922.	542	0.024	0.370	0.0027	1.019	1.117	0.755	0.155
91	0.214	0.001	13.1	0.0685	0.070	0.000	0.000	1.01	0.00025	0.20	177.	85	0.011	0.045	0.0000	0.751	0.721	0.585	0.151
92	0.214	0.001	12.8	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.01	0.00050	0.40	176.	95	0.011	0.045	0.0000	0.758	0.727	0.755	0.205
93	0.214	0.001	12.5	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.01	0.00100	0.80	176.	105	0.012	0.055	0.0000	0.772	0.720	0.801	0.050
94	0.214	0.001	12.6	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.01	0.00200	1.61	216.	124	0.014	0.055	0.0000	0.650	0.622	0.852	0.261
95	0.214	0.001	12.4	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.01	0.00400	3.21	255.	163	0.017	0.080	0.0000	0.666	0.625	0.725	0.335
96	0.214	0.001	12.4	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.01	0.00600	4.82	275.	183	0.020	0.085	0.0000	0.758	0.725	0.765	0.267
97	0.214	0.001	12.6	0.0687	0.070	0.000	0.000	2.00	0.00050	0.20	276.	62	0.009	0.055	0.0043	0.516	0.527	0.547	0.032
98	0.214	0.001	12.6	0.0687	0.070	0.000	0.000	2.00	0.00100	0.41	235.	72	0.007	0.075	0.0031	0.536	0.507	0.625	0.145
99	0.214	0.001	12.6	0.0687	0.070	0.000	0.000	2.00	0.00200	0.81	245.	82	0.010	0.070	0.0025	0.640	0.705	0.747	0.056
100	0.214	0.001	12.4	0.0687	0.069	0.006	0.000	2.00	0.00400	1.62	304.	148	0.012	0.110	0.0020	0.722	0.775	0.807	0.047
101	0.214	0.001	12.0	0.0685	0.069	0.006	0.000	2.00	0.00600	2.43	353.	177	0.013	0.130	0.0022	0.774	0.720	0.852	0.032
102	0.214	0.001	11.9	0.0688	0.069	0.006	0.000	3.03	0.00100	0.27	292.	51	0.005	0.125	0.0025	0.647	0.563	0.651	0.157
103	0.214	0.001	11.9	0.0685	0.069	0.006	0.000	3.03	0.00200	0.53	304.	61	0.005	0.145	0.0064	0.517	0.567	0.700	0.255
104	0.214	0.001	11.7	0.0688	0.069	0.006	0.000	3.03	0.00300	0.80	335.	70	0.008	0.155	0.0052	0.524	0.542	0.755	0.130
105	0.214	0.001	11.7	0.0687	0.069	0.006	0.000	3.03	0.00400	1.07	382.	132	0.009	0.180	0.0045	0.552	0.705	0.755	0.073
106	0.214	0.001	11.6	0.0687	0.069	0.006	0.000	3.03	0.00600	1.60	402.	152	0.010	0.215	0.0042	0.801	0.887	0.721	0.048
107	0.214	0.001	11.9	0.0688	0.069	0.006	0.000	4.08	0.00100	0.20	422.	73	0.002	0.250	0.0251	0.525	0.601	0.617	0.016
108	0.214	0.001	11.8	0.0685	0.069	0.006	0.000	4.08	0.00200	0.40	461.	112	0.003	0.255	0.0225	0.527	0.644	0.523	0.024
109	0.214	0.001	11.8	0.0685	0.069	0.006	0.000	4.08	0.00400	0.79	532.	191	0.005	0.270	0.0147	0.554	0.715	0.707	0.008
110	0.214	0.001	11.6	0.0687	0.069	0.006	0.000	4.08	0.00600	1.19	642.	279	0.012	0.340	0.0110	0.842	0.721	0.745	0.210
111	0.308	0.001	11.9	0.0688	0.069	0.006	0.000	1.00	0.00050	0.40	147.	84	0.003	0.055	0.0000	0.722	0.657	0.645	0.017
112	0.308	0.001	11.5	0.0687	0.069	0.006	0.000	1.01	0.00100	0.81	157.	94	0.002	0.080	0.0000	0.502	0.542	0.605	0.262
113	0.308	0.001	11.5	0.0687	0.069	0.006	0.000	1.01	0.00200	1.61	177.	114	0.002	0.045	0.0000	0.548	0.612	0.755	0.238
114	0.308	0.001	11.3	0.0687	0.069	0.006	0.000	1.01	0.00400	3.22	186.	124	0.010	0.045	0.0000	0.802	0.865	0.815	0.354
115	0.308	0.001	11.3	0.0687	0.069	0.006	0.000	1.01	0.00600	4.83	186.	124	0.011	0.055	0.0000	0.876	0.727	0.754	0.036
116	0.308	0.001	12.1	0.0684	0.069	0.006	0.000	2.00	0.00050	0.20	157.	84	0.002	0.080	0.0000	0.542	0.752	0.651	0.053
117	0.308	0.001	12.1	0.0688	0.069	0.006	0.000	2.00	0.00100	0.41	177.	84	0.002	0.055	0.0043	0.489	0.582	0.585	0.025
118	0.308	0.001	12.2	0.0685	0.069	0.006	0.000	2.00	0.00200	0.81	186.	94	0.002	0.055	0.0035	0.566	0.518	0.563	0.062
119	0.308	0.001	11.6	0.0687	0.069	0.006	0.000	2.00	0.00400	1.62	216.	123	0.010	0.075	0.0030	0.527	0.776	0.707	0.082
120	0.308	0.001	11.6	0.0687	0.069	0.006	0.000	2.00	0.00600	2.44	226.	133	0.007	0.080	0.0035	0.775	0.841	0.715	0.123
121	0.308	0.001	12.9	0.0687	0.070	0.000	0.000	3.04	0.00100	0.27	196.	63	0.003	0.115	0.0067	0.435	0.523	0.545	0.042
122	0.308	0.001	12.7	0.0687	0.070	0.000	0.000	3.04	0.00200	0.54	216.	83	0.003	0.130	0.0050	0.431	0.460	0.507	0.225
123	0.308	0.001	12.7	0.0687	0.070	0.000	0.000	3.04	0.00300	0.81	235.	103	0.005	0.145	0.0057	0.531	0.587	0.515	0.304
124	0.308	0.001	12.5	0.0687	0.070	0.000	0.000	3.04	0.00400	1.07	245.	112	0.007	0.150	0.0053	0.555	0.505	0.535	0.343
125	0.308	0.001	12.2	0.0685	0.069	0.006	0.000	3.04	0.00600	1.61	255.	122	0.008	0.170	0.0045	0.552	0.711	0.567	0.152
126	0.308	0.001	13.5	0.0685	0.070	0.000	0.000	4.10	0.00100	0.20	255.	54	0.004	0.210	0.0127	0.388	0.460	0.505	0.026
127	0.308	0.001	13.3	0.0685	0.070	0.000	0.000	4.10	0.00200	0.40	265.	84	0.005	0.220	0.0121	0.478	0.552	0.545	0.115
128	0.308	0.001	13.2	0.0685	0.070	0.000	0.000	4.10	0.00400	0.80	294.	113	0.008	0.230	0.0112	0.551	0.628	0.585	0.067
129	0.308	0.001	13.1	0.0685	0.070	0.000	0.000	4.10	0.00600	1.20	353.	152	0.007	0.250	0.0125	0.622	0.773	0.615	0.235
130	0.308	0.001	13.1	0.0685	0.070	0.000	0.000	4.10	0.00600	1.20	374.	145	0.003	0.260	0.0105	0.655	0.736	0.615	0.156
131	0.416	0.001	12.7	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.02	0.00300	2.43	157.	72	0.005	0.030	0.0000	0.721	0.866	0.543	0.261
132	0.416	0.001	12.7	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.02	0.00400	3.24	157.	72	0.005	0.035	0.0000	0.753	1.035	0.557	0.375
133	0.416	0.001	12.8	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.02	0.00500	4.06	167.	102	0.005	0.040	0.0000	0.639	0.572	0.573	0.332
134	0.416	0.001	12.8	0.0687	0.070	0.000	0.000	1.02	0.00600	4.87	167.	112	0.007	0.040	0.0000	0.601	0.613	0.585	0.542
135	0.416	0.001	12.5	0.0687	0.070	0.000	0.000	2.02	0.00050	0.20	98.	45	0.007	0.040	0.0027	0.404	0.554	0.463	0.154
136	0.416	0.0																	

Tab. 10.7. c.d.

NR	Γ_A	C_m	t	σ	π_{wzgl}	ZP	TP	W_G	W_L	m_{LG}	Δp	Δp_f	h_0	H_f	e_{mg}	N_{oc}	N_G	N_{obl}	δ_{wzgl}
		kg/m ³	°C	N/m		m		m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg				
151	0.150	0.004	12.3	0.0557	0.110	0.012	0.000	1.02	0.00025	0.20	186	87	0.012	0.050	0.0003	0.526	0.572	0.505	0.175
152	0.150	0.004	12.3	0.0557	0.110	0.012	0.000	1.02	0.00050	0.40	186	95	0.013	0.055	0.0003	0.533	0.577	0.505	0.055
153	0.150	0.004	11.8	0.0553	0.110	0.012	0.000	1.02	0.00100	0.81	284	185	0.013	0.085	0.0003	0.633	0.711	0.702	0.077
154	0.150	0.004	11.7	0.0553	0.110	0.012	0.000	1.02	0.00200	1.62	314	214	0.021	0.130	0.0003	0.702	0.720	0.743	-0.056
155	0.150	0.004	11.6	0.0553	0.110	0.012	0.000	1.02	0.00400	3.23	363	263	0.025	0.125	0.0003	0.871	0.888	0.815	0.079
156	0.150	0.004	12.5	0.0557	0.110	0.012	0.000	2.03	0.00050	0.21	314	95	0.003	0.105	0.0032	0.490	0.507	0.562	-0.107
157	0.150	0.004	12.4	0.0557	0.110	0.012	0.000	2.03	0.00100	0.41	333	115	0.007	0.115	0.0027	0.574	0.578	0.505	-0.012
158	0.150	0.004	12.4	0.0557	0.110	0.012	0.000	2.03	0.00200	0.82	363	144	0.013	0.130	0.0025	0.551	0.576	0.551	-0.132
159	0.150	0.004	12.0	0.0553	0.110	0.012	0.000	2.03	0.00400	1.64	569	350	0.022	0.210	0.0023	0.802	0.825	0.704	0.147
160	0.150	0.004	11.9	0.0553	0.110	0.012	0.000	2.03	0.00600	2.46	706	487	0.031	0.270	0.0017	0.708	0.752	0.735	0.217
161	0.150	0.004	13.0	0.0555	0.111	0.012	0.000	3.05	0.00100	0.27	520	142	0.003	0.120	0.0134	0.528	0.547	0.555	-0.017
162	0.150	0.004	11.9	0.0553	0.110	0.012	0.000	3.04	0.00200	0.55	637	261	0.003	0.240	0.0052	0.654	0.711	0.505	0.145
163	0.150	0.004	11.9	0.0553	0.110	0.012	0.000	3.04	0.00300	0.80	814	437	0.015	0.320	0.0023	0.832	0.770	0.534	0.271
164	0.150	0.004	11.7	0.0553	0.110	0.012	0.000	3.04	0.00400	1.07	961	584	0.025	0.385	0.0030	1.044	1.100	0.555	0.434
165	0.150	0.004	12.1	0.0553	0.110	0.012	0.000	1.01	0.00025	0.20	177	87	0.010	0.055	0.0003	0.572	0.577	0.501	0.112
166	0.150	0.004	11.7	0.0553	0.110	0.012	0.000	1.01	0.00050	0.40	177	87	0.011	0.055	0.0003	0.703	0.777	0.547	0.154
167	0.150	0.004	11.6	0.0553	0.110	0.012	0.000	1.01	0.00100	0.80	216	125	0.015	0.070	0.0003	0.572	0.603	0.703	-0.151
168	0.150	0.004	11.5	0.0553	0.110	0.011	0.000	1.01	0.00200	1.61	265	175	0.014	0.085	0.0003	0.634	0.657	0.754	-0.147
169	0.150	0.004	11.4	0.0553	0.110	0.011	0.000	1.01	0.00400	3.22	294	205	0.017	0.130	0.0003	0.697	0.715	0.812	-0.155
170	0.150	0.004	11.3	0.0553	0.110	0.011	0.000	1.01	0.00600	4.82	333	244	0.020	0.110	0.0003	0.596	0.710	0.847	-0.125
171	0.150	0.004	13.0	0.0555	0.111	0.012	0.000	2.01	0.00050	0.20	245	91	0.003	0.070	0.0044	0.496	0.547	0.555	-0.014
172	0.150	0.004	12.9	0.0555	0.111	0.012	0.000	2.01	0.00100	0.41	265	111	0.003	0.085	0.0041	0.511	0.544	0.575	-0.077
173	0.150	0.004	12.8	0.0557	0.111	0.012	0.000	2.01	0.00200	0.81	284	130	0.007	0.075	0.0041	0.591	0.608	0.644	-0.057
174	0.150	0.004	12.8	0.0557	0.111	0.012	0.000	2.01	0.00400	1.63	333	177	0.010	0.125	0.0035	0.672	0.674	0.672	0.035
175	0.150	0.004	12.7	0.0557	0.110	0.012	0.000	2.01	0.00600	2.44	373	218	0.012	0.145	0.0043	0.770	0.773	0.724	0.035
176	0.150	0.004	12.7	0.0557	0.110	0.012	0.000	3.05	0.00100	0.27	324	82	0.004	0.135	0.0075	0.427	0.452	0.553	-0.217
177	0.150	0.004	12.6	0.0557	0.110	0.012	0.000	3.05	0.00200	0.54	333	92	0.005	0.155	0.0073	0.488	0.510	0.572	-0.152
178	0.150	0.004	12.6	0.0557	0.110	0.012	0.000	3.05	0.00300	0.80	373	131	0.007	0.170	0.0064	0.549	0.571	0.515	-0.082
179	0.150	0.004	12.5	0.0557	0.110	0.012	0.000	3.05	0.00400	1.07	412	170	0.003	0.200	0.0065	0.626	0.551	0.635	0.021
180	0.150	0.004	12.4	0.0557	0.110	0.012	0.000	3.05	0.00600	1.61	461	217	0.013	0.225	0.0075	0.712	0.737	0.567	0.045
181	0.150	0.004	11.9	0.0553	0.110	0.012	0.000	4.08	0.00100	0.20	431	85	0.002	0.250	0.0083	0.641	0.701	0.524	0.252
182	0.150	0.004	11.7	0.0553	0.110	0.012	0.000	4.08	0.00200	0.40	461	115	0.003	0.275	0.0077	0.479	0.502	0.565	-0.125
183	0.150	0.004	11.8	0.0553	0.110	0.012	0.000	4.08	0.00400	0.79	539	193	0.005	0.310	0.0082	0.629	0.557	0.507	0.078
184	0.150	0.004	11.7	0.0553	0.110	0.012	0.000	4.08	0.00600	1.19	647	301	0.007	0.350	0.0084	0.801	0.842	0.635	0.246
185	0.308	0.004	13.1	0.0555	0.111	0.012	0.000	1.02	0.00050	0.40	127	67	0.003	0.040	0.0003	0.623	0.700	0.547	0.218
186	0.308	0.004	13.1	0.0555	0.111	0.012	0.000	1.02	0.00100	0.81	137	77	0.007	0.045	0.0003	0.534	0.568	0.587	-0.037
187	0.308	0.004	12.7	0.0557	0.110	0.012	0.000	1.02	0.00200	1.61	147	85	0.013	0.050	0.0003	0.501	0.520	0.535	-0.225
188	0.308	0.004	12.7	0.0557	0.110	0.012	0.000	1.02	0.00400	3.23	157	95	0.013	0.055	0.0003	0.772	0.800	0.685	0.144
189	0.308	0.004	12.6	0.0557	0.110	0.012	0.000	1.02	0.00600	4.84	177	115	0.011	0.060	0.0003	0.706	0.723	0.715	0.012
190	0.308	0.004	12.6	0.0557	0.110	0.012	0.000	1.02	0.00800	6.44	196	135	0.013	0.085	0.0003	0.749	0.768	0.715	0.069
191	0.308	0.004	12.7	0.0557	0.110	0.012	0.000	2.01	0.00050	0.20	147	85	0.003	0.055	0.0044	0.526	0.521	0.477	0.230
192	0.308	0.004	12.7	0.0557	0.110	0.012	0.000	2.01	0.00100	0.41	166	105	0.003	0.065	0.0041	0.448	0.488	0.515	-0.055
193	0.308	0.004	12.6	0.0557	0.110	0.012	0.000	2.01	0.00200	0.81	226	135	0.007	0.075	0.0041	0.559	0.577	0.554	0.072
194	0.308	0.004	12.4	0.0557	0.110	0.012	0.000	2.01	0.00400	1.63	245	155	0.007	0.085	0.0035	0.632	0.562	0.575	0.076
195	0.308	0.004	12.2	0.0553	0.110	0.012	0.000	2.01	0.00600	2.44	275	184	0.013	0.130	0.0043	0.752	1.005	0.525	0.378
196	0.308	0.004	12.9	0.0555	0.111	0.012	0.000	3.05	0.00100	0.27	216	85	0.005	0.135	0.0077	0.410	0.451	0.472	-0.045
197	0.308	0.004	12.9	0.0555	0.111	0.012	0.000	3.05	0.00200	0.54	226	95	0.005	0.150	0.0073	0.457	0.478	0.507	-0.015
198	0.308	0.004	12.9	0.0555	0.111	0.012	0.000	3.05	0.00300	0.81	245	114	0.005	0.160	0.0064	0.476	0.523	0.527	-0.015
199	0.308	0.004	12.7	0.0557	0.110	0.012	0.000	3.05	0.00400	1.07	255	124	0.007	0.175	0.0065	0.530	0.553	0.547	0.072
200	0.308	0.004	12.6	0.0557	0.110	0.012	0.000	3.05	0.00600	1.61	255	124	0.007	0.200	0.0075	0.576	0.621	0.571	0.050
201	0.308	0.004	12.9	0.0555	0.111	0.012	0.000	4.07	0.00100	0.20	265	85	0.004	0.230	0.0165	0.330	0.418	0.444	-0.053
202	0.308	0.004	12.7	0.0557	0.110	0.012	0.000	4.07	0.00200	0.40	275	95	0.005	0.250	0.0154	0.434	0.467	0.477	-0.026
203	0.308	0.004	12.6	0.0557	0.110	0.012	0.000	4.07	0.00400	0.80	294	115	0.005	0.270	0.0155	0.458	0.514	0.515	-0.002
204	0.308	0.004	12.5	0.0557	0.110	0.012	0.000	4.07	0.00600	1.20	324	145	0.007	0.300	0.0170	0.658	0.675	0.537	0.225
205	0.416	0.004	13.5	0.0555	0.111	0.012	0.000	1.02	0.00200	1.62	88	52	0.005	0.030	0.0003	0.816	0.857	0.527	0.374
206	0.416	0.004	13.4	0.0555	0.111	0.012	0.000	1.02	0.00400	3.24	98	61	0.005	0.035	0.0003	0.749	0.776	0.567	0.430
207	0.416	0.004	13.2	0.0555	0.111	0.012	0.000	1.02	0.00600	4.85	108	71	0.007	0.040	0.0003	0.252	0.265	0.374	-1.241
208	0.416	0.004	12.7	0.0557	0.110	0.012	0.000	2.02	0.00050	0.20	98	48	0.007	0.045	0.0033	0.476	0.578	0.403	0.509
209	0.416	0.004	12.5	0.0557	0.110	0.012	0.000	2.01	0.00100	0.41	108	58	0.007	0.050	0.0034	0.354	0.398	0.431	-0.044
210	0.416	0.004	12.3	0.0557	0.110	0.012	0.000	2.01	0.00200	0.82	118	67	0.005	0.050	0.0031	0.435	0.463	0.465	-0.055

Tab. 40.7 c.d.

NR	Γ_A	C_m	t	δ	π_{wzgl}	ZP	TP	W_G	WL	m_{LG}	Δp	Δp_f	h_0	H_f	e_{mg}	N_{OG}	N_G	$N_{G,old}$	δ_{wzgl}
—	—	kg/m ³	°C	N/m	—	m	—	m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg	—	—	—	—
221	0,150	0,004	13,6	0,0613	0,168	0,014	0,000	1,02	0,00025	0,20	226	123	0,014	0,055	0,0000	0,456	0,476	0,523	-0,252
222	0,150	0,004	13,3	0,0614	0,168	0,013	0,000	1,02	0,00050	0,40	235	138	0,015	0,070	0,0000	0,523	0,533	0,573	-0,059
223	0,150	0,004	13,3	0,0614	0,168	0,013	0,000	1,02	0,00100	0,81	284	187	0,017	0,075	0,0000	0,530	0,537	0,727	-0,102
224	0,150	0,004	13,1	0,0614	0,168	0,013	0,000	1,02	0,00200	1,62	333	235	0,022	0,110	0,0000	0,732	0,737	0,784	-0,033
225	0,150	0,004	13,1	0,0614	0,168	0,013	0,000	1,02	0,00400	3,24	412	314	0,023	0,135	0,0000	0,654	0,667	0,843	-0,253
226	0,150	0,004	13,2	0,0614	0,168	0,013	0,000	1,02	0,00600	4,85	530	432	0,035	0,170	0,0000	0,809	0,825	0,877	-0,056
227	0,150	0,004	13,0	0,0614	0,167	0,013	0,000	2,02	0,00050	0,20	324	108	0,003	0,110	0,0037	0,437	0,467	0,593	-0,254
228	0,150	0,004	12,7	0,0615	0,167	0,013	0,000	2,01	0,00100	0,41	343	127	0,007	0,120	0,0033	0,471	0,514	0,637	-0,238
229	0,150	0,004	12,9	0,0614	0,167	0,013	0,000	2,02	0,00200	0,82	373	157	0,011	0,140	0,0025	0,543	0,552	0,683	-0,216
230	0,150	0,004	12,7	0,0615	0,167	0,013	0,000	2,02	0,00400	1,63	588	372	0,023	0,225	0,0014	0,754	0,781	0,737	0,056
231	0,150	0,004	12,8	0,0615	0,167	0,013	0,000	2,01	0,00600	2,44	765	547	0,033	0,280	0,0015	0,849	0,878	0,767	0,124
232	0,150	0,004	14,1	0,0613	0,168	0,014	0,000	3,05	0,00050	0,13	471	94	0,002	0,170	0,0151	0,373	0,391	0,533	-0,370
233	0,150	0,004	14,0	0,0613	0,168	0,014	0,000	3,05	0,00100	0,27	510	134	0,003	0,200	0,0102	0,454	0,473	0,573	-0,217
234	0,150	0,004	13,7	0,0613	0,168	0,014	0,000	3,06	0,00200	0,54	677	301	0,007	0,270	0,0049	0,569	0,594	0,622	-0,047
235	0,150	0,004	13,6	0,0613	0,168	0,014	0,000	3,06	0,00300	0,81	834	457	0,013	0,340	0,0025	0,740	0,780	0,653	0,157
236	0,150	0,004	13,5	0,0614	0,168	0,013	0,000	3,05	0,00400	1,07	990	614	0,023	0,400	0,0013	0,753	0,818	0,671	0,340
237	0,214	0,004	12,7	0,0615	0,167	0,013	0,000	1,02	0,00025	0,20	177	91	0,011	0,050	0,0000	0,500	0,527	0,522	0,144
238	0,214	0,004	12,6	0,0615	0,167	0,013	0,000	1,02	0,00050	0,41	186	100	0,011	0,050	0,0000	0,733	0,845	0,670	0,207
239	0,214	0,004	12,5	0,0615	0,167	0,013	0,000	1,02	0,00100	0,81	226	140	0,013	0,075	0,0000	0,612	0,637	0,721	-0,073
240	0,214	0,004	12,6	0,0615	0,167	0,013	0,000	1,02	0,00200	1,62	275	187	0,017	0,075	0,0000	0,657	0,693	0,773	-0,117
241	0,214	0,004	12,7	0,0615	0,167	0,013	0,000	1,02	0,00400	3,24	333	247	0,017	0,110	0,0000	0,719	0,745	0,832	-0,117
242	0,214	0,004	12,8	0,0615	0,167	0,013	0,000	1,02	0,00600	4,86	343	257	0,021	0,120	0,0000	0,827	0,854	0,863	-0,016
243	0,214	0,004	13,4	0,0614	0,168	0,013	0,000	2,03	0,00050	0,21	245	94	0,007	0,075	0,0037	0,478	0,548	0,577	-0,052
244	0,214	0,004	13,2	0,0614	0,168	0,013	0,000	2,03	0,00100	0,41	255	104	0,007	0,075	0,0027	0,480	0,521	0,522	-0,122
245	0,214	0,004	12,9	0,0614	0,167	0,013	0,000	2,02	0,00200	0,82	294	143	0,007	0,105	0,0025	0,503	0,533	0,671	-0,257
246	0,214	0,004	12,8	0,0615	0,167	0,013	0,000	2,02	0,00400	1,64	333	182	0,011	0,130	0,0022	0,583	0,607	0,722	-0,187
247	0,214	0,004	12,8	0,0615	0,167	0,013	0,000	2,02	0,00600	2,46	343	192	0,014	0,150	0,0021	0,622	0,644	0,754	-0,171
248	0,214	0,004	12,0	0,0615	0,167	0,013	0,000	3,04	0,00100	0,27	304	65	0,004	0,140	0,0075	0,376	0,427	0,383	0,355
249	0,214	0,004	12,1	0,0615	0,167	0,013	0,000	3,04	0,00200	0,54	343	105	0,005	0,170	0,0053	0,426	0,448	0,627	-0,327
250	0,214	0,004	12,1	0,0615	0,167	0,013	0,000	3,04	0,00400	1,07	382	144	0,004	0,210	0,0031	0,502	0,524	0,674	-0,256
251	0,214	0,004	12,0	0,0615	0,167	0,013	0,000	3,04	0,00600	1,60	431	173	0,010	0,230	0,0047	0,603	0,531	0,704	-0,115
252	0,214	0,004	11,3	0,0617	0,167	0,012	0,000	4,08	0,00100	0,20	422	77	0,002	0,270	0,0283	0,419	0,455	0,553	-0,215
253	0,214	0,004	11,1	0,0617	0,167	0,012	0,000	4,08	0,00200	0,40	461	118	0,002	0,270	0,0255	0,408	0,428	0,593	-0,323
254	0,214	0,004	10,7	0,0617	0,167	0,012	0,000	4,08	0,00400	0,79	530	187	0,007	0,315	0,0153	0,523	0,555	0,643	-0,158
255	0,214	0,004	10,8	0,0613	0,167	0,012	0,000	4,08	0,00600	1,19	677	334	0,013	0,350	0,0123	0,706	0,737	0,672	0,112
256	0,308	0,004	15,3	0,0611	0,168	0,014	0,000	1,02	0,00050	0,40	118	60	0,003	0,040	0,0000	0,520	0,583	0,562	0,045
257	0,308	0,004	15,0	0,0611	0,168	0,014	0,000	1,02	0,00200	1,62	167	107	0,011	0,055	0,0000	0,437	0,456	0,552	-0,430
258	0,308	0,004	15,2	0,0611	0,168	0,014	0,000	2,01	0,00050	0,20	157	67	0,003	0,055	0,0037	0,427	0,505	0,487	0,033
259	0,308	0,004	15,3	0,0611	0,168	0,014	0,000	2,01	0,00200	0,82	186	97	0,007	0,080	0,0035	0,481	0,517	0,563	-0,025
260	0,308	0,004	15,8	0,0610	0,169	0,013	0,000	3,08	0,00050	0,14	186	58	0,005	0,115	0,0070	0,358	0,457	0,443	-0,018
261	0,308	0,004	15,9	0,0610	0,169	0,013	0,000	3,08	0,00100	0,27	196	68	0,005	0,140	0,0054	0,356	0,395	0,473	-0,210
262	0,308	0,004	15,9	0,0610	0,169	0,013	0,000	3,08	0,00200	0,54	216	87	0,005	0,150	0,0057	0,353	0,387	0,514	-0,323
263	0,308	0,004	15,8	0,0610	0,169	0,013	0,000	3,08	0,00400	1,08	245	117	0,007	0,175	0,0057	0,444	0,466	0,553	-0,185
264	0,308	0,004	15,9	0,0610	0,169	0,013	0,000	3,08	0,00600	1,63	275	145	0,003	0,195	0,0057	0,763	0,818	0,573	0,226
265	0,308	0,004	15,3	0,0611	0,168	0,014	0,000	4,13	0,00200	0,40	255	78	0,005	0,250	0,0033	0,363	0,394	0,487	-0,235
266	0,308	0,004	15,2	0,0611	0,168	0,014	0,000	4,13	0,00400	0,80	265	88	0,007	0,250	0,0131	0,453	0,484	0,524	-0,084
267	0,416	0,004	15,2	0,0611	0,168	0,014	0,000	1,02	0,00200	1,62	69	34	0,005	0,035	0,0000	0,803	0,878	0,543	0,377
268	0,416	0,004	15,1	0,0611	0,168	0,014	0,000	1,02	0,00400	3,24	69	34	0,007	0,033	0,0000	0,721	0,780	0,543	0,330
269	0,416	0,004	15,3	0,0610	0,168	0,014	0,000	2,01	0,00050	0,20	88	40	0,003	0,030	0,0027	0,401	0,477	0,407	0,177
270	0,416	0,004	15,2	0,0611	0,168	0,014	0,000	2,01	0,00200	0,82	98	50	0,007	0,030	0,0023	0,376	0,405	0,474	-0,171
271	0,416	0,004	15,4	0,0611	0,168	0,014	0,000	3,05	0,00200	0,54	118	51	0,005	0,130	0,0054	0,311	0,334	0,433	-0,303
272	0,416	0,004	15,3	0,0610	0,168	0,014	0,000	3,05	0,00400	1,08	127	61	0,007	0,145	0,0050	0,354	0,384	0,467	-0,217
273	0,416	0,004	15,3	0,0610	0,168	0,014	0,000	4,10	0,00050	0,10	127	37	0,005	0,210	0,0145	0,331	0,427	0,354	0,175
274	0,416	0,004	15,3	0,0610	0,168	0,014	0,000	4,10	0,00100	0,20	137	67	0,005	0,240	0,0152	0,323	0,380	0,381	-0,002
275	0,416	0,004	15,3	0,0610	0,168	0,014	0,000	4,10	0,00200	0,40	167	77	0,007	0,250	0,0077	0,337	0,373	0,407	-0,028
276	0,416	0,004	15,6	0,0610	0,168	0,014	0,000	4,10	0,00400	0,80	186	98	0,007	0,250	0,0105	0,331	0,352	0,443	-0,247
277	0,416	0,004	15,6	0,0610	0,168	0,013	0,000	4,10	0,00600	1,20	196	103	0,007	0,270	0,0185	0,474	0,528	0,457	0,132

Tab. 10.7. c.d.

NR	Γ_A	C_m	t	δ	π_{wzyl}	ZP	TP	W_G	W_L	m_{LG}	Δp	Δp_f	h_0	H_f	e_{mg}	N_{OG}	N_G	$N_{G,obl}$	δ_{obl}
—	—	kg/m ³	°C	N/m	—	m	—	m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg	—	—	—	—
278	0.150	0.010	15.2	0.0533	0.265	0.019	0.301	1.02	0.00025	0.20	245.151	0.017	0.110	0.0003	0.422	0.544	0.572	-0.052	
279	0.150	0.010	15.2	0.0540	0.265	0.019	0.286	1.02	0.00050	0.40	275.181	0.020	0.135	0.0003	0.627	0.680	0.617	-0.082	
280	0.150	0.010	15.2	0.0540	0.265	0.019	0.286	1.02	0.00100	0.81	314.220	0.023	0.145	0.0003	0.711	0.754	0.565	-0.117	
281	0.150	0.010	15.2	0.0540	0.265	0.019	0.286	1.02	0.00200	1.61	363.262	0.027	0.150	0.0003	0.738	0.767	0.715	-0.057	
282	0.150	0.010	15.0	0.0540	0.265	0.019	0.277	1.02	0.00400	3.22	461.367	0.033	0.180	0.0003	0.733	0.752	0.775	-0.022	
283	0.150	0.010	15.3	0.0540	0.265	0.019	0.289	2.02	0.00050	0.20	324.111	0.007	0.115	0.0035	0.403	0.451	0.535	-0.244	
284	0.150	0.010	15.2	0.0540	0.265	0.019	0.284	2.02	0.00200	0.82	510.207	0.014	0.230	0.0014	0.653	0.687	0.621	-0.024	
285	0.150	0.010	14.7	0.0540	0.265	0.019	0.268	3.06	0.00050	0.13	481.109	0.004	0.180	0.0177	0.358	0.372	0.425	-0.244	
286	0.150	0.010	14.8	0.0540	0.265	0.019	0.272	3.06	0.00200	0.54	765.392	0.017	0.360	0.0033	0.652	0.707	0.573	-0.171	
287	0.150	0.010	14.8	0.0540	0.265	0.019	0.272	3.06	0.00200	0.54	765.392	0.017	0.360	0.0033	0.652	0.707	0.573	-0.171	
288	0.14	0.010	15.3	0.0533	0.266	0.020	0.323	1.02	0.00050	0.41	255.175	0.013	0.130	0.0003	0.536	0.508	0.537	-0.015	
289	0.14	0.010	15.2	0.0533	0.266	0.019	0.315	1.02	0.00200	1.62	284.204	0.021	0.145	0.0003	0.603	0.558	0.672	-0.052	
290	0.14	0.010	17.1	0.0537	0.266	0.020	0.340	2.03	0.00025	0.10	226.80	0.003	0.080	0.0037	0.336	0.377	0.481	-0.211	
291	0.14	0.010	16.3	0.0533	0.266	0.019	0.316	2.03	0.00050	0.21	255.90	0.007	0.075	0.0030	0.377	0.423	0.522	-0.233	
292	0.14	0.010	16.3	0.0533	0.266	0.019	0.318	2.03	0.00100	0.41	255.110	0.007	0.100	0.0027	0.421	0.456	0.561	-0.231	
293	0.14	0.010	16.4	0.0533	0.266	0.020	0.321	2.03	0.00200	0.82	284.137	0.010	0.115	0.0025	0.404	0.424	0.505	-0.223	
294	0.14	0.010	16.4	0.0533	0.266	0.020	0.321	2.03	0.00400	1.64	304.153	0.013	0.145	0.0023	0.537	0.557	0.647	-0.152	
295	0.14	0.010	16.3	0.0533	0.266	0.019	0.316	3.07	0.00200	0.54	333.103	0.007	0.180	0.0081	0.413	0.438	0.555	-0.257	
296	0.14	0.010	16.3	0.0533	0.266	0.019	0.316	3.07	0.00400	1.08	382.147	0.007	0.225	0.0056	0.504	0.528	0.597	-0.139	
297	0.14	0.010	15.8	0.0533	0.265	0.019	0.302	4.12	0.00200	0.40	441.102	0.005	0.300	0.0257	0.402	0.422	0.525	-0.225	
298	0.14	0.010	15.7	0.0537	0.265	0.019	0.300	4.12	0.00400	0.80	579.237	0.010	0.350	0.0162	0.575	0.516	0.565	-0.042	
299	0.308	0.010	17.9	0.0535	0.266	0.020	0.358	1.03	0.00050	0.41	118.65	0.003	0.045	0.0003	0.579	0.582	0.507	-0.257	
300	0.308	0.010	17.5	0.0535	0.266	0.020	0.350	1.03	0.00200	1.63	186.134	0.013	0.105	0.0003	0.472	0.422	0.547	-0.172	
301	0.308	0.010	17.0	0.0537	0.266	0.020	0.355	2.03	0.00050	0.21	167.64	0.003	0.050	0.0033	0.425	0.329	0.443	-0.145	
302	0.308	0.010	17.2	0.0537	0.266	0.020	0.341	2.03	0.00200	0.82	177.94	0.007	0.110	0.0033	0.358	0.415	0.513	-0.235	
303	0.308	0.010	16.7	0.0537	0.266	0.020	0.329	3.07	0.00050	0.14	216.92	0.005	0.125	0.0075	0.334	0.401	0.413	-0.023	
304	0.308	0.010	16.8	0.0537	0.266	0.020	0.330	3.07	0.00100	0.27	226.102	0.005	0.150	0.0072	0.338	0.380	0.441	-0.151	
305	0.308	0.010	16.5	0.0533	0.266	0.020	0.323	3.07	0.00200	0.54	255.112	0.005	0.170	0.0067	0.339	0.364	0.475	-0.156	
306	0.308	0.010	16.5	0.0533	0.266	0.020	0.322	3.07	0.00400	1.08	255.131	0.007	0.185	0.0057	0.432	0.457	0.511	-0.118	
307	0.308	0.010	16.1	0.0533	0.266	0.019	0.312	3.07	0.00600	1.62	275.151	0.007	0.210	0.0082	0.508	0.537	0.553	-0.032	
308	0.308	0.010	15.7	0.0537	0.265	0.019	0.300	4.12	0.00200	0.40	275.103	0.005	0.280	0.0160	0.387	0.426	0.452	-0.053	
309	0.308	0.010	15.3	0.0540	0.265	0.019	0.287	4.11	0.00400	0.80	304.132	0.007	0.300	0.0167	0.483	0.523	0.483	-0.057	
310	0.416	0.010	16.1	0.0533	0.266	0.019	0.312	1.02	0.00100	0.81	69.37	0.005	0.035	0.0003	0.369	0.377	0.465	-0.171	
311	0.416	0.010	16.2	0.0533	0.266	0.019	0.314	1.02	0.00200	1.63	78.47	0.007	0.040	0.0003	0.513	0.350	0.503	-0.071	
312	0.416	0.010	15.9	0.0537	0.265	0.019	0.304	2.02	0.00050	0.21	88.43	0.007	0.055	0.0035	0.425	0.352	0.377	-0.116	
313	0.416	0.010	16.1	0.0533	0.266	0.019	0.311	2.02	0.00200	0.82	108.68	0.003	0.055	0.0034	0.332	0.357	0.435	-0.218	
314	0.416	0.010	15.6	0.0537	0.265	0.019	0.297	3.07	0.00200	0.54	118.54	0.005	0.130	0.0067	0.314	0.342	0.402	-0.174	
315	0.416	0.010	15.3	0.0537	0.265	0.019	0.295	3.07	0.00400	1.08	137.74	0.007	0.145	0.0075	0.372	0.377	0.455	-0.070	
316	0.416	0.010	15.6	0.0537	0.265	0.019	0.296	4.11	0.00050	0.10	157.52	0.004	0.220	0.0147	0.309	0.403	0.527	-0.198	
317	0.416	0.010	15.5	0.0537	0.265	0.019	0.294	4.11	0.00100	0.20	157.72	0.004	0.250	0.0157	0.455	0.346	0.517	-0.155	
318	0.416	0.010	15.4	0.0537	0.265	0.019	0.290	4.11	0.00200	0.40	167.82	0.005	0.270	0.0153	0.377	0.377	0.510	-0.052	
319	0.416	0.010	15.3	0.0540	0.265	0.019	0.288	4.11	0.00400	0.80	177.91	0.005	0.270	0.0153	0.377	0.451	0.407	-0.052	
320	0.416	0.010	15.2	0.0540	0.265	0.019	0.283	4.11	0.00600	1.20	196.111	0.007	0.300	0.0174	0.467	0.428	0.477	-0.145	
321	0.150	0.015	17.3	0.0502	0.314	0.025	0.384	1.02	0.00025	0.20	265.172	0.018	0.145	0.0003	0.424	0.533	0.507	-0.055	
322	0.150	0.015	16.9	0.0502	0.314	0.025	0.379	1.02	0.00050	0.41	294.202	0.022	0.155	0.0003	0.527	0.552	0.567	-0.141	
323	0.150	0.015	16.9	0.0502	0.314	0.025	0.380	1.02	0.00100	0.81	333.241	0.024	0.155	0.0003	0.724	0.762	0.523	-0.225	
324	0.150	0.015	16.8	0.0502	0.314	0.025	0.379	1.02	0.00200	1.62	362.300	0.028	0.120	0.0003	0.702	0.724	0.635	-0.125	
325	0.150	0.015	16.8	0.0502	0.314	0.025	0.379	1.02	0.00400	1.62	392.300	0.028	0.120	0.0003	0.702	0.724	0.635	-0.125	
326	0.150	0.015	16.9	0.0502	0.314	0.025	0.380	2.03	0.00050	0.20	333.122	0.007	0.125	0.0050	0.372	0.414	0.477	-0.152	
327	0.150	0.015	16.7	0.0503	0.314	0.025	0.377	2.02	0.00200	0.82	588.387	0.023	0.240	0.0013	0.678	0.711	0.553	-0.222	
328	0.150	0.015	16.6	0.0503	0.314	0.025	0.377	3.07	0.00050	0.13	481.102	0.004	0.185	0.0207	0.330	0.323	0.437	-0.358	
329	0.150	0.015	16.3	0.0503	0.313	0.025	0.374	3.07	0.00100	0.27	547.177	0.007	0.230	0.0074	0.420	0.459	0.475	-0.077	
330	0.150	0.015	16.3	0.0503	0.313	0.025	0.374	3.07	0.00100	0.27	547.177	0.007	0.230	0.0074	0.420	0.459	0.475	-0.077	
331	0.14	0.015	17.2	0.0502	0.314	0.025	0.383	1.04	0.00050	0.41	255.178	0.013	0.140	0.0003	0.533	0.575	0.533	-0.102	
332	0.14	0.015	17.3	0.0502	0.314	0.025	0.384	1.04	0.00200	1.64	284.207	0.022	0.155	0.0003	0.648	0.581	0.615	-0.023	
333	0.14	0.015	17.3	0.0501	0.314	0.025	0.386	2.05	0.00025	0.10	216.73	0.003	0.075	0.0033	0.272	0.327	0.431	-0.310	
334	0.14	0.015	17.1	0.0502	0.314	0.025	0.382	2.05	0.00050	0.21	245.102	0.007	0.105	0.0034	0.347	0.380	0.465	-0.224	
335	0.14	0.015	17.1	0.0502	0.314	0.025	0.382	2.05	0.00100	0.42	255.112	0.010	0.110	0.0031	0.407	0.435	0.503	-0.151	
336	0.14	0.015	17.2	0.0502	0.314	0.025	0.383	2.05	0.00200	0.83	284.141	0.010	0.125	0.0030	0.433	0.452	0.535	-0.120	
337	0.14	0.015	17.1	0.0502	0.314	0.025	0.382	2.05	0.00400	1.66	314.171	0.013	0.150	0.0023	0.552	0.572	0.575	-0.011	
338	0.14	0.015	17.1	0.0502	0.314	0.025	0.382	3.10	0.00200	0.55	343.111	0.007	0.185	0.0073	0.386	0.404	0.494	-0.223	
339	0.14	0.015	16.9	0															

Tab. 10.7. c.d.

NR	r_A	C_m	t	G	Π_{wzgl}	ZP	TP	W_G	W_L	m_{LG}	Δp	Δp_f	h_0	H_f	e_{mg}	N_{ox}	N_G	N_{Gobl}	Δw_{zgl}
—	—	kg/m ³	°C	N/m	—	m	—	m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg	—	—	—	—
364	0.150	0.025	15.3	0.0460	0.374	0.030	0.745	1.02	0.00025	0.20	284	144	0.021	0.150	0.0003	0.559	0.587	0.475	0.147
365	0.150	0.025	15.4	0.0460	0.374	0.030	0.745	1.02	0.00050	0.40	324	234	0.023	0.180	0.0003	0.611	0.547	0.512	0.211
366	0.150	0.025	15.5	0.0460	0.374	0.030	0.744	1.02	0.00100	0.81	353	263	0.027	0.200	0.0003	0.715	0.746	0.551	0.252
367	0.150	0.025	15.4	0.0460	0.374	0.030	0.745	1.02	0.00200	1.62	431	341	0.031	0.220	0.0003	0.817	0.844	0.572	0.278
368	0.150	0.025	15.4	0.0460	0.374	0.030	0.745	1.02	0.00200	1.62	431	341	0.031	0.220	0.0003	0.817	0.844	0.572	0.278
369	0.150	0.025	15.4	0.0460	0.374	0.030	0.745	2.02	0.00050	0.20	343	134	0.010	0.140	0.0045	0.384	0.402	0.445	-0.126
370	0.150	0.025	15.4	0.0460	0.374	0.030	0.745	2.02	0.00050	0.20	343	134	0.010	0.140	0.0045	0.384	0.402	0.445	-0.126
371	0.150	0.025	15.2	0.0460	0.374	0.030	0.744	3.06	0.00050	0.15	490	121	0.004	0.120	0.0188	0.324	0.358	0.401	-0.211
372	0.150	0.025	15.3	0.0460	0.374	0.030	0.744	3.06	0.00100	0.27	686	317	0.015	0.350	0.0041	0.489	0.518	0.443	0.150
373	0.214	0.025	16.4	0.0461	0.373	0.030	0.739	1.02	0.00050	0.41	275	201	0.023	0.155	0.0003	0.560	0.513	0.504	0.144
374	0.214	0.025	16.3	0.0461	0.373	0.030	0.739	1.02	0.00200	1.65	304	230	0.022	0.175	0.0003	0.634	0.661	0.584	0.118
375	0.214	0.025	16.2	0.0461	0.373	0.030	0.738	2.03	0.00025	0.10	226	85	0.003	0.105	0.0047	0.277	0.350	0.405	-0.255
376	0.214	0.025	16.2	0.0461	0.373	0.030	0.739	2.03	0.00050	0.21	226	87	0.007	0.115	0.0045	0.349	0.375	0.432	-0.155
377	0.214	0.025	16.1	0.0461	0.373	0.030	0.738	2.03	0.00100	0.41	255	115	0.010	0.130	0.0041	0.389	0.411	0.472	-0.142
378	0.214	0.025	15.8	0.0462	0.373	0.030	0.736	2.03	0.00200	0.82	284	145	0.010	0.140	0.0041	0.429	0.445	0.505	-0.141
379	0.214	0.025	15.7	0.0462	0.373	0.030	0.736	2.02	0.00400	1.64	333	194	0.014	0.180	0.0033	0.556	0.574	0.547	0.044
380	0.214	0.025	15.7	0.0462	0.373	0.030	0.736	3.07	0.00200	0.54	343	115	0.007	0.120	0.0105	0.378	0.415	0.467	-0.126
381	0.214	0.025	15.6	0.0462	0.373	0.029	0.735	3.07	0.00400	1.08	412	185	0.010	0.250	0.0072	0.509	0.528	0.505	0.048
382	0.214	0.025	15.1	0.0463	0.373	0.029	0.732	4.12	0.00200	0.40	470	158	0.004	0.315	0.0221	0.415	0.453	0.441	-0.017
383	0.214	0.025	15.1	0.0463	0.373	0.029	0.732	4.12	0.00200	0.40	470	158	0.004	0.315	0.0221	0.415	0.453	0.441	-0.017
384	0.308	0.025	15.6	0.0458	0.374	0.031	0.751	1.03	0.00050	0.41	127	80	0.003	0.055	0.0003	0.447	0.470	0.427	0.124
385	0.308	0.025	15.7	0.0458	0.374	0.031	0.751	1.03	0.00200	1.64	206	158	0.014	0.115	0.0003	0.445	0.461	0.475	-0.076
386	0.308	0.025	15.6	0.0458	0.374	0.031	0.751	2.04	0.00050	0.21	147	62	0.003	0.070	0.0055	0.355	0.400	0.375	0.057
387	0.308	0.025	15.4	0.0459	0.374	0.031	0.750	2.04	0.00200	0.83	206	129	0.007	0.120	0.0044	0.346	0.362	0.432	-0.124
388	0.308	0.025	15.1	0.0459	0.374	0.031	0.749	3.08	0.00050	0.14	196	78	0.005	0.150	0.0107	0.272	0.304	0.345	-0.150
389	0.308	0.025	15.1	0.0459	0.374	0.031	0.749	3.08	0.00100	0.27	206	88	0.005	0.150	0.0103	0.310	0.355	0.367	-0.103
390	0.308	0.025	15.2	0.0459	0.374	0.031	0.749	3.09	0.00200	0.54	226	107	0.007	0.180	0.0105	0.305	0.320	0.397	-0.257
391	0.308	0.025	15.2	0.0459	0.374	0.031	0.749	3.09	0.00400	1.09	235	117	0.008	0.170	0.0077	0.400	0.416	0.427	-0.025
392	0.308	0.025	15.3	0.0459	0.374	0.031	0.749	3.09	0.00600	1.65	255	155	0.009	0.215	0.0113	0.456	0.473	0.445	0.057
393	0.308	0.025	15.0	0.0459	0.374	0.031	0.748	4.14	0.00200	0.40	284	117	0.005	0.320	0.0235	0.342	0.384	0.374	-0.027
394	0.308	0.025	15.1	0.0459	0.374	0.031	0.749	4.14	0.00400	0.81	314	147	0.007	0.330	0.0235	0.437	0.451	0.402	0.126
395	0.416	0.025	15.6	0.0459	0.374	0.031	0.746	1.03	0.00100	0.81	78	50	0.007	0.045	0.0003	0.326	0.343	0.383	-0.152
396	0.416	0.025	15.3	0.0460	0.374	0.030	0.746	1.03	0.00200	1.65	78	50	0.007	0.050	0.0003	0.355	0.383	0.415	-0.283
397	0.416	0.025	15.3	0.0460	0.374	0.030	0.746	2.03	0.00050	0.21	88	47	0.007	0.050	0.0045	0.500	0.523	0.514	0.425
398	0.416	0.025	15.8	0.0459	0.374	0.031	0.747	2.03	0.00200	0.82	118	75	0.003	0.075	0.0052	0.351	0.372	0.355	0.023
399	0.416	0.025	15.6	0.0460	0.374	0.030	0.746	3.07	0.00200	0.54	137	78	0.005	0.155	0.0105	0.279	0.295	0.354	-0.151
400	0.416	0.025	15.6	0.0460	0.374	0.031	0.746	3.07	0.00400	1.08	157	75	0.005	0.165	0.0102	0.277	0.286	0.357	-0.255
401	0.416	0.025	15.2	0.0460	0.374	0.030	0.744	4.12	0.00050	0.10	157	75	0.004	0.280	0.0217	0.275	0.324	0.295	0.150
402	0.416	0.025	15.3	0.0460	0.374	0.030	0.744	4.12	0.00100	0.20	167	85	0.005	0.300	0.0205	0.358	0.426	0.295	0.312
403	0.416	0.025	15.5	0.0460	0.374	0.030	0.745	4.12	0.00200	0.40	177	95	0.005	0.310	0.0242	0.312	0.355	0.515	0.051
404	0.416	0.025	15.5	0.0460	0.374	0.030	0.746	4.12	0.00400	0.81	196	115	0.005	0.315	0.0275	0.389	0.412	0.353	0.177
405	0.416	0.025	15.6	0.0460	0.374	0.030	0.746	4.12	0.00600	1.21	206	124	0.007	0.320	0.0277	0.452	0.477	0.355	0.259
406	0.150	0.040	15.5	0.0420	0.427	0.033	0.876	1.01	0.00025	0.20	304	216	0.023	0.175	0.0003	0.489	0.531	0.465	0.112
407	0.150	0.040	15.0	0.0421	0.427	0.033	0.875	1.01	0.00050	0.40	363	275	0.028	0.230	0.0003	0.588	0.627	0.504	0.174
408	0.150	0.040	15.2	0.0421	0.427	0.033	0.876	1.01	0.00100	0.80	422	334	0.033	0.250	0.0003	0.661	0.672	0.547	0.217
409	0.150	0.040	15.2	0.0421	0.427	0.033	0.875	1.01	0.00200	1.61	467	352	0.035	0.310	0.0003	0.808	0.841	0.585	0.256
410	0.150	0.040	15.0	0.0421	0.427	0.033	0.875	2.00	0.00050	0.20	559	353	0.025	0.310	0.0014	0.502	0.548	0.455	0.230
411	0.150	0.040	15.0	0.0421	0.427	0.033	0.875	2.00	0.00050	0.20	559	353	0.025	0.310	0.0014	0.502	0.548	0.455	0.230
412	0.150	0.040	15.6	0.0421	0.427	0.033	0.874	1.04	0.00050	0.15	481	115	0.003	0.200	0.0277	0.330	0.345	0.405	-0.124
413	0.150	0.040	15.6	0.0421	0.427	0.033	0.874	1.04	0.00050	0.15	481	115	0.003	0.200	0.0277	0.330	0.345	0.405	-0.124
414	0.214	0.040	15.7	0.0420	0.427	0.033	0.877	1.02	0.00050	0.40	284	214	0.023	0.140	0.0003	0.515	0.565	0.426	0.122
415	0.214	0.040	15.3	0.0421	0.427	0.033	0.876	1.02	0.00050	0.61	314	245	0.022	0.120	0.0003	0.612	0.560	0.572	0.155
416	0.214	0.040	15.2	0.0421	0.427	0.033	0.875	2.01	0.00050	0.10	226	90	0.003	0.120	0.0055	0.276	0.305	0.403	-0.112
417	0.214	0.040	15.2	0.0421	0.427	0.033	0.875	2.01	0.00050	0.20	245	110	0.007	0.140	0.0045	0.357	0.364	0.410	-0.142
418	0.214	0.040	15.1	0.0421	0.427	0.033	0.875	2.01	0.00100	0.41	265	122	0.011	0.150	0.0038	0.404	0.422	0.465	-0.074
419	0.214	0.040	15.1	0.0421	0.427	0.033	0.875	2.01	0.00200	0.82	294	152	0.011	0.155	0.0045	0.429	0.445	0.435	-0.115
420	0.214	0.040	16.8	0.0421	0.427	0.033	0.875	2.01	0.00400	1.65	363	227	0.015	0.220	0.0034	0.545	0.501	0.535	0.045
421	0.214	0.040	16.7	0.0421	0.427	0.033	0.874	3.05	0.00200	0.54	363	140	0.007	0.200	0.0117	0.334	0.400	0.455	-0.145
422	0.214	0.040	16.3	0.0422	0.427	0.032	0.874	3.05	0.00400	1.07	471	247	0.014	0.320	0.0084	0.518	0.540	0.475	0.087
423	0.214	0.040	16.2	0.0422	0.427	0.032	0.873	4.09	0.00200	0.40	510	182	0.005	0.330	0.0205	0.320	0.408		

Tab. 10.7. c.d.

NR	r_A	C_m	t	δ	π_{wzql}	ZP	TP	W_G	W_L	m_{LG}	Δp	Δp_f	h_0	H_f	e_{mg}	N_{OG}	N_G	N_{cubl}	δ_{wzql}
—	—	kg/m ³	°C	N/m	—	m	—	m/s	m/s	kg/kg	N/m ²	N/m ²	m	m	kg/kg	—	—	—	—
447	0.150	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.038	0.807	1.02	0.00025	0.20	343	257	0.025	0.230	0.0003	0.480	0.517	0.455	0.118
448	0.150	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.037	0.807	1.02	0.00030	0.41	402	315	0.031	0.250	0.0003	0.587	0.522	0.423	0.212
449	0.150	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.037	0.807	1.02	0.00100	0.81	532	453	0.043	0.310	0.0003	0.716	0.631	0.523	0.278
450	0.150	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.037	0.807	1.02	0.00100	0.81	532	453	0.043	0.310	0.0003	0.716	0.631	0.523	0.278
451	0.150	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.037	0.807	2.03	0.00025	0.10	314	105	0.007	0.150	0.0057	0.221	0.306	0.525	-0.224
452	0.150	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.037	0.807	2.03	0.00025	0.10	314	105	0.007	0.150	0.0057	0.221	0.306	0.525	-0.224
453	0.150	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.038	0.807	2.03	0.00025	0.10	304	95	0.003	0.155	0.0057	0.221	0.306	0.525	-0.223
454	0.150	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.037	0.807	3.07	0.00050	0.14	471	104	0.002	0.220	0.0222	0.222	0.300	0.521	-0.335
455	0.214	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.037	0.807	1.03	0.00050	0.41	294	225	0.022	0.200	0.0003	0.511	0.357	0.481	0.135
456	0.214	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.037	0.807	1.03	0.00200	1.65	333	265	0.023	0.210	0.0003	0.583	0.504	0.557	0.074
457	0.214	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.038	0.808	2.04	0.00025	0.10	226	92	0.003	0.135	0.0057	0.252	0.310	0.587	-0.255
458	0.214	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.038	0.807	2.04	0.00050	0.21	255	121	0.010	0.170	0.0058	0.370	0.400	0.415	-0.045
459	0.214	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.038	0.807	2.04	0.00100	0.41	275	141	0.011	0.180	0.0058	0.415	0.432	0.450	-0.025
460	0.214	0.060	17.6	0.0383	0.469	0.038	0.808	2.04	0.00200	0.85	284	151	0.011	0.185	0.0055	0.441	0.457	0.484	-0.058
461	0.214	0.060	17.8	0.0383	0.469	0.038	0.808	2.04	0.00400	1.65	382	262	0.017	0.250	0.0051	0.601	0.522	0.523	-0.154
462	0.214	0.060	17.8	0.0383	0.469	0.038	0.808	3.07	0.00100	0.21	314	92	0.005	0.200	0.0123	0.330	0.367	0.415	-0.120
463	0.214	0.060	18.0	0.0387	0.469	0.038	0.809	3.07	0.00200	0.54	363	140	0.007	0.220	0.0185	0.383	0.377	0.464	-0.178
464	0.308	0.060	20.6	0.0385	0.470	0.039	0.815	1.04	0.00050	0.41	127	85	0.003	0.050	0.0003	0.433	0.471	0.407	0.131
465	0.308	0.060	20.6	0.0385	0.470	0.039	0.815	1.04	0.00200	1.65	216	173	0.015	0.135	0.0003	0.382	0.524	0.474	-0.232
466	0.308	0.060	20.6	0.0385	0.470	0.039	0.815	2.05	0.00050	0.21	147	74	0.003	0.080	0.0082	0.341	0.500	0.555	0.053
467	0.308	0.060	20.4	0.0385	0.470	0.039	0.815	2.05	0.00200	0.85	194	123	0.002	0.140	0.0072	0.225	0.506	0.412	-0.348
468	0.308	0.060	20.4	0.0385	0.470	0.039	0.814	3.10	0.00050	0.14	186	72	0.005	0.180	0.0154	0.242	0.266	0.525	-0.350
469	0.308	0.060	20.1	0.0385	0.470	0.039	0.814	3.10	0.00100	0.21	194	82	0.002	0.145	0.0163	0.244	0.505	0.555	-0.158
470	0.308	0.060	17.9	0.0385	0.470	0.039	0.814	3.10	0.00200	0.55	216	107	0.007	0.200	0.0105	0.344	0.567	0.577	-0.055
471	0.308	0.060	17.9	0.0385	0.470	0.039	0.814	3.10	0.00400	1.09	235	121	0.003	0.210	0.0122	0.357	0.548	0.403	-0.174
472	0.308	0.060	20.1	0.0385	0.470	0.039	0.814	3.10	0.00600	1.64	255	141	0.007	0.220	0.0204	0.346	0.527	0.475	-0.075
473	0.308	0.060	17.6	0.0385	0.470	0.039	0.813	4.16	0.00700	0.41	275	117	0.005	0.340	0.0312	0.518	0.555	0.555	-0.058
474	0.308	0.060	17.2	0.0385	0.470	0.038	0.812	4.16	0.00400	0.81	314	151	0.003	0.350	0.0305	0.548	0.605	0.585	0.050
475	0.416	0.060	20.4	0.0385	0.470	0.039	0.815	1.03	0.00100	0.82	88	65	0.005	0.045	0.0003	0.352	0.547	0.573	-0.055
476	0.416	0.060	20.3	0.0385	0.470	0.039	0.815	1.03	0.00200	1.64	88	65	0.005	0.045	0.0003	0.483	0.504	0.525	-0.210
477	0.416	0.060	20.3	0.0385	0.470	0.039	0.815	2.04	0.00050	0.21	88	50	0.007	0.055	0.0072	0.309	0.520	0.277	0.144
478	0.416	0.060	20.3	0.0385	0.470	0.039	0.815	2.04	0.00200	0.85	108	62	0.003	0.085	0.0057	0.270	0.282	0.545	-0.222
479	0.416	0.060	20.2	0.0385	0.470	0.039	0.814	3.07	0.00200	0.55	118	61	0.005	0.155	0.0142	0.211	0.212	0.315	-0.457
480	0.416	0.060	20.4	0.0385	0.470	0.039	0.815	3.07	0.00400	1.09	127	71	0.005	0.180	0.0157	0.239	0.246	0.342	-0.321
481	0.416	0.060	20.1	0.0385	0.470	0.039	0.814	4.15	0.00050	0.10	147	68	0.004	0.315	0.0254	0.198	0.221	0.257	-0.175
482	0.416	0.060	20.3	0.0385	0.470	0.039	0.815	4.15	0.00100	0.20	157	78	0.005	0.320	0.0274	0.227	0.246	0.277	-0.135
483	0.416	0.060	20.5	0.0385	0.470	0.039	0.815	4.15	0.00200	0.41	177	98	0.005	0.325	0.0225	0.246	0.260	0.303	-0.155
484	0.416	0.060	20.6	0.0385	0.470	0.039	0.815	4.15	0.00400	0.81	186	108	0.005	0.330	0.0222	0.336	0.352	0.325	-0.084
485	0.416	0.060	20.4	0.0385	0.470	0.039	0.815	4.15	0.00600	1.21	196	117	0.005	0.340	0.0467	0.370	0.385	0.337	-0.124
486	0.150	0.100	17.1	0.0355	0.512	0.045	0.842	1.02	0.00025	0.20	539	454	0.045	0.350	0.0003	0.444	0.474	0.432	0.082
487	0.150	0.100	18.8	0.0355	0.512	0.045	0.841	1.02	0.00050	0.40	735	651	0.065	0.450	0.0003	0.618	0.552	0.465	0.223
488	0.150	0.100	18.9	0.0355	0.512	0.045	0.842	1.02	0.00100	0.81	981	825	0.085	0.550	0.0003	0.757	0.627	0.501	0.372
489	0.150	0.100	18.9	0.0355	0.512	0.045	0.842	1.02	0.00100	0.81	981	825	0.085	0.550	0.0003	0.757	0.627	0.501	0.372
490	0.214	0.100	17.4	0.0355	0.512	0.045	0.842	1.03	0.00050	0.41	314	249	0.023	0.240	0.0003	0.407	0.430	0.455	-0.051
491	0.214	0.100	17.5	0.0355	0.512	0.045	0.843	1.03	0.00200	1.65	382	317	0.023	0.260	0.0003	0.587	0.606	0.525	-0.122
492	0.214	0.100	17.6	0.0355	0.512	0.045	0.843	2.02	0.00025	0.10	785	654	0.043	0.300	0.0085	0.323	0.482	0.573	0.233
493	0.214	0.100	17.5	0.0355	0.512	0.045	0.843	2.02	0.00050	0.20	932	801	0.043	0.310	0.0224	0.524	0.527	0.525	0.355
494	0.308	0.100	20.2	0.0355	0.512	0.045	0.844	1.03	0.00050	0.41	108	67	0.007	0.055	0.0003	0.380	0.402	0.593	0.031
495	0.308	0.100	17.9	0.0355	0.512	0.045	0.843	1.03	0.00200	1.64	206	165	0.015	0.150	0.0003	0.435	0.448	0.451	-0.077
496	0.308	0.100	20.1	0.0355	0.512	0.045	0.844	2.04	0.00050	0.21	167	95	0.007	0.175	0.0083	0.259	0.282	0.537	-0.174
497	0.308	0.100	20.1	0.0355	0.512	0.045	0.844	2.05	0.00200	0.85	196	125	0.010	0.180	0.0025	0.336	0.347	0.526	-0.129
498	0.308	0.100	20.1	0.0355	0.512	0.045	0.844	3.10	0.00050	0.14	196	84	0.007	0.250	0.0224	0.222	0.242	0.316	-0.245
499	0.308	0.100	20.2	0.0355	0.512	0.045	0.844	3.10	0.00100	0.21	206	94	0.007	0.255	0.0231	0.271	0.286	0.333	-0.173
500	0.308	0.100	20.4	0.0355	0.511	0.046	0.845	3.10	0.00200	0.55	226	114	0.003	0.250	0.0228	0.289	0.300	0.363	-0.232
501	0.308	0.100	20.4	0.0355	0.511	0.046	0.845	3.10	0.00400	1.09	245	133	0.002	0.260	0.0352	0.384	0.325	0.387	-0.029
502	0.416	0.100	17.2	0.0355	0.512	0.045	0.842	1.03	0.00100	0.81	78	55	0.005	0.045	0.0003	0.371	0.403	0.555	0.134
503	0.416	0.100	17.2	0.0355	0.512	0.045	0.842	1.03	0.00100	0.81	78	55	0.005	0.045	0.0003	0.371	0.408	0.555	0.134
504	0.416	0.100	17.3	0.0355	0.512	0.045	0.845	2.03	0.00050	0.21	88	51	0.005	0.075	0.0077	0.255	0.284	0.285	-0.006
505	0.416	0.100	17.3	0.0355	0.512	0.045	0.842	2.03	0.00200	0.55	108	71	0.007	0.100	0.0073	0.240	0.247	0.333	-0.337
506	0.416	0.100	17.1	0.0355	0.512	0.045	0.842	3.07	0.00050	0.14	108	53	0.005	0.150	0.0125	0.218	0.237	0.265	

Tab. 10.8. Wyniki badań hydrodynamiki pótek sitowych suchych.

NR	t_a	t_e	d_p	t_0/d_0	w_0	w_{00}	ρ_0	μ_0	R_{000}	App	ξ	ξ_{000}	δ_{000}
		m	m		m/s	m/s	kg/m ³	Ns/m ²		N/m ²			
1	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	0.73	5.59	1.175	0.0000177	2227	58.8	3.202	2.861	0.113
2	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	0.94	7.20	1.182	0.0000177	2878	88.5	2.886	2.622	0.135
3	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	1.15	8.79	1.187	0.0000177	3555	28.1	2.134	2.265	0.050
4	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	1.36	10.37	1.193	0.0000177	4193	117.7	1.834	2.052	0.123
5	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	1.56	11.95	1.197	0.0000177	4848	147.1	1.721	1.713	0.112
6	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	1.79	13.71	1.201	0.0000177	5507	186.3	1.551	1.782	0.072
7	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	2.01	15.42	1.205	0.0000177	6286	225.6	1.375	1.611	0.064
8	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	2.18	16.65	1.207	0.0000177	6799	264.8	1.582	1.617	0.038
9	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	2.36	18.06	1.211	0.0000177	7394	313.8	1.582	1.544	0.028
10	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	2.53	19.35	1.216	0.0000178	7947	362.8	1.525	1.482	0.065
11	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	2.69	20.58	1.217	0.0000178	8450	372.3	1.523	1.443	0.057
12	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	2.88	22.03	1.222	0.0000178	9082	441.3	1.488	1.371	0.065
13	0.1310	0.0150	0.0050	2.50	3.08	23.58	1.228	0.0000178	9757	502.2	1.424	1.361	0.102
14	0.1500	0.0188	0.0080	2.54	0.60	4.01	1.163	0.0000178	2096	29.4	3.148	1.215	0.121
15	0.1500	0.0188	0.0080	2.54	1.08	7.22	1.165	0.0000178	3782	58.8	1.232	2.383	0.227
16	0.1500	0.0188	0.0080	2.54	1.63	10.92	1.171	0.0000178	5757	117.7	1.534	1.224	0.163
17	0.1500	0.0188	0.0080	2.54	2.14	14.33	1.177	0.0000178	7521	186.3	1.542	1.274	0.200
18	0.1500	0.0188	0.0080	2.54	2.70	18.03	1.183	0.0000178	9597	284.4	1.439	1.285	0.105
19	0.1500	0.0188	0.0080	2.54	3.22	21.49	1.188	0.0000178	11489	402.1	1.452	1.336	0.120
20	0.1500	0.0188	0.0080	2.54	3.74	24.96	1.194	0.0000178	13403	512.8	1.327	1.254	0.102
21	0.1500	0.0188	0.0080	2.54	4.24	28.32	1.202	0.0000178	15301	686.5	1.424	1.123	0.125
22	0.1500	0.0188	0.0080	2.54	4.44	29.65	1.208	0.0000178	16102	764.2	1.443	1.143	0.207
23	0.2140	0.0100	0.0050	2.00	0.60	2.80	1.165	0.0000178	920	14.7	3.211	3.525	0.123
24	0.2140	0.0100	0.0050	2.00	1.08	5.04	1.170	0.0000178	1661	29.4	1.777	2.664	0.267
25	0.2140	0.0100	0.0050	2.00	1.63	7.64	1.175	0.0000177	2529	68.6	2.003	2.132	0.275
26	0.2140	0.0100	0.0050	2.00	2.15	10.04	1.178	0.0000177	3331	88.3	1.484	1.822	0.258
27	0.2140	0.0100	0.0050	2.00	2.70	12.65	1.181	0.0000178	4207	137.3	1.454	1.653	0.164
28	0.2140	0.0100	0.0050	2.00	3.18	14.87	1.212	0.0000178	5062	176.5	1.317	1.514	0.162
29	0.2140	0.0100	0.0050	2.00	3.23	15.10	1.184	0.0000178	5035	186.3	1.333	1.518	0.100
30	0.2140	0.0100	0.0050	2.00	3.45	16.14	1.218	0.0000178	5521	205.2	1.227	1.442	0.117
31	0.2140	0.0100	0.0050	2.00	3.76	17.57	1.184	0.0000178	5870	245.2	1.337	1.494	0.050
32	0.2140	0.0100	0.0050	2.00	4.27	19.98	1.192	0.0000178	6629	313.8	1.312	1.313	0.204
33	0.2140	0.0100	0.0050	2.00	4.52	21.12	1.195	0.0000178	7103	353.0	1.323	1.275	0.057
34	0.2710	0.0150	0.0070	1.67	0.52	1.78	1.173	0.0000177	1058	9.8	3.224	4.015	0.262
35	0.2710	0.0150	0.0070	1.67	1.04	3.56	1.171	0.0000178	2111	24.5	3.312	2.822	0.146
36	0.2710	0.0150	0.0070	1.67	1.52	5.23	1.171	0.0000178	3103	29.4	1.835	2.324	0.267
37	0.2710	0.0150	0.0070	1.67	2.05	7.02	1.172	0.0000178	4171	44.1	1.525	2.002	0.313
38	0.2710	0.0150	0.0070	1.67	2.56	8.79	1.175	0.0000178	5234	73.5	1.518	1.784	0.103
39	0.2710	0.0150	0.0070	1.67	3.08	10.57	1.185	0.0000178	6353	97.2	1.407	1.617	0.150
40	0.2710	0.0150	0.0070	1.67	3.60	12.36	1.185	0.0000178	7416	122.6	1.354	1.425	0.104
41	0.2710	0.0150	0.0070	1.67	4.11	14.11	1.194	0.0000178	8535	152.0	1.278	1.322	0.090
42	0.2710	0.0150	0.0070	1.67	4.48	15.39	1.197	0.0000178	9332	171.6	1.210	1.331	0.100
43	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	0.60	1.94	1.174	0.0000177	771	9.8	4.438	3.412	0.230
44	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	0.67	2.17	1.172	0.0000177	860	9.8	3.551	3.234	0.082
45	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	0.94	3.06	1.175	0.0000177	1218	14.7	2.564	2.710	0.017
46	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	1.07	3.49	1.178	0.0000177	1393	12.6	2.733	2.583	0.023
47	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	1.15	3.74	1.181	0.0000177	1496	12.6	2.562	2.462	0.031
48	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	1.45	4.72	1.187	0.0000177	1827	34.3	2.523	2.165	0.165
49	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	1.63	5.29	1.184	0.0000177	2122	34.3	2.075	2.045	0.114
50	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	1.68	5.44	1.191	0.0000177	2194	32.2	2.224	2.011	0.025
51	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	1.91	6.22	1.195	0.0000177	2519	42.0	2.112	1.875	0.113
52	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	2.14	6.94	1.182	0.0000177	2800	49.0	1.713	1.777	0.354
53	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	2.15	6.97	1.192	0.0000177	2831	58.8	2.012	1.762	0.124
54	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	2.36	7.65	1.202	0.0000177	3111	68.6	1.252	1.685	0.155
55	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	2.56	8.32	1.205	0.0000178	3322	83.4	1.225	1.512	0.122
56	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	2.69	8.75	1.192	0.0000177	3537	78.5	1.723	1.528	0.103
57	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	2.76	8.95	1.205	0.0000178	3645	88.3	1.824	1.555	0.342
58	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	2.93	9.53	1.207	0.0000178	3887	97.2	1.527	1.505	0.114
59	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	3.15	10.24	1.213	0.0000178	4189	28.1	1.531	1.462	0.063
60	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	3.22	10.46	1.194	0.0000177	4232	28.1	1.533	1.431	0.061
61	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	3.26	10.58	1.215	0.0000178	4331	107.2	1.582	1.474	0.102
62	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	3.75	12.17	1.195	0.0000177	4734	157.3	1.550	1.333	0.143
63	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	4.26	13.85	1.200	0.0000177	5629	186.2	1.442	1.262	0.152
64	0.3080	0.0100	0.0050	1.67	4.62	15.24	1.204	0.0000177	6213	205.9	1.471	1.185	0.125
65	0.4160	0.0125	0.0070	1.39	0.60	1.44	1.174	0.0000177	858	4.2	3.044	2.831	0.302
66	0.4160	0.0125	0.0070	1.39	1.07	2.58	1.183	0.0000177	1553	2.8	2.420	2.073	0.165
67	0.4160	0.0125	0.0070	1.39	1.62	3.91	1.190	0.0000177	2369	14.7	1.523	1.673	0.033
68	0.4160	0.0125	0.0070	1.39	2.13	5.13	1.194	0.0000176	3124	12.6	1.244	1.454	0.155
69	0.4160	0.0125	0.0070	1.39	2.69	6.47	1.195	0.0000176	3947	29.4	1.175	1.221	0.022
70	0.4160	0.0125	0.0070	1.39	3.21	7.73	1.198	0.0000177	4725	32.2	1.024	1.172	0.022
71	0.4160	0.0125	0.0070	1.39	3.74	9.01	1.203	0.0000177	5507	42.0	1.007	1.071	0.083
72	0.4160	0.0125	0.0070	1.39	4.26	10.26	1.202	0.0000177	6279	88.6	1.085	1.020	0.060
73	0.4160	0.0125	0.0070	1.39	4.80	11.55	1.205	0.0000177	7087	88.3	1.077	0.950	0.125
74	0.4190	0.0100	0.0070	1.43	1.07	2.56	1.192	0.0000177	1124	4.2	1.255	1.853	0.484
75	0.4190	0.0100	0.0070	1.43	1.62	3.88	1.182	0.0000177	1820	2.8	1.025	1.425	0.362
76	0.4190	0.0100	0.0070	1.43	2.13	5.08	1.198	0.0000177	2404	14.7	0.251	1.222	0.365
77	0.4190	0.0100	0.0070	1.43	2.68	6.39	1.207	0.0000177	3044	12.6	0.725	1.132	0.448
78	0.4190	0.0100	0.0070	1.43	3.19	7.61	1.217	0.0000178	3651	34.3	0.773	1.051	0.080
79	0.4190	0.0100	0.0070	1.43	3.53	7.94	1.220	0.0000178	3817	32.2	1.012	1.022	0.002
80	0.5470	0.0100	0.0080	1.25	2.13	3.89	1.203	0.0000177	2106	4.2	0.541	0.624	0.169
81	0.5470	0.0100	0.0080	1.25	2.67	4.88	1.214	0.0000177	2675	2.8	0.572	0.555	0.181
82	0.5470	0.0100	0.0080	1.25	3.18	5.80	1.225	0.0000177	3218	2.8	0.474	0.505	0.068
83	0.5470	0.0100	0.0080	1.25	3.53	6.09	1.235	0.0000177	3601	14.7	0.542	0.472	0.253

Odbiorcy Komunikatów

- | | |
|--------------------------|----------|
| 1. Promotor | - 1 egz. |
| 2. Recenzenci | - 2 egz. |
| 3. Biblioteka Główna PWr | - 1 egz. |
| 4. Biblioteka I-13 | - 1 egz. |
| 5. Autor | - 1 egz. |

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	* N *	N.N.S.R.T.T.A.N.090208050906								
	Rozpocz. pr.	Zakończ. pr.	Czubl. pr.		Instytut		Nr tematu.			
	1073	0378			1.13					
Nr zlecenia.		Nr archiwalny								
		1.13 / K-316 / 78 *								
Symbol UKD.		Wymywanie. Skrubery. Płuczki.							78: Inst. Inż. Chem. PWR MNSzWT	
66.074.5									pol.	

Opis bibliograficzny.

Kulik Bogusław

Hydrodynamika i wymiana masy w układzie gaz-ciecz na bezprzelewowych półkach sitowych w obecności środków powierzchniowo-czynnych.

Komunikaty Inst. Inż. Chem. PWR 1978 nr 316

220 s. 61 rys. 10 tabl. bibliogr. 310 poz.
/ maszyn. powiel./

Rozprawa Doktorska

Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych
Wrocław

Promotor: prof. dr hab. inż. Roman Koch

Charakter pracy:

stosowana

Materiały odpłatne:

A

Rozpowszechnianie:

na praw.

rek.



Analiza dokumentacyjna

<D

W pierwszej części pracy przedstawiony jest przegląd literatury na temat wpływu środków powierzchniowo-czynnych na proces odpylania gazów i metali mokrymi oraz hydrodynamikę i wymianę masy w układzie gaz-ciecz. W części drugiej przedstawiono wyniki badań wpływu niejonowych rozpuszczalnych środków powierzchniowo-czynnych na hydrodynamikę i wymianę masy w kolumnie z bezprzelewowymi półkami sitowymi. Stwierdzono istnienie trzech zakresów pracy półki, związanych z własnościami pianotwórczymi cieczy. Wpływ środków powierzchniowo-czynnych opisano za pomocą trzech parametrów: względnego obniżenia napięcia powierzchniowego, zdolności ^{pianienia} cieczy i trwałości piany. W oparciu o dane literaturowe i opracowane korelacje własne zaproponowany został sposób obliczania odpylająco-adsorpcyjnej kolumny półkowej.

Poguchaw Kulik

Słowa kluczowe

<S

kolumna półkowa, środki powierzchniowo-czynne, hydrodynamika, wymiana masy.

**0480*00* 019279

*A. *B. *C. *D.

*E. *F. *G. *H.

Tylko PRL	CINTE	APW	Podpis red.	Podpis asyst. d/s badań	Potwierdzenie przyjęcia poprawki	Potwierdzenie przyjęcia karty w Oddziale Dokumentacji
nle	tak	tak				
Wpisać TAK lub NIE						