POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Sanitarnej i Wodnej

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Wiesława Szadkowskiego

pt. „Odmulacze hydrocyklonowe w systemach ciepłowniczych"

WARSZAWA

1987

[628.28 : 621.928.3]:043

Wiesław Szadkowski

Odmulacze hydrocyklonowe w systemach ciepłowniczych

Praca doktorska,
wykonana w Instytucie
Ogrzewnictwa i Wentylacji Wydziału
Inżynierii Sanitarnej i Wodnej
pod kierunkiem
Doc.dr hab.inż.Stanisława Mańkowskiego

Warszawa, 1987

Pragnę podziękować doc.dr hab.inż. Stanisławowi Maćkowskiemu za inicjatywę podjęcia tematu oraz za wszechstronną pomoc przy wykonywaniu niniejszej pracy.

Dziękuję również Kolegom i Współpracownikom z Instytutu i z Zakładu za ułatwienia z jakich korzystałem podczas wykonywania obliczeń, a szczególnie dr inż. Ryszardowi Zwierzchowskiemu za pomoc przy obliczeniach numerycznych.

Chciałbym również podziękować dr F.Boysan'owi z Sheffield /Anglia / za dostarczenie mi trudno dostępnych w Kraju publikacji i opracowań.

Spis treści

Ważniejsze nazwy i oznaczenia. 5

1. Wprowadzenie 9

2. Cel i zakres pracy 12

3. Stan badań zanieczyszczeń mechanicznych wody sieciowej i urządzeń służących do ich usuwania w systemach ciepłowniczych 14

4. Badania właściwości fizycznych zanieczyszczeń mechanicznych sieci cieplnych 20

5. Badania odmulaczy sieci cieplnych 23

6. Podsumowanie 34

7. Stan wiedzy o hydrocyklonach 36

7.1. Przebieg zjawisk fizycznych w hydrocyklonie 37

7.2. Przegląd literatury 41

7.3. Parametry hydrocyklonów 48

7.4. Metody projektowania hydrocyklonów 55

8. Model matematyczny przepływu cieczy i cząstek zanieczyszczeń przez hydrocyklon 58

8.1. Równania podstawowe 59

8.2. Opis turbulencji 61

8.3. Opis ruchu cząstek fazy stałej 66

8.4. Warunki brzegowe 68

9. Program numeryczny "HCYKLON" 70

9.1. Technika rozwiązywania równań 70

9.2. Opis programu 72

10. Wyniki obliczeń numerycznych 80

11. Badania eksperymentalne modelu hydrocyklonu. 83

11.1. Opis modelu hydrocyklonu 83

11.2. Opis stanowiska badawczego 84

11.3. Metoda pomiarów 86

11.4. Wyniki badań i analiza dokładności pomiarów 87

12. Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych 92

13. Podsumowanie i wnioski 95

Spis literatury. 97

Ważniejsze nazwy i oznaczenia.

Nazwy / zgodne z BN-76/2270-02/:

Nadawa - zawiesina dwu lub wielofazowa w ośrodku ciekłym, doprowadzana pod ciśnieniem do dyszy lub króćca wlotowego hydrocyklonu

Frakcja przelewowa - część nadawy wypływająca z hydrocyklonu przy przepływie wstępującym.

Frakcja wylewowa - część nadawy wypływająca z hydrocyklonu przy przepływie zstępującym.

Dysza lub króciec wlotowy - element doprowadzający nadawę do hydrocyklonu.

Dysza lub króciec przelewowy - element odprowadzający frakcję przelewową z hydrocyklonu.

Dysza lub króciec wylewowy - element odprowadzający frakcję wylewową z hydrocyklonu.

Oznaczenia:

a - wysokość dyszy wlotowej hydrocyklonu,

a_1, a_2, a_3 - współczynniki / zal.8.17,8.18, 8.19/

a'_1, a'_2, a'_3 - współczynniki / zal.8.30, tab.8.1/

b - szerokość dyszy wlotowej hydrocyklonu.

C - ogólnie stała /zal. 7.23/, C, C_1 /zal.7.8/, C_1, C_2 /zal.7.18/ /zal.7.20 $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ /zal.8.10/, C'_1, C'_2/zal.8.12, 8.13_/. C_μ /zal. 8.7/ C'_3 /zal.8.21/.

C_D - współczynniki oporu / zal.8.30/

c - szerokość oczka sita

D - średnica części cylindrycznej hydrocyklonu

Dp,i - średnica ziarna klasy "i"

d - ogólnie średnica, d_n - nominalna, d_o-dyszy wlotowej, d_p-dyszy przelewowej, d_w-dyszy wylewowej, d_{50}-ziarna podziałowego,

E-stała /zal.7.10/

E - stała zależna od chropowatości ścian /zal.8.33/

H_o,H_p - statyczne wysokości ciśnienia dla średnic: D, dp

H_w - dynamiczna wysokość ciśnienia dla prędkości w_c /zal.7.26/

k - ogólnie stała, k_1,k_2 - /zal.7.6/

k - energia kinetyczna turbulencji, k_w-w pobliżu ściany

L - długość części cylindrycznej hydrocyklonu, L_c-całkowita, L_p-przelewu, L_s-części stożkowej

m - ogólnie masa, m_1-zanieczyszczeń zatrzymanych w odmulaczu, m_2-zanieczyszczeń zatrzymanych w kolumnie sitowo-filtracyjnej, m_p-całkowita przed odmulaczem.

n - wykładnik potęgi

n - liczba ziarn

P - produkcja energii turbulencji

p - ogólnie ciśnienie, p_o-statyczne na średnicy części walcowej, p_p-statyczne na średnicy przelewu.

Δp - różnica ciśnień statycznych

R_f - iloraz wylewu i nadawy /zal.7.28/

r - ogólnie promień, r_o-rdzenia powietrznego

r - współrzędna, r_i-ziarna klasy "i"

S - wskaźnik rozdziału /zal.7.30/

S_ϕ - człon źródłowy / zal.9.1/

T - temperatura

t - czas

U - prędkość w odległości y_w od ściany

u - średnia prędkość osiowa, u' - pulsacyjna, $\bar{u}'$ - wartość średnia, u_{pi}- ziarna klasy "i"

V - objętość

$\dot{V}$ - objętość strumienia masy, $\dot{V}_n$-nadawy, $\dot{V}_p$-przelewu, $\dot{V}_w$-wylewu, $\dot{V}_{vn}$-fazy ciekłej w nadawie, $\dot{V}_{vp}$-fazy ciekłej w przelewie, $\dot{V}_{vw}$-fazy ciekłej w wylewie, $\dot{V}_{mn}$-fazy stałej w nadawie, $\dot{V}_{mp}$-fazy stałej w przelewie, $\dot{V}_{mw}$-fazy stałej w wylewie.

v - średnia prędkość promieniowa, v'-pulsacyjna, $\bar{v}'$- wartość średnia, $v_{p,i}$-ziarna klasy "i", v_c-na średnicy D

w - średnia prędkość styczna, w -pulsacyjna, $\bar{w}'$-wartość średnia $w_{p,i}$-ziarna klasy "i", w_c-na średnicy D, w_i - prędkość wlotowa,

x,y,z - wykładnik potęgi

y_w- odległość od ściany hydrocyklonu

z - współrzędna w kierunku osiowym

α - współczynnik /zal.7.3/, /zal.8.20/

Γ_ϕ - uogólniona funkcja /zal.9.1/

γ - współczynnik oporu ruchu cząstek w cieczy

Δ - różnica,przyrost

δ_{ij}- delta Kroneckera

ε - współczynnik lepkości wirowej Rietemy /zal.7.12/

ε - dysypacja energii turbulencji, ε_w-w pobliżu ściany

θ - współrzędna w układzie walcowym

ξ - współczynnik oporu miejscowego

η - sprawność, η'-całkowita /zal.7.22/

λ - parametr Rietemy /zal.7.14/

λ - współczynnik / zal.8.21/

$\varkappa$ - stała /zal.8.33/

ν - współczynnik lepkości kinematycznej, ν'- turbulentnej Driessena, ν_t-turbulentnej /zal.8.6/

μ - współczynnik lepkości dynamicznej, μ_z - zawiesiny, μ_w-wody

ϱ - gęstość, ϱ_1-fazy stałej, ϱ_2-cieczy

$\Delta\varrho$ - różnica gęstości

σ - parametr Rietemy /zal.7.16/, σ_o - dla r_o

σ_ε - stała / zal.8.10/

τ - naprężenie styczne, τ_w- w pobliżu ściany

τ - czas życia wiru / zal.8.32/

ϕ - liczba losowa / zal.8.31/

ϕ - funkcja uogólniona /zal.9.1/

φ - kąt rozwarcia części stożkowej hydrocyklonu

φ - parametr Rietemy / zal.7.15/

1. Wprowadzenie

Sprawa właściwego zaopatrzenia w energię cieplną miast i osiedli ma ogromne znaczenie dla gospodarki narodowej z uwagi na znaczny udział w ogólnym bilansie paliwowym kraju zużycia paliw dla potrzeb komunalnych i przemysłowych. Dzięki wzrostowi mocy źródeł energii cieplnej oraz wprowadzeniu na szeroką skalę skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i cieplnej podniesiono komfort cieplny ogrzewanych mieszkań oraz zdecydowanie ograniczono zanieczyszczenie środowiska naturalnego w rejonach miejskich. Stale rozbudowywane i unowocześniane systemy ciepłownicze ogrzewały w 1986 roku około 4.644 tys. mieszkań co stanowiło 68% ogólnej ilości mieszkań w miastach [44]. Przewiduje się, że wszystkie nowowybudowane w latach 1987-90 mieszkania w budownictwie wielorodzinnym ogrzewane będą z centralnych źródeł energii cieplnej, co wymagać będzie zwiększenia mocy źródeł energii cieplnej oraz budowy około 1800 km nowych sieci cieplnych. Jednocześnie obserwuje się wzrost zawodności systemów charakteryzujący się zwiększaniem się liczby awarii, niedogrzewaniem pomieszczeń, przerwami w dostarczaniu energii cieplnej oraz nieprawidłowym działaniem urządzeń regulacyjnych.

Jedną z głównych przyczyn tego stanu rzeczy jest występowanie w wodzie obiegowej /będącej w systemach ciepłowniczych czynnikiem roboczym i nazywanej w niniejszej pracy - wodą sieciową / znacznych ilości zanieczyszczeń mechanicznych.

Główne źródła zanieczyszczeń mechanicznych sieci cieplnych to: niedokładne oczyszczanie oddawanych do eksploatacji nowowybudowanych odcinków instalacji, wytrącanie się osadów stałych z niewłaściwie uzdatnionej wody oraz oddzielanie się produktów korozji od stalowych ścianek przewodów. Szkodliwy wpływ zanieczyszczeń

mechanicznych na pracę instalacji ciepłowniczych ma różnoraki charakter. Zanieczyszczenia w postaci osadów powodują zarastanie wewnętrznych powierzchni rur a więc wzrost oporów hydraulicznych i co za tym idzie rozregulowanie hydrauliczne sieci, zwiększenie kosztów pompowania oraz często konieczność całkowitej wymiany instalacji po kilku latach eksploatacji. Osady powodują wzrost oporów cieplnych wymienników co powoduje w efekcie zmniejszenie ich mocy cieplnych i obniżenie temperatur obiegu wtórnego. Zanieczyszczenia wody stanowią przeszkodę w wyposażaniu węzłów cieplnych w wysokosprawne wymienniki nowej generacji, które po kilku latach eksploatacji, a w niektórych przypadkach po roku pracy ulegają całkowitemu zamuleniu, a proces oczyszczenia metodami chemicznymi znacznie skraca ich żywotność. Zanieczyszczenia mechaniczne wody powodują również blokadę elementów wykonawczych regulatorów temperatury uniemożliwiając ich prawidłową pracę. Zanieczyszczenie osadami grzybków i gniazd zaworów odcinających jest przyczyną ich nieszczelności co zmusza obsługę do spuszczania wody z całych instalacji nawet przy usuwaniu awarii o niewielkim zasięgu. Stwierdzono również że zanieczyszczenia mechaniczne wody sieciowej intensyfikują procesy korozyjne przewodów, armatury i wymienników znacznie skracając ich żywotność. Można więc stwierdzić, że większość bolączek z którymi borykają się służby eksploatacyjne spowodowane jest pośrednio szkodliwym wpływem zanieczyszczeń mechanicznych wody sieciowej. Usunięcie zanieczyszczeń z wody sieciowej i niedopuszczanie do ich powstawania jest warunkiem prawidłowego działania systemów ciepłowniczych. Aby to osiągnąć konieczna jest rozbudowa i modernizacja urządzeń do uzdatniania wody, zwiększenie wymagań odnośnie jakości wody sieciowej /pozytywnym

krokiem w tym zakresie jest opracowanie Polskiej Normy PN-85/C-04601 obowiązującej od 1-go lipca 1986 r./, dokładne czyszczenie wewnętrznych powierzchni rur przed uruchomieniem instalacji, ograniczenie ubytków wody sieciowej i niedopuszczanie do jej napowietrzania oraz opracowanie urządzeń i technologii pozwalających na skuteczne usuwanie zanieczyszczeń mechanicznych z systemów ciepłowniczych. Ostatnie z wymienionych powyżej zagadnień jest tematem niniejszej pracy.

Doświadczenia innych krajów /Czechosłowacja, RFN, Szwajcaria / wykazały, że przy należytej dbałości o jakość wody sieciowej wraz ze stosowaniem inhibitorów korozji można praktycznie zlikwidować przebieg procesów korozyjnych w systemach ciepłowniczych. Celem krajowych przedsiębiorstw ciepłowniczych powinno być doprowadzenie do takich "idealnych" warunków pracy systemów w przyszłości, natomiast w chwili obecnej występuje konieczność wprowadzenia do eksploatacji wysokosprawnych technologii usuwania zanieczyszczeń mechanicznych wody sieciowej. Życzeniem autora byłoby, żeby w przyszłości doprowadzono sieci cieplne do takich warunków pracy, przy których stosowanie urządzeń do ich oczyszczania nie było konieczne.

Problem nowych technologii oczyszczania wody staje się również problemem pierwszoplanowym wobec zamiarów wprowadzenia w Kraju elektrociepłowni i ciepłowni jądrowych w których w celu zapewnienia wysokiego stopnia niezawodności pracy systemów muszą obowiązywać również wysokie wymagania odnośnie jakości wody sieciowej.

2. Cel i zakres pracy

Zasadniczym celem niniejszej dysertacji jest opracowanie obliczeniowych metod projektowania odmulaczy hydrocyklonowych przeznaczonych do oczyszczania wody sieciowej z zanieczyszczeń mechanicznych w systemach ciepłowniczych. Hydrocyklony stosowane są do separacji fazy stałej od ciekłej od szeregu lat. Krajowe przedsiębiorstwa ciepłownicze zainteresowały się odmulaczami hydrocyklonowymi pod koniec lat sześćdziesiątych, ale barierą która stanęła na przeszkodzie w ich stosowaniu okazał się brak właściwych metod projektowania hydrocyklonów. Tak więc główną tezą pracy jest opracowanie metody pozwalającej na projektowanie odmulaczy hydrocyklonowych przeznaczonych dla systemów ciepłowniczych.

Przed przystąpieniem do rozwiązywania problemu oczyszczania wody sieciowej należało najpierw określić jaki jest rzeczywisty skład, rodzaj i charakter zanieczyszczeń, ponieważ znajomość właściwości fizycznych fazy stałej podlegającej separacji jest niezbędna przy obliczeniach hydrocyklonów. Należało również opracować metody badań oraz przeprowadzić badania skuteczności działania różnych istniejących urządzeń służących do oczyszczania wody sieciowej w celu przeprowadzenia analizy porównawczej ich cech użytkowych umożliwiającej ocenę proponowanych w pracy rozwiązań odmulaczy hydrocyklonowych.

W wyniku tego niniejsza praca składa się z dwóch części. Pierwsza część dotyczy zanieczyszczeń mechanicznych wody sieciowej oraz klasycznych urządzeń służących do ich usuwania, natomiast druga poświęcona jest odmulaczom hydrocyklonowym.

W części pierwszej pracy przedstawiono wyniki badań właściwości fizycznych zanieczyszczeń wody sieciowej oraz wyniki badań sprawności i charakterystyk hydraulicznych wybranych typów odmulaczy.

W drugiej części pracy przedstawiono model matematyczny przepływu zawiesiny przez hydrocyklon, schemat funkcyjny oraz sposób rozwiązania programu numerycznego służącego do projektowania odmulaczy hydrocyklonowych, wyniki obliczeń numerycznych oraz wyniki badań eksperymentalnych i eksploatacyjnych odmulaczy hydrocyklonowych. W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań oraz obliczeń sformułowano wnioski ogólne przedstawione w końcowej części pracy.

3. Stan badań zanieczyszczeń mechanicznych wody sieciowej i urządzeń służących do ich usuwania w systemach ciepłowniczych.

Kłopoty eksploatacyjne spowodowane zanieczyszczeniem wody sieciowej wpłynęły na podjęcie badań zmierzających do poznania przyczyn oraz mechanizmów powstawania i odkładania się osadów jak również metod i sposobów usuwania ich z instalacji [1], [8], [15], [16], [18], [21], [23], [24], [25], [26], [27], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [50], [52].

Według Spillnera [52] w rurach przygotowanych do montażu pod działaniem tlenu zawartego w wodzie powstaje rdza według równania:

$$2Fe + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow 2FeO \cdot OH \qquad /3.1/$$

Gdy przewody sieci cieplnych zostają wypełnione gorącą wodą w obiegu zamkniętym bez dostępu tlenu następuje przemiana rdzy znajdującej się już w przewodach w drobno-krystaliczny pył magnetytowy według reakcji:

$$2FeO.OH + Fe \longrightarrow 3FeO.Fe_2O_3 + 4H_2O \qquad /3.2/$$

Płatki rdzy przekształcające się w drobnoziarnisty magnetyt odpadają od ścianek rur. Wysoka temperatura wody oraz pulsacje ciśnień w instalacji przyśpieszają te procesy. Odpadające płatki magnetytu mają cząstki o wielkościach 1-20 μm i charakteryzują się barwą czerni. Krążąca woda unosi cząstki magnetytu tworząc zawiesinę tak zwanego "szlamu magnetytowego" w wodzie, który przemieszcza się bez przeszkód w instalacji, przepływając przez oczka siatek odmulaczy i filtrów i osadza się w miejscach gdzie spada prędkość wody, lub występują zakłócenia przepływu; na przykład na powierzchniach urządzeń regulacji automatycznej i armatury.

W przypadku przedostania się powietrza do obiegu wodnego systemu ciepłowniczego, magnetyt łączy tlen według reakcji:

$$2FeO.Fe_2O_3 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow 3Fe_2O_3 \qquad /3.3/$$

Powstały tlenek żelaza charakteryzuje się barwą ciemnobrązową i może ponownie przechodzić w magnetyt.

Ponieważ szlam magnetytowy charakteryzuje się bardzo dużą aktywną chemicznie powierzchnią / 1 dm^3 szlamu posiada powierzchnię około 50 000 m^3/ należy go traktować jako nośnik tlenu o działaniu katalitycznym intensyfikującym procesy korozyjne.

W systemach ciepłowniczych występują zjawiska przedostawania się tlenu do obiegu wodnego powodujące zachodzenie reakcji chemicznych wywołanych obecnością magnetytu spełniającego rolę katalizatora korozji. Procesy te są jedną z przyczyn występowania przyśpieszonych destrukcyjnych procesów korozyjnych w sieciach ciepłowniczych. Z drugiej strony osady zalegające instalacje przyczyniają się do powstawania tak zwanej korozji podosadowej o charakterze elektrochemicznym, polegającej na przechodzeniu cząstek żelaza do roztworu, gdzie po utlenieniu tworzą $Fe(OH)_3$. Korozja podosadowa, jak wykazały liczne doświadczenia eksploatacyjne jest obecnie bezpośrednią przyczyną wysokiej awaryjności krajowych systemów ciepłowniczych.

Analizy chemiczne odmulin [1], [25], [26] wykazały, że składają się one z: tlenków żelaza, krzemionki SiO_2, nierozpuszczalnych związków wapnia i magnezu, zanieczyszczeń nieorganicznych /żużle i sople pospawalnicze/ oraz zanieczyszczeń organicznych. W większości analiz udział tlenków żelaza był bardzo wysoki i wahał się od 61,8% do 93,5% ogólnej masy odmulin [1].

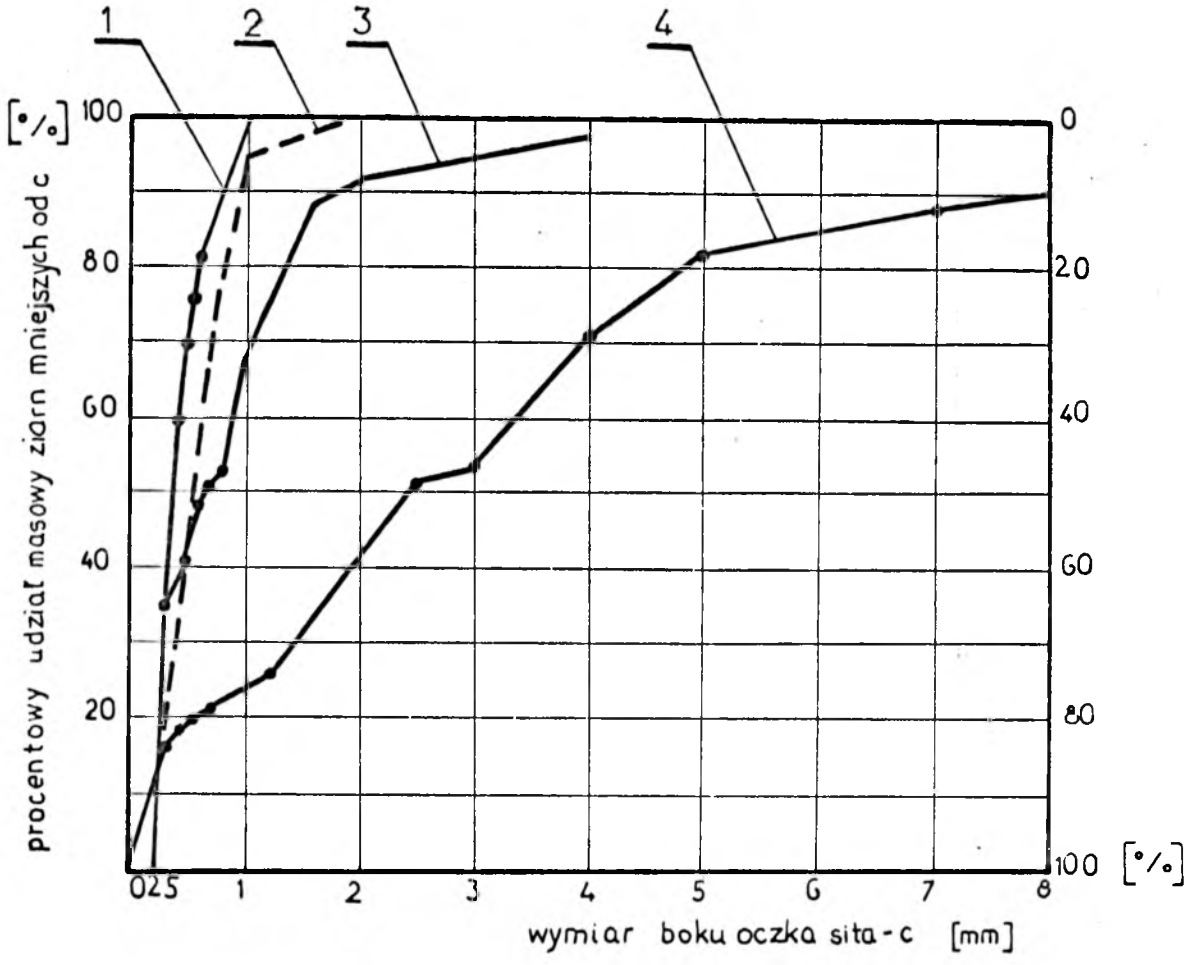
W opracowaniu [8] stwierdzono, że osady zalegające przewody instalacji zawierają powyżej 68,5% czystego żelaza i że charakteryzują się właściwościami ferromagnetycznymi. Ponadto zauważono że około 20% produktów korozji osadza się na powierzchniach z których one pochodzą, zaś pozostała ilość przechodzi do wody krążącej w instalacji.

Z analizy frakcyjnej odmulin [25], której wyniki przedstawiono na rys.3.1. wynikało, że około 50% zanieczyszczeń ma ziarna o wielkościach od 0,25 mm do 2,3 mm w zależności od miejsca pobrania próbek, natomiast autorzy opracowania [8] uważają, że cząstki tlenków żelaza znajdujące się w wodzie mają kształt blaszek, których średni rozmiar po maksymalnej osi wynosi 0,65-1,3 μm.

Rozbieżności różnych autorów [52],[8],[25], co do rzeczywistych wymiarów zanieczyszczeń wody sieciowej skłoniły autora niniejszej pracy do przeprowadzenia własnych badań dotyczących tego zagadnienia. Wyniki tych badań oraz ich omówienie przedstawiono w punktach 4 i 6.

Do oddzielania zanieczyszczeń z wody używa się odmulaczy, osadników lub filtrów w których osady zatrzymywane są najczęściej na siatkowych powierzchniach filtracyjnych [26],[27],[57]. Gromadzące się na siatkach odmulaczy zanieczyszczenia powodują wzrost oporów hydraulicznych, który doprowadza bądź do mechanicznego uszkodzenia sit, bądź do znacznego lub całkowitego zdławienia przepływu. Aby tego uniknąć odmulacze wyposaża się w siatki o dużych oczkach, ale wtedy ich sprawności oczyszczania są niewielkie.

Niską skuteczność oczyszczania stosowanych odmulaczy potwierdzają badania OMSC-SPEC [1], które wykazały metodą porównawczą



Rys.3.1 - Procentowy udział masowy ziarn zanieczyszczeń o określonej średnicy w funkcji wymiarów oczek sita według [25] .
1-ul.Anielewicza, 2-zwykły piasek, 3-elektrociepłownia Żerań, 4-elektrociepłownia Siekierki

około 17-krotnie większą skuteczność działania sit projektu [illegible] w stosunku do odmulaczy wykonywanych zgodnie z normą BN-69/5864-05. W ostatnich latach opracowano szereg nowych konstrukcji odmulaczy [1],[25],[26],[27],[34] ale niewiele z nich wdrożono do produkcji.

B PW

Kwapisz [26] zaleca stosowanie odmulaczy na wejściach i wyjściach węzłów cieplnych, przed armaturą regulacyjną w postaci filtrów, w przepompowniach i źródłach energii cieplnej oraz na sieciach cieplnych. Spillner [52] oraz Hejtman [23], [24] przedstawiają konstrukcje odmulaczy magnetycznych i elektromagnetycznych, charakteryzujące się sprawnościami rzędu 80 - 95% i zatrzymujące wszystkie frakcje zanieczyszczeń nawet o wielkościach około 0,1 μm. Zachodnioniemiecka firma "Kraftwerk Union" oferuje cały typoszereg filtrów elektromagnetycznych przeznaczonych do stosowania w ogrzewnictwie i elektrociepłowniach. Krajowe badania prototypu filtru elektromagnetycznego [50] wykazały ponad 90% sprawności oczyszczania urządzenia i wskazały na celowość stosowania tego typu filtrów w obiegach ciepłowniczych.

W opracowaniu [8] przedstawiono szczegółowy przegląd różnorodnych urządzeń do usuwania drobnych zanieczyszczeń z wody, ale żadne z nich nie znalazło zastosowania w krajowych systemach ciepłowniczych. Innymi urządzeniami stosowanymi do oddzielania fazy stałej od ciekłej są hydrocyklony. Są to urządzenia charakteryzujące się bardzo prostą konstrukcją, małymi gabarytami i nie wymagające specjalnej obsługi. W odróżnieniu od filtrów i sit, gdzie rozdział fazy stałej od ciekłej polega na chwytaniu, osadzaniu bądź zatrzymywaniu zanieczyszczeń, w hydrocyklonach rozdział faz następuje pod wpływem działania siły odśrodkowej. Zainteresowanie możliwością zastosowania hydrocyklonów do usuwania zanieczyszczeń z wody sieciowej sięga końca lat sześćdziesiątych, kiedy wykonano badania kilku konstrukcji odmulaczy, w tym odmulaczy hydrocyklonowych [18]. Wyniki badań wykazały, że największą spraw-

ność spośród wszystkich odmulaczy przy niezmiennych oporach odmulania wykazał odmulacz hydrocyklonowy. Do dalszych jego zalet zaliczono mały ciężar, niski koszt, łatwość montażu i demontażu oraz brak siatki. Do wad zaliczono duże opory przepływu. Wynikiem następnych badań odmulaczy hydrocyklonowych [21] było wytypowanie odmulacza o najmniejszych oporach przepływu i najwyższej skuteczności działania. Ponadto stwierdzono, że hydrocyklony zatrzymują duże ilości frakcji o ziarnach drobnych, mniejszych od 75 μm aż do około 4 μm. Pomimo tych obiecujących wyników nie wprowadzono hydrocyklonów do eksploatacji.

Wielokrotnie podejmowano próby określenia skuteczności oczyszczania oraz oporów hydraulicznych odmulaczy [1], [18], [21]. Skuteczność oczyszczania określano albo metodą porównawczą w warunkach eksploatacyjnych [1] bądź przy modelowaniu zanieczyszczeń piaskiem w warunkach laboratoryjnych [18], [21]. Nie opracowano jednak jednolitej metodyki badań odmulaczy a przeprowadzone badania miały charakter wyrywkowy. Zarówno urządzenia tradycyjne, jak i nowe konstrukcje nie miały określonych sprawności oczyszczania.

W celu wyjaśnienia powyższych niejasności oraz dla uzyskania wiarygodnych wyników oceny pracy odmulaczy opracowano własną metodykę badań oraz przeprowadzono badania wybranych typów odmulaczy [34], [35]. Wyniki badań oraz ich omówienie przedstawiono w punkcie 5 i 6 niniejszej pracy.

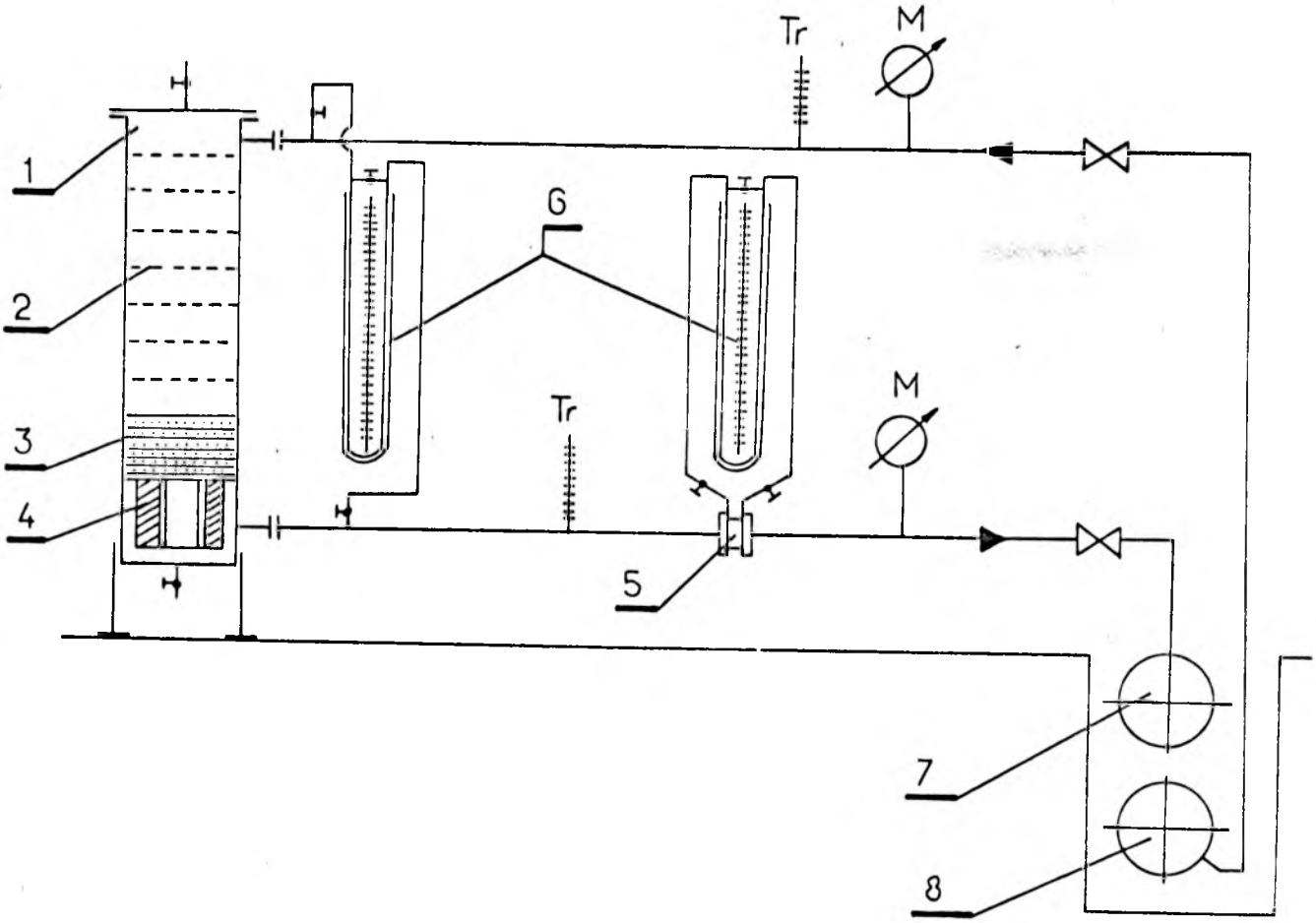
4. Badania właściwości fizycznych zanieczyszczeń mechanicznych sieci cieplnych.

Zasadniczym celem badań było określenie analizy frakcyjnej zanieczyszczeń wody sieciowej ponieważ wyniki analizy frakcyjnej /rys.3.1/ [25] uznano za niemiarodajne ze względu na niewłaściwy sposób ich przeprowadzenia. Sposób ten polegał na poddaniu analizie jedynie osadów zatrzymanych w odmulaczu bez uwzględnienia ilości osadów które przez odmulacz przepłynęły, co przy nieznanej /i niskiej/ sprawności odmulacza musiało doprowadzić do błędnych wniosków.

W celu uzyskania wiarygodnych wyników, badania zanieczyszczeń przeprowadzono za pomocą trzech niezależnych metod pomiarowych [33],[35] : przy pomocy kolumny sitowo-filtracyjnej, z wykorzystaniem automatycznego elektronicznego licznika ziaren typu IZ-2 oraz z wykorzystaniem automatycznego optyczno-elektronicznego licznika ziaren typu HIAC.

Badania zanieczyszczeń kolumną sitowo-filtracyjną przeprowadzono w ten sposób, aby rozdział zanieczyszczeń na poszczególne frakcje odbywał się przy naturalnym przepływie wody sieciowej. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 4.1. Składa się ono z kolumny sitowo-filtracyjnej – 1 , przewodów łączących, kryzy pomiarowej – 5 oraz armatury kontrolno-pomiarowej /manometrów i termometrów/ kolumnę – 1 wypełniono zestawem sit ze znormalizowanymi siatkami – 2 ułożonymi szeregowo zgodnie ze wzrastającą liczbą oczek. Pod sitami znajdował się zestaw włóknin filtracyjnych – 3 a pod nimi umieszczono filtr magnetyczny – 4 składający się z trzech magnesów stałych. Szczeliny między magnesami miały szerokość około 3 mm w których maksymalna wartość indukcji

magnetycznej wynosiła B≈340 mT.



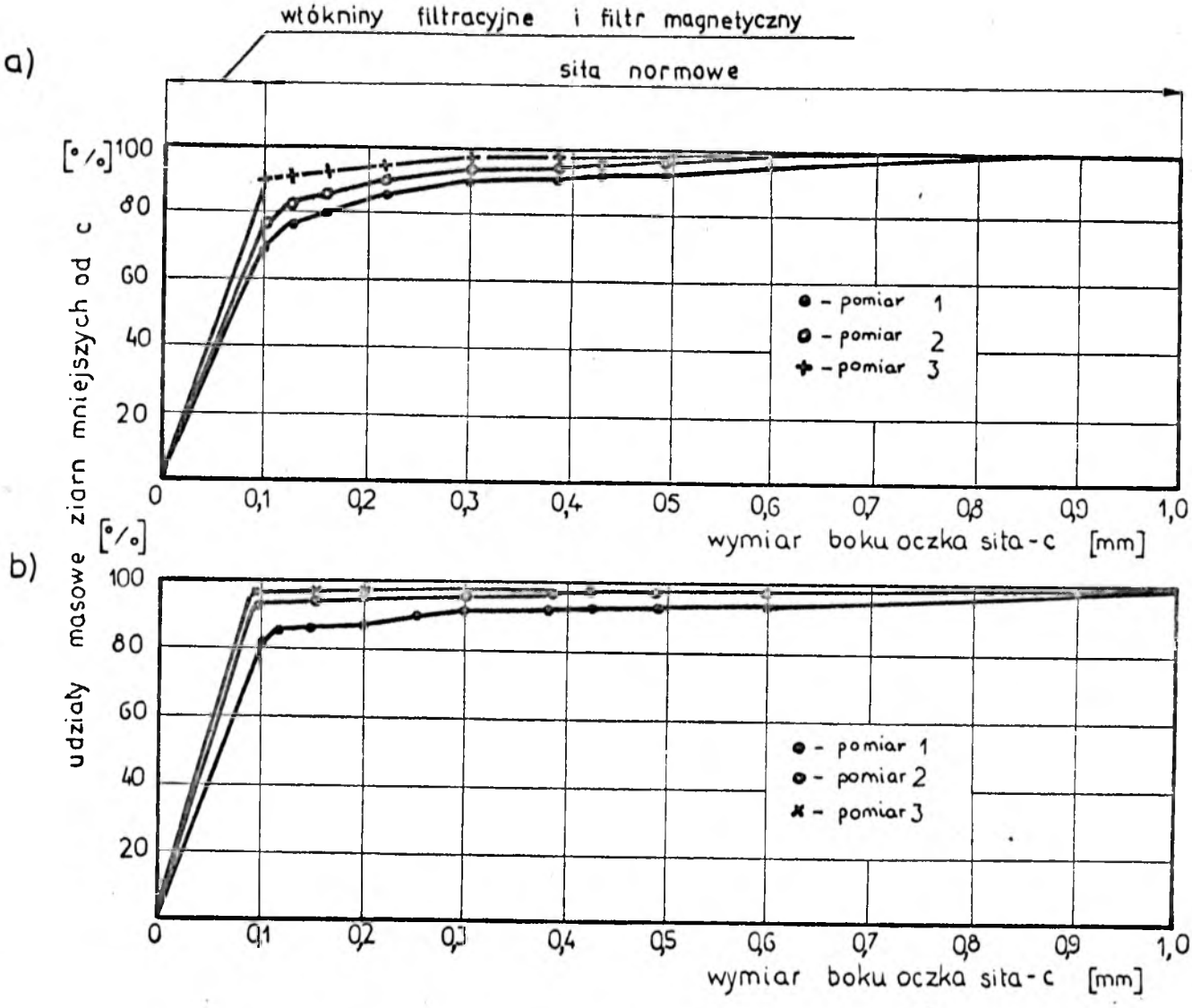
Rys.4.1. Schemat stanowiska do badań zanieczyszczeń z kolumną sitowo-filtracyjną
1-kolumna, 2-zestaw sit, 3-włókniny filtracyjne, 4-filtr magnetyczny. 5-kryza pomiarowa, 6-manometry różnicowe, 7,8-sieć cieplna.

W czasie przepływu wody pobieranej z przewodu zasilającego 8 na elementach 2 , 3 i 4 w sposób naturalny w środowisku wody sieciowej przebiegała separacja zanieczyszczeń. Zasada badań

polegała na pomiarze masy zanieczyszczeń /w stanie powietrzno-suchym/ zebranych na poszczególnych sitach, włókninach oraz w szczelinach magnesów.

Na rys.4.2a przedstawiono przykładowe wyniki badań, przy czym w pomiarze 1 nastąpiło "przebicie" zanieczyszczeń przez warstwę włóknin stąd kolejne badania /krzywe 2 i 3 / przeprowadzono zwiększając liczbę warstw włóknin.
Stwierdzono, że na włókninach i w szczelinach magnetycznych zostało zatrzymanych 70,0%, 78% i 90% masy zanieczyszczeń o średnicach zastępczych mniejszych od 100 μm.
Z następnych badań ze zwiększoną ilością włóknin filtracyjnych uzyskano wyniki pokazane na rys. 4.2b z których wynika, że udział masowy zanieczyszczeń o średnicach zastępczych mniejszych od 100 μm zawiera się w granicach 81-98% ogólnej masy zanieczyszczeń.

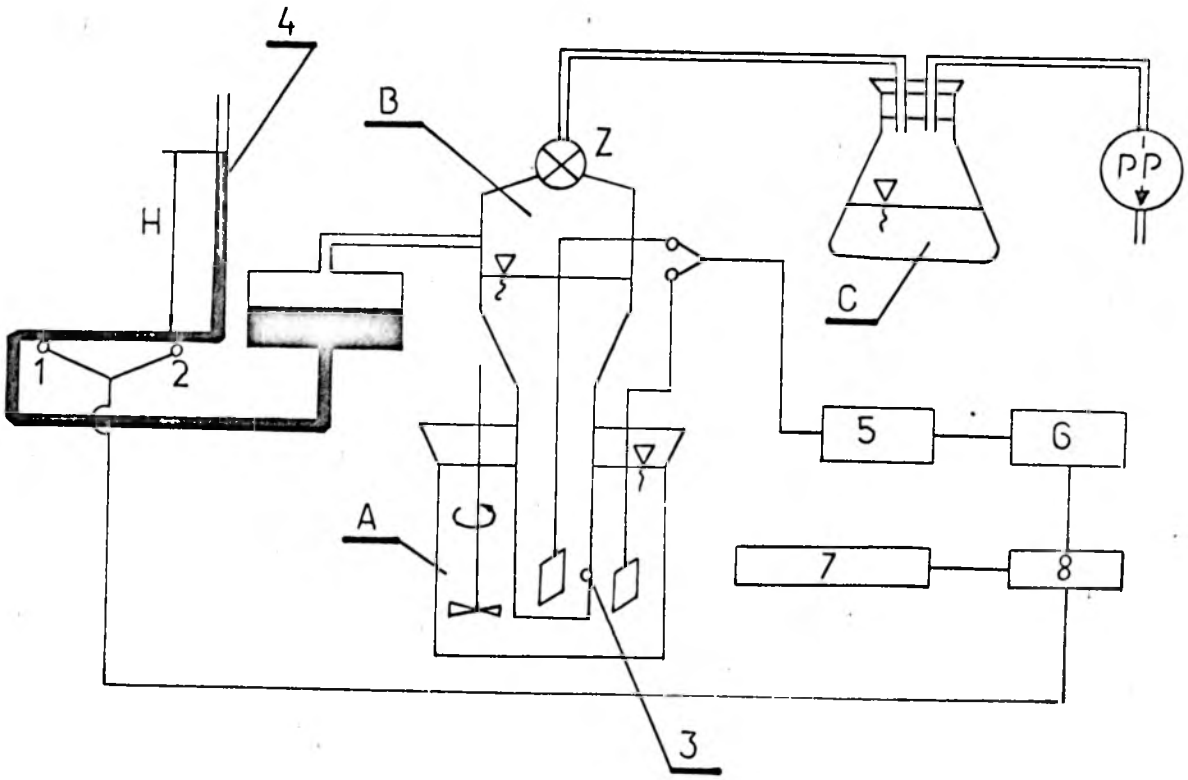
Analiza frakcyjna zanieczyszczeń elektronicznym licznikiem ziarn typu LZ-2 /opracowanym i wykonanym w Instytucie Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej / umożliwia pomiar rozkładu frakcyjnego ziarn w zakresie średnic zastępczych mieszczących się od 2 do 60 μm. W liczniku ziarn LZ-2 /rys.4.3/ następuje zliczanie impulsów generowanych cząsteczkami zanieczyszczeń. Pomiędzy elektrodami znajduje się komora pomiarowa - 3 przez którą przepływa roztwór elektrolityczny, zawierający określoną ilość badanej wody z zanieczyszczeniami.
Roztwór ten z naczynia A przedostaje się do naczynia B przez komorę pomiarową dzięki działaniu pompy.
Przy zamkniętym zaworze Z pompa PP wytwarza w zbiorniku C pod-



Rys.4.2. Wyniki badań procentowego udziału masowego zanieczyszczeń wody sieciowej warszawskiej sieci cieplnej: rys.4.2a - maj 1981 [33], rys.4.2b - wrzesień 1982 [34]

ciśnienie. Z chwilą otwarcia zaworu Z podciśnienie wytwarzane jest również w zbiorniku B, co wskazuje manometr rtęciowy - 4. Rtęć w otwartym ramieniu opada a równoważna objętość elektrolitu przepływa przez komorę pomiarową. Objętość rurki poziomej mano-

metru pomiędzy kontaktami 1 i 2 odpowiada próbce o objętości 1 cm^3. Elektrolitem jest roztwór 1% NaCl w wodzie destylowanej. Badane cząstki /ziarna/ znajdujące się w elektrolicie przepływając przez komorę pomiarową powodują zmiany potencjału pomiędzy elektrodami proporcjonalne do objętości ziarn. Sygnały te poprzez wzmacniacz impulsowy – 5 i dyskryminator amplitudy – 6 podawane są do licznika – 7 przez układ blokujący – 8. Zliczanie

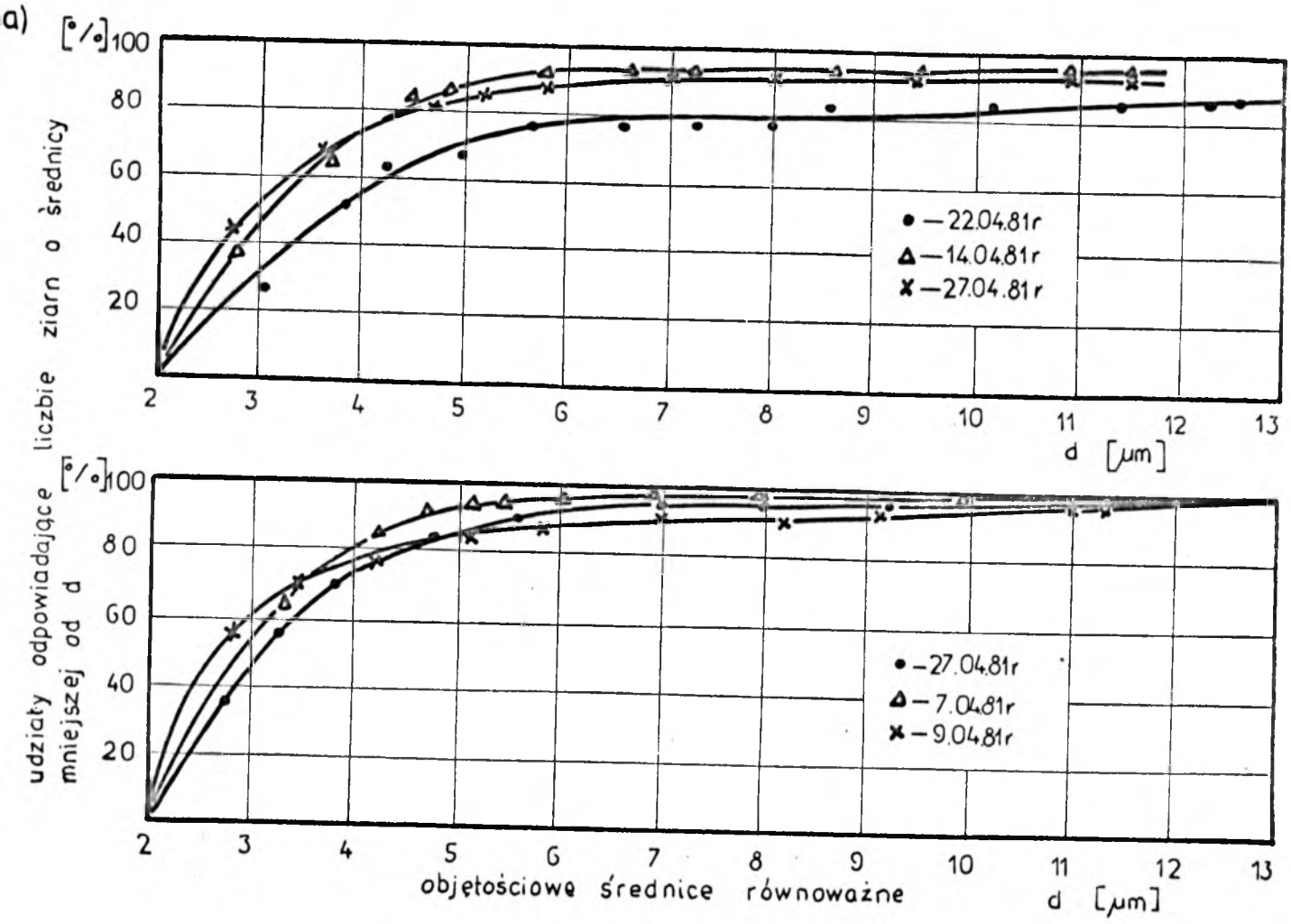


Rys.4.3. Schemat ideowy elektronicznego licznika ziarn LZ-2

impulsów zaczyna się z chwilą zwarcia rtęci kontaktem 1 a kończy w chwili zwarcia kontaktem 2.

Na rys. 4.4 przedstawiono przykładowe wyniki sześciu serii po-

miarowych badań wody sieciowej.



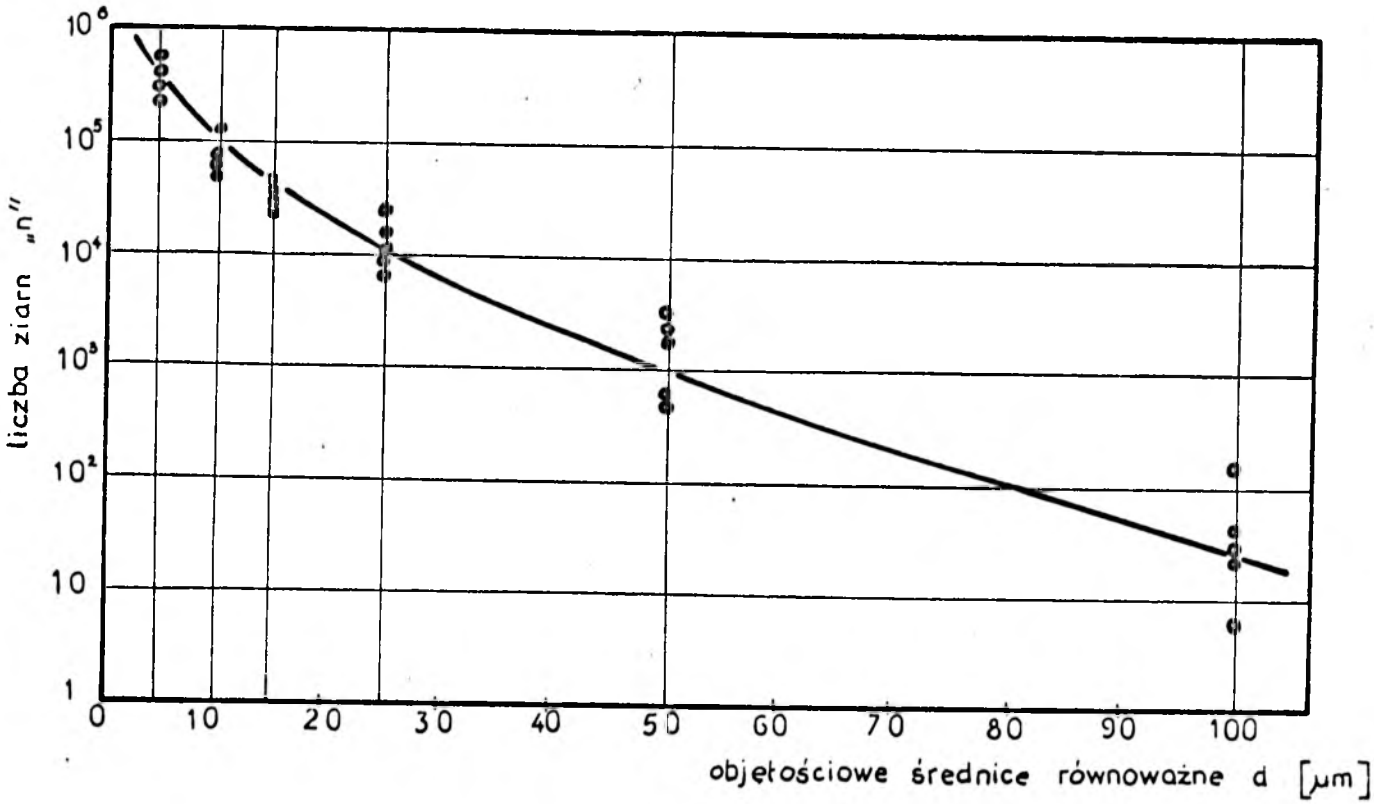
Rys.4.4. Analiza frakcyjna zanieczyszczeń wody sieciowej warszawskiej sieci cieplnej wykonana licznikiem ziarn LZ-2.

Z wykresów tych wynika, że w liczbie ziarn o średnicach równoważnych mniejszych od 60 μm 83-98% całkowitej ilości tych ziarn zawiera się w zakresie średnic od 2 do 10 μm.

Analiza frakcyjna zanieczyszczeń optyczno-elektronicznym licznikiem ziarn typu "HIAC" /produkcji USA/ polega na zasadzie tłumienia wiązki promieni świetlnych przez cząstki zanieczyszczeń przepływających w badanej cieczy pomiędzy źródłem światła a fotodiodą. Impuls z fotodiody kierowany jest do elektronicznego układu rejestrującego w którym wydzielono 10 sektorów czułości. Jeżeli liczba ziarn zanieczyszczeń nie przekracza 4000 w ciągu sekundy, to rejestracja ich wielkości przebiega w indywidualny sposób. Przy przekroczeniu tej liczby ziaren przyrząd całkuje podawane impulsy rejestrując wartości średnie.
Analizie poddano wodę sieciową po wstępnym przefiltrowaniu pobranych próbek przez sito o wymiarze oczka c=100 μm. Wyniki serii pomiarów wody sieciowej przedstawiono na rys. 4.5.

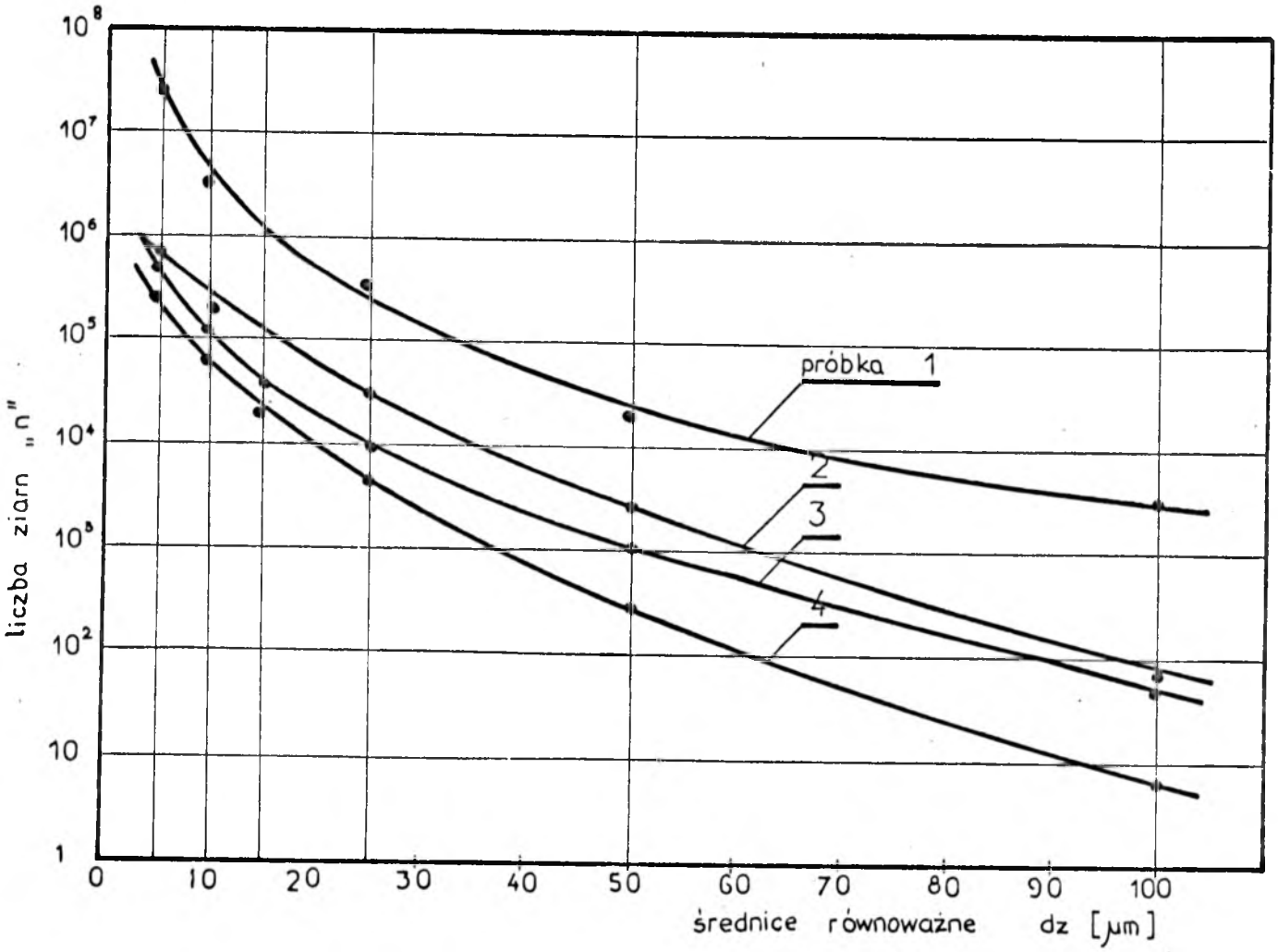
Z rysunku wynika, że największą liczbę ziarn w wodzie sieciowej stanowią ziarna o średnicach równoważnych mniejszych od 10 um.

Na rys. 4.6 przedstawiono wyniki analizy wody sieciowej pobieranej z kolektora węzła centralnego ogrzewania, w którym występowała tak zwana " martwa przestrzeń". Kolejne próbki wody /nr 1, 2,3 i 4 / pobierane były w czasie przepłukiwania kolektora świeżą wodą sieciową. Z rysunku wynika, że w przestrzeniach w których następuje spadek prędkości wody znacząco wzrasta udział ziarn o większych średnicach równoważnych. Wyniki przeprowadzonych badań właściwości fizycznych zanieczyszczeń przeprowadzone za pomocą nowej metody w której proces separacji cząstek prze-



Rys.4.5. Wyniki badań zanieczyszczeń wody sieciowej przy pełnym przepływie licznikiem ziarn "HIAC"

biega w warunkach naturalnego przepływu wody oraz za pomocą elektronicznego i optyczno-elektronicznego liczników ziarn są zbieżne. Wykazały one, że udział masowy zanieczyszczeń o ziarnach posiadających średnice zastępcze większe od 100 μm zawiera się w granicach 5-20%, natomiast udział masowy zanieczyszczeń o ziarnach posiadających średnice równoważne mniejsze od 10 μm wynosi około 70-80% ogólnej ilości zanieczyszczeń mniejszych od 100 μm.



Rys.4.6. Wyniki badań zanieczyszczeń wody sieciowej pobieranej z "martwej" przestrzeni licznikiem ziarn "HIAC"

5. Badania odmulaczy inercyjno-siatkowych.

Metodykę określania skuteczności oczyszczania odmulaczy przedstawiono szczegółowo w [34], [35]. Polegała ona na badaniu odmulaczy przy pobieraniu wody sieciowej z pracującej sieci cieplnej podczas sezonu ogrzewczego. Wszystkie odmulacze badano na jednym stanowisku pomiarowym w podobnych warunkach hydraulicznych. Jako skuteczność oczyszczania przyjęto iloraz:

$$\eta = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot 100\% \qquad /5.1/$$

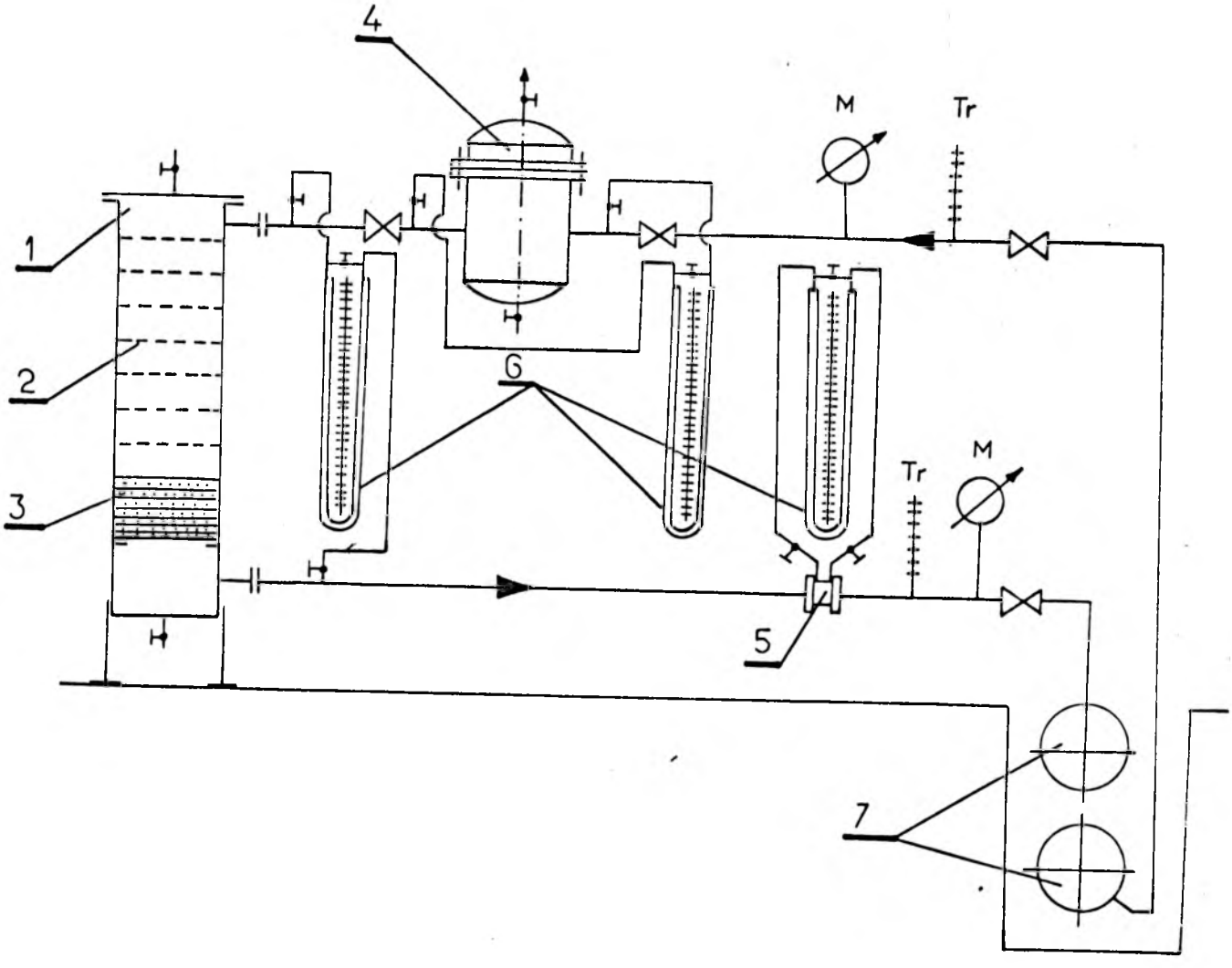
gdzie:

m_1 - masa zanieczyszczeń zatrzymanych w odmulaczu

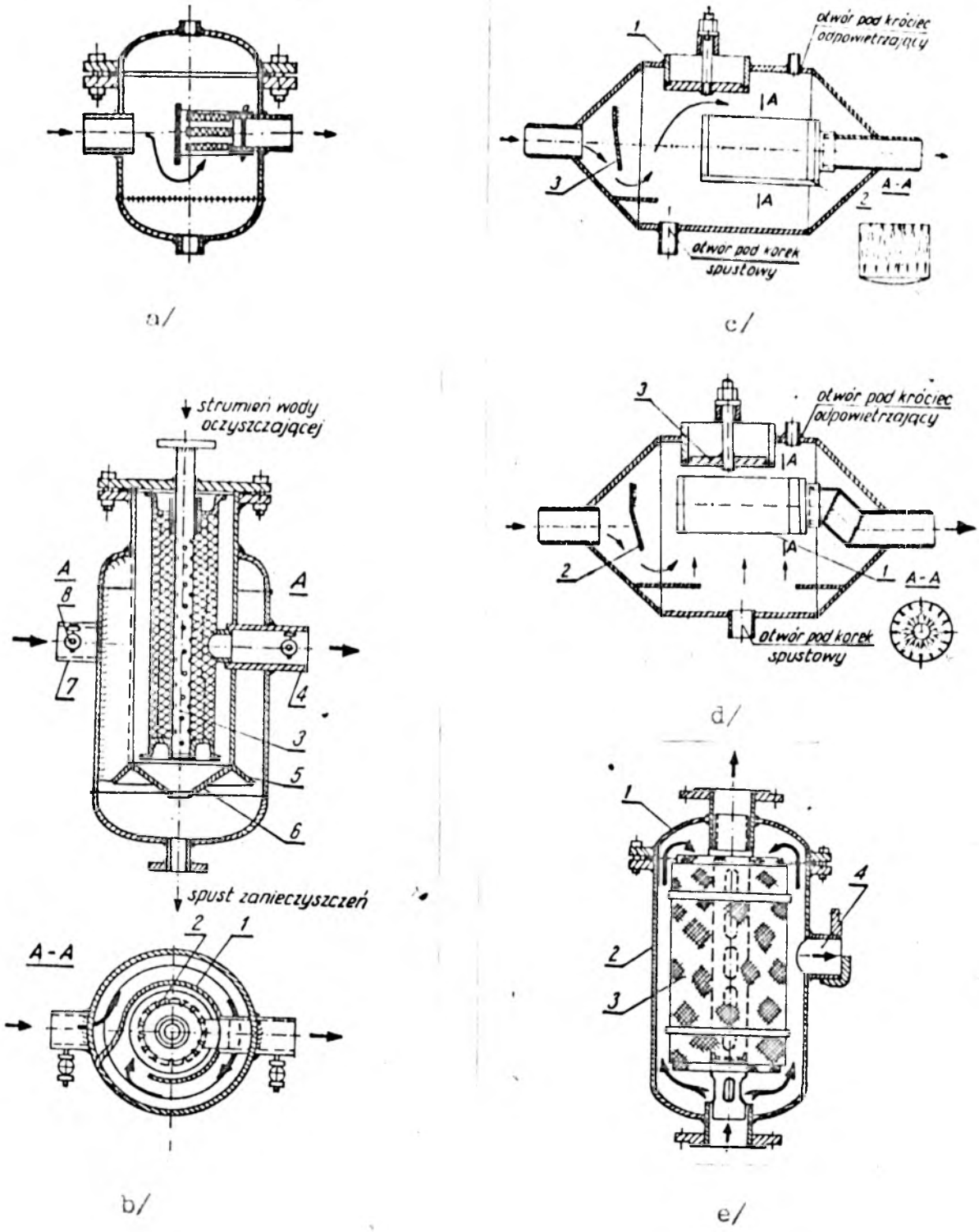
m_2 - masa zanieczyszczeń zatrzymanych w kolumnie sitowo-filtracyjnej

Schemat stanowiska do badań odmulaczy przedstawiono na rys.5.1. Składa się ono z: badanego odmulacza - 4 kolumny sitowo filtracyjnej - 11 , manometrów różnicowych - 6 , armatury odcinającej i kontrolnej, kryzy - 5 oraz przewodów impulsowych i obiegowych. Badania prowadzono w ten sposób, że wodę sieciową przepuszczano przez odmulacz oraz kolumnę sitowo-filtracyjną. Kolumna wypełniona była sitami oraz włókninami filtracyjnymi. Badania polegały na pomiarze masy zanieczyszczeń zatrzymanych na poszczególnych sitach i włókninach filtracyjnych oraz ilości zanieczyszczeń zatrzymanych w odmulaczu. Ponadto przeprowadzono badania charakterystyk hydraulicznych odmulaczy w stanie czystym.

Badano pięć typów odmulaczy, których schematy przedstawiono na rysunkach 5.2 a,b,c,d,e, natomiast wyniki badań znajdują się w Tablicy 5.1.



Rys.5.1. Schemat stanowiska do badań odmulaczy
1-kolumna sitowo-filtracyjna, 2-sita, 3-włókniny filtracyjne, 4-odmulacz, 5-kryza pomiarowa, 6-manometry różnicowe, 7-sieć cieplna.



Rys.5.2. Przegląd konstrukcji odmulaczy:

a/ odmulacz wykonany wg BN-69/8864-05, b/ odmulacz typu IOiW: 1-spiralna przegroda, 2-filtr, 3-rura perforowana, 4-króciec wylotowy, 5,6-osłony stożkowe, 7-króciec wlotowy, 8-króćce do pomiaru spadku ciśnienia.

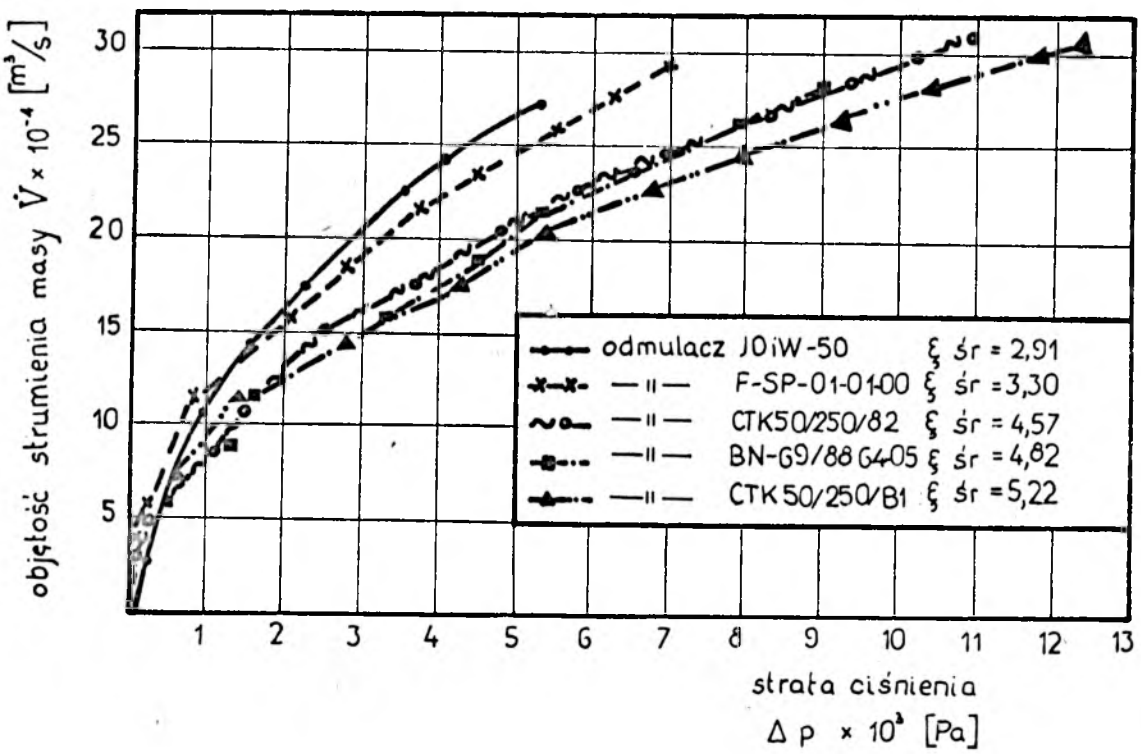
c/ odmulacz typu CTK/B1: 1-właz owalny, 2-wkład filtrujący, 3-przegroda kierująca.

d/ odmulacz typu CTK/B2: 1-wkład filtrujący, 2-przegroda kierująca, 3-właz owalny, e/ filtr typu F-SP-01

Tablica 5.1. Wyniki badań odmulaczy siatkowo-inercyjnych.

Typ odmulacza	Średnica nominalna dn /mm/	Masa urządzenia m /kg/	Współczynnik oporu miejscowego ξ	Sprawność masowa η %
BN-69/8864-05B	40	25	4,82	1,85
IOiW-50	50	30	2,91	17,5
CTK/250/B1	50	31	5,22	17,9
CTK/250/B2	50	30	4,57	13,4
Filtr F-SP	50	23	3,30	10,7

Na rys.5.3 przedstawiono wyniki badań hydraulicznych odmulaczy w postaci zależności objętości strumienia masy wody od straty ciśnienia.



Rys.5.3. Charakterystyki hydrauliczne odmulaczy

Wszystkie badane odmulacze charakteryzują się zbliżonymi wartościami współczynników oporów miejscowych mieszczących się w zakresie od ξ=2,91 do ξ= 5,22. Najniższą wartość ξ = 2,91 posiada odmulacz typu IOiW, najwyższą odmulacz CTK 50/250/B1 - ξ= 5,22.

Odmulacz wykonywany zgodnie z normą BN-69/8864-05B uzyskał najmniejszą skuteczność oczyszczania η = 1,85%, a największą odmulacz CTK/250/B1 - η = 17,9%.

6. Podsumowanie.

Znany jest szkodliwy wpływ zanieczyszczeń na pracę systemów ciepłowniczych. Zanieczyszczenia te składają się głównie z tlenków żelaza. Ponieważ procesy korozyjne przebiegają w sposób ciągły, w sieciach cieplnych następuje stały przyrost ilości zanieczyszczeń. Dotychczasowy pogląd, że w sieciach przeważają zanieczyszczenia o dużych wymiarach rzędu milimetrów okazał się niesłuszny w świetle studiów literaturowych i badań własnych, które wykazały że w wodzie sieciowej przeważają zanieczyszczenia drobne o wielkościach ziaren rzędu kilku mikrometrów. Za najbardziej szkodliwe dla sieci należy uznać cząstki drobnoziarniste magnetytu o wielkościach od 1 do 20 μm, które w postaci "szlamu magnetytowego" przyśpieszają procesy korozyjne .

Ze względu na burzliwy charakter przepływu wody oraz na tarcie cząsteczek stałych o ścianki przewodów i przy niestabilnych warunkach pracy sieci /uderzenia hydrauliczne, stany awaryjne / następuje odpadanie od ścianek rur oraz ciągłe rozdrabnianie zanieczyszczeń na coraz to mniejsze frakcje.

Ze względu na taki stan rzeczy, środek ciężkości prac mających na celu usuwanie zanieczyszczeń z wody sieciowej powinien być przesunięty w stronę ziarn najdrobniejszych, to znaczy o wielkościach kilku mikrometrów, tym bardziej że usuwanie zanieczyszczeń grubszych nie przedstawia większych trudności z technicznego punktu widzenia.

Badania odmulaczy siatkowo-inercyjnych zdyskwalifikowały powszechnie stosowany w węzłach cieplnych odmulacz wykonywany zgodnie z normą BN-69/8864-04 ze względu na niską sprawność oraz nie-

korzystne cechy eksploatacyjne. Sprawności innych odmulaczy jakkolwiek około 10-cio krotnie większe od sprawności odmulaczy BN-69/8864-04, nie przekraczają w sumie 20%.
Zwiększenie sprawności odmulaczy siatkowych możliwe jest poprzez wzrost pojemności tych urządzeń oraz zwiększanie gęstości oraz powierzchni siatek filtracyjnych. Znaczne zwiększenie pojemności odmulaczy jest ograniczone niewielką kubaturą pomieszczeń przeznaczonych na węzły cieplne. Stosowanie gęstych siatek filtracyjnych powoduje konieczność częstego czyszczenia odmulaczy /co jest nie do przyjęcia przez służby eksploatacyjne/, a w przypadku zaniedbania tych czynności - do mechanicznego uszkadzania wkładów filtracyjnych na skutek wzrostu oporu hydraulicznego. Również możliwości zwiększenia powierzchni siatek wkładów filtracyjnych są niewielkie.
Prawidłowo zaprojektowane odmulacze hydrocyklonowe zatrzymują ziarna o wielkościach rzędu kilku mikrometrów /a więc najgroźniejsze dla sieci cieplnych/, charakteryzują się wysokimi sprawnościami dochodzącymi do 90%, małymi gabarytami, prostotą konstrukcji i nieskomplikowaną obsługą. Ponieważ nie są one wyposażone we wkłady filtracyjne, nie ma konieczności wymiany tych wkładów oraz nie istnieje niebezpieczeństwo dławienia przepływu tak jak to ma miejsce w odmulaczach siatkowych. Odmulacze hydrocyklonowe wykazują więc szereg cech korzystniejszych w stosunku do odmulaczy siatkowo-inercyjnych, przy czym ze względu na to że charakteryzują się one wyższymi oporami hydraulicznymi powinny być instalowane w takich punktach sieci, w których występuje nadmiar ciśnienia dyspozycyjnego/w dotychczasowej praktyce dławionego za pomocą kryz./

7. Stan wiedzy o hydrocyklonach.

Pierwszy hydrocyklon został opatentowany w USA w roku 1891, ale szerokie zastosowanie praktyczne uzyskał dopiero pod koniec lat czterdziestych, kiedy opublikowano wyniki prac Driessena [20] prowadzonych w Holandii w latach 1939-1945.

Obecnie istnieje bogata literatura dotycząca hydrocyklonów, ale przeważają w niej prace o charakterze empirycznym. Są one nierzadko obarczone znacznymi błędami. Błędy te wynikają ze stosowanych technik pomiarowych polegających na wprowadzaniu sond do wnętrza hydrocyklonów w celu pomiaru rozkładów prędkości i ciśnień. Ponieważ przepływ w hydrocyklonie jest bardzo wrażliwy na różnego rodzaju zakłócenia, sama obecność sond w jego wnętrzu powodowała deformację pól prędkości i ciśnień. Poza tym ze względu na różnorodność zastosowań hydrocyklonów oraz różne wymiary geometryczne tych urządzeń większość opublikowanych wyników badań jest nieporównywalna.

Obecnie hydrocyklony stosowane są do rozdziału faz w procesach takich jak: oddzielanie fazy stałej z cieczy, oddzielanie różnych faz stałych, oddzielanie różnych płynów oraz oddzielanie gazu od płynu. Znalazły one szerokie zastosowanie w różnorodnych gałęziach przemysłu. W przemyśle wydobywczym /węgla kamiennego, ropy naftowej, rud metali żelaznych i nieżelaznych / stosowane są w procesach wzbogacania, klasyfikacji, zagęszczania i klarowania. W przemyśle chemicznym hydrocyklony stosowane są do klasyfikacji spolimeryzowanych tworzyw sztucznych oraz otrzymywanych w procesach krystalizacji różnych związków chemicznych.

W przemyśle celulozowo-papierniczym do sortowania mas włóknistych, w gospodarce komunalnej do klarowania wody i do oczyszczania ścieków. W energetyce jądrowej hydrocyklony stosowane są do oczyszczania oraz wzbogacania rud uranu. Znajdują one również zastosowanie w przemyśle spożywczym - głównie w cukrownictwie, mleczarstwie i przetwórstwie ziemniaków.

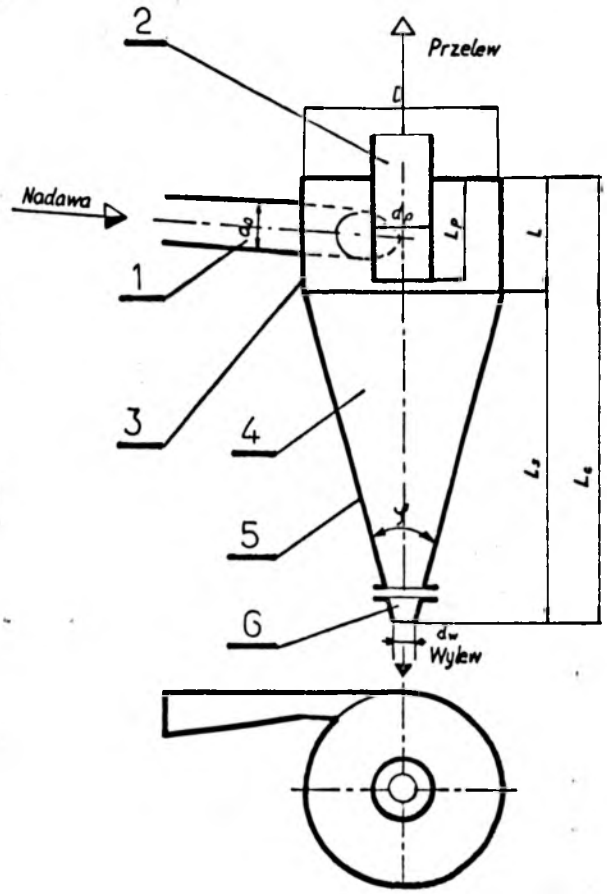
Wraz ze zwiększaniem się się stanu wiedzy o zjawiskach zachodzących w hydrocyklonach - zakres ich stosowania powiększa się i obejmuje co raz to nowe działy techniki.

7.1. Przebieg zjawisk fizycznych w hydrocyklonie.

Zasada działania hydrocyklonu jest następująca: płyn zawierający cząsteczki stałe wprowadzany jest z dużą prędkością stycznie do cylindrycznego zbiornika. Wysoka prędkość wirowania wytwarza przyśpieszenie odśrodkowe powodujące ruch względny fazy stałej w stosunku do płynu, dzięki czemu możliwa jest separacja bądź klasyfikacja ziaren.

Na rys.7.1. przedstawiono schemat hydrocyklonu, a oznaczenie poszczególnych wymiarów zgodne z BN-71/2270-03 jak również nazewnictwo używane w stosunku do hydrocyklonów zgodne z BN-76/2270-02 przedstawiono w wykazie nazw i oznaczeń niniejszej pracy.

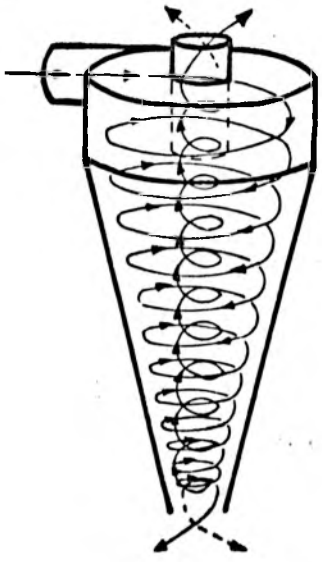
Model przepływu przez hydrocyklon przedstawiony na rys.7.2 można określić jako "spirala wewnątrz spirali". Stycznie wprowadzony płyn do części cylindrycznej wytwarza spiralną strugę cieczy przesuwającą się w kierunku stożkowej części hydrocyklonu. Frakcja wylewowa zawierająca znaczną ilość fazy stałej wydostaje się przez wylew, a pozostały płyn w postaci wewnętrznej spiral-



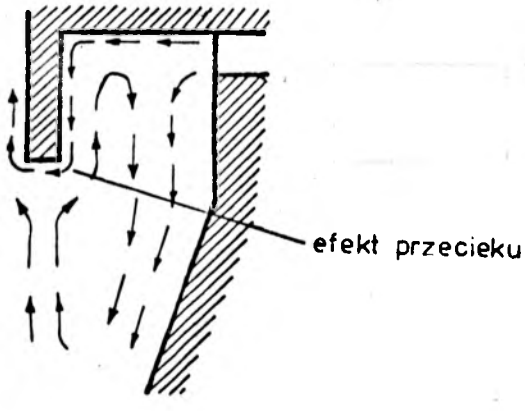
Rys.7.1. Schemat hydrocyklonu: 1-dysza wlotowa, 2-dysza przelewowa, 3-część cylindryczna, 4-korpus, 5-część stożkowa, 6-część wylewowa.

nej strugi przesuwa się w kierunku przelewu i wydostaje się na zewnątrz hydrocyklonu.

Część zawiesiny zasilającej hydrocyklon dostaje się bezpośrednio z króćca wlotowego do górnej części hydrocyklonu i dalej do przelewu - rys.7.3. Zjawisko to znane pod nazwą "efektu przecieku" /leakage effect"/ powoduje obniżenie się sprawności urządzenia gdyż ciecz unosi ze sobą fazę stałą, która nie podlega pełnej separacji w hydrocyklonie. [14]



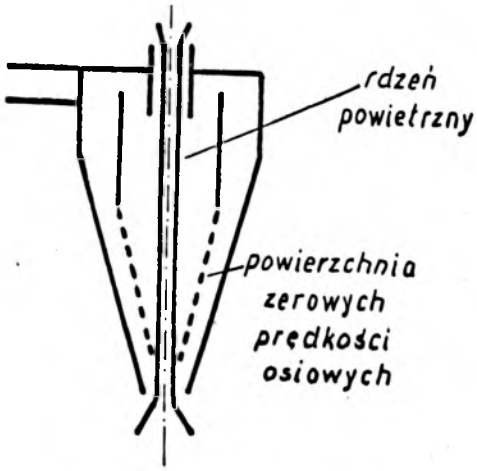
Rys.7.2. Model przepływu przez hydrocyklon



Rys.7.3. Schemat ruchu pionowego w górnej części hydrocyklonu

Na pogorszenie sprawności hydrocyklonu ma również wpływ występowanie wirów pionowych w pobliżu zewnętrznej powierzchni króćca przelewowego.

Przy dostatecznie wysokiej prędkości płynu w pobliżu osi hydrocyklonu na skutek spadku ciśnienia może powstać rdzeń powietrzny - jeżeli obszar ten ma kontakt z atmosferą bądź rdzeń składający się z pary cieczy i wydzielających się z niej gazów. Powierzchnia rdzenia powietrznego na granicy faz jest nieregularna. Srednica rdzenia powietrznego jest mniej więcej stała na całej długości hydrocyklonu i wynosi ona od 0,06D do 0,33D. [14] Przy zapewnieniu dostatecznie wysokiego ciśnienia statycznego w instalacji rdzeń powietrzny nie powstaje. Spiralny ruch strugi można rozłożyć na składowe prędkości: osiową - u, promieniową - v i styczną - w. Ponieważ ruch spirali zewnętrznej płynu odbywa się w przeciwnym kierunku osiowym niż ruch spirali wewnętrznej, w hydrocyklonie powstaje powierzchnia zerowych prędkości osiowych /rys.7.4./Powierzchnia ta dzieli hydrocyklon na dwa obszary: wewnętrzny - w którym zawiesina kieruje się do przelewu i zewnętrzny - z którego zawiesina dostaje się do wylewu.
Powierzchnia zerowych prędkości osiowych traktowana jest jako powierzchnia klasyfikacji. Siły działające na ziarno krążące w hydrocyklonie powodują jego przemieszczanie w kierunku osi lub w kierunku ścian. W przypadku równowagi siły odśrodkowej z siłą oporu ośrodka ziarno powinno ciągle krążyć na określonym, stałym promieniu równowagi. W związku z tym wszystkie ziarna, których powierzchnie równowagi znajdują się wewnątrz powierzchni zerowych prędkości osiowych powinny przedostać się do przelewu a pozostałe do wylewu. Na rozdział faz ma znaczny wpływ czas przebywania



Rys.7.4. Schemat powierzchni zerowych prędkości osiowych według [14]

ziarn wewnątrz hydrocyklonu. Im czas ten jest dłuższy tym większa liczba ziaren ma szansę osiągnięcia swoich orbit równowagi a tym samym większa ich ilość może być poddana separacji.
Prędkość promieniowa osiąga maksymalną wartość w pobliżu ściany hydrocyklonu i maleje ze zmniejszaniem się promienia.
Prędkość styczna wielokrotnie przewyższa wartości prędkości osiowej i promieniowej i ma ona decydujące znaczenie w procesie rozdziału faz. Z prac doświadczalnych [14] wynika, że jej wartość rośnie ze zmniejszaniem się promienia, począwszy od ściany hydrocyklonu, następnie dla pewnej wartości promienia prędkość ta osiąga wartość maksymalną o podobnej wartości dla wszystkich przekrojów osiowych i dalej maleje do osi hydrocyklonu.

Z dużym uproszczeniem przepływ cieczy przez hydrocyklon można traktować jako przypadek krążenia cieczy idealnej przy wypływie

przez otwór w dnie płaskiego zbiornika. W tym przypadku rozważając płaski walec zasilany stycznie na całym obwodzie cieczą idealną wypływającą przez otwór centryczny w jego dnie i pomijając prędkość promieniową jako małą w stosunku do prędkości stycznej można napisać zależność:

$$w \cdot r = const \qquad /7.1./$$

Lepszym przybliżeniem dla określenia prędkości stycznej jest zależność:

$$w \cdot r^n = const \qquad /7.2./$$

We wzorze tym wartość wykładnika n wyznaczona doświadczalnie waha się w granicach n = 0,5 - 0,9 [14]. W celu powiązania prędkości wlotowej z prędkością styczną wprowadzono współczynnik α zdefiniowany jako iloraz prędkości stycznej wc na średnicy D hydrocyklonu i średniej prędkości wlotowej wi:

$$\alpha = \frac{w_c}{w_i} \qquad /7.3./$$

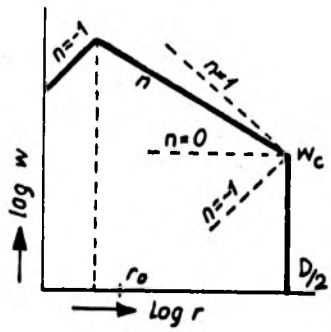
W związku z tym zależność /7.2/ można napisać jako

$$w \cdot r^n = \alpha w_i \left(\frac{D}{2}\right)^n = const \qquad /7.4./$$

Tarjan [56] przedstawia następującą zależność:

$$w = w_c \left(\frac{\frac{D}{2}}{r}\right)^n \qquad /7.5./$$

i podaje że w pobliżu osi hydrocyklonu należy przyjmować wartość wykładnika n= -1 natomiast w pozostałym obszarze n=0,5 - 0,9 /rys.7.5/.



Rys.7.5. Rozkład prędkości stycznych według [56]

Inną formą rozkładu prędkości stycznej jest empiryczny wzór Fontein'a i Dijksmana [14] o postaci:

$$w = \frac{k_1}{r} + k_2 \cdot r \qquad /7.6./$$

gdzie k_1 i k_2 są stałymi.

Zależność ta może odzwierciedlać rzeczywisty rozkład prędkości stycznej pod warunkiem, że stałe k_1 i k_2 będą mogły przybierać różne wartości dla różnych promieni r, a w szczególności dla małych promieni r k_1 musi być równe zeru. Niestety autorzy nie

podają wielkości k_1 i k_2.

Głównym celem większości prac teoretycznych dotyczących przepływu przez hydrocyklon było wyznaczenie rozkładu prędkości stycznej.

7.2. Przegląd literatury

Pierwszym klasycznym opracowaniem teorii przepływu przez hydrocyklon jest praca Driessena [20] opublikowana w 1951r. Driessen rozwiązał równanie Naviera-Stokes'a dla hydrocyklonu w kształcie płaskiego walca z centrycznym otworem w jego dnie zakładając stacjonarność i symetryczność przepływu oraz przyjmując składowe pionowe prędkości równe zeru.

Równanie Naviera-Stokes'a po przekształceniach algebraicznych przedstawiono w postaci:

$$v\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{w}{r} = -\frac{1}{\varrho}\frac{\partial p}{\partial r} + \nu'\left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2}\right) \qquad /7.7./$$

Rozwiązaniem powyższego równania jest zależność:

$$w = \frac{C}{n+1} r^n + \frac{C_1}{r} \qquad /7.8./$$

Wykładnik potęgowy n w równaniu /7.8/ ma wartość

$$n = 1 - \frac{E}{2\pi\nu'} \qquad /7.9./$$

ν' - oznacza współczynnik lepkości turbulentnej

C i C_1 są stałymi całkowania

$$E = -v \cdot 2\pi r = \text{const.} \qquad /7.10/$$

Równanie /7.8/ przedstawiono w postaci graficznej dla różnych wartości wykładnika n uzyskując zgodność wyników eksperymentalnych z krzywą obliczoną analitycznie przy wartości n = -1. Przyjmując n=-1 obliczono wartość współczynnika lepkości turbulentnej:

$$\nu' = \frac{E}{4\pi} \qquad /7.11./$$

Rietema [48] przedstawił równanie Naviera-Stokes'a w postaci:

$$u\frac{\partial w}{\partial z} + v\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{vw}{r} = (\nu+\varepsilon)\left\{\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial w}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{w}{r^2}\right\} \qquad /7.12./$$

Gdzie wpływ turbulencji na przepływ zawiera się we współczynniku lepkości wirowej ε, który dodawany jest do normalnego współczynnika lepkości ν.

Opierając się na danych eksperymentalnych Kelsalla z których wynikało, że rozkład prędkości stycznej jest niezależny od współrzędnych osiowych i po przekształceniach algebraicznych otrzymano równanie:

$$\frac{v}{r}\frac{\partial(wr)}{\partial r} + (\nu+\varepsilon)\left\{\frac{\partial}{\partial r}\frac{1}{r}\frac{\partial(wr)}{\partial r}\right\} = 0 \qquad /7.13./$$

Zakładając, że współczynnik lepkości wirowej $-\varepsilon$ = const i wprowadzając podstawienia:

$$\lambda = \frac{V_c\frac{D}{2}}{\nu+\varepsilon} \approx \frac{V_c\frac{D}{2}}{\varepsilon} \qquad /7.14./$$

$$\varphi = \frac{wr}{w_c\frac{D}{2}} \qquad /7.15./$$

$$\sigma = \frac{r}{\frac{D}{2}} \qquad /7.16./$$

gdzie v_c i w_c są odpowiednio prędkościami: promieniową i styczną na średnicy części walcowej hydrocyklonu, otrzymano zależność:

$$\lambda \frac{v}{v_c} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} + \left(\frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} \right) = 0 \qquad /7.17./$$

Rozwiązaniem tego równania dla warunków brzegowych: $\varphi = 1$ dla $\sigma = 1$ oraz uwzględniając, że na granicy faz rdzenia powietrznego i cieczy nie występują naprężenia styczne - $\sigma = \sigma_o$/gdzie σ_o - odnosi się do promienia rdzenia powietrznego - r_o/ jest zależność:

$$\varphi = C_2 - C_1 e^{-\lambda \sigma} \left(\frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} \right) \qquad /7.18./$$

gdzie:

$$C_1 = \frac{\lambda^2}{-e^{-\lambda} - \lambda e^{-\lambda} + \frac{\sigma_o^2}{2} \lambda^2 e^{-\lambda \sigma_o} + \sigma_1 \lambda e^{-\lambda \sigma_o} + e^{-\lambda \sigma_o}} \qquad /7.19./$$

oraz

$$C_2 = 1 + C_1 e^{-\lambda} \left(\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} \right) \qquad /7.20./$$

Wykreślając szereg wartości λ w funkcji promienia, Rietema stwierdził, że dla poprawnie skonstruowanego hydrocyklonu wartość λ powinna być większa od 10.

Słabym punktem powyższych rozważań jest przyjęcie przez Rietema stałej wartości lepkości wirowej - ε, co nie jest zgodne z rzeczywistością, gdyż lepkość wirowa zmienia się wraz z intensywnością naprężeń stycznych i w konsekwencji jest ona funkcją promienia hydrocyklonu. Podstawową pracą przeznaczoną głównie dla potrzeb inżynierskich jest książka Bradley'a "The Hydrocyclone" [14] Zawiera ona szczegółowy opis modelu przepływu przez hydrocyklon

podział i klasyfikację hydrocyklonów, parametry projektowe i operacyjne tych urządzeń oraz przegląd zastosowań w różnych gałęziach przemysłu. W pracy tej przedstawiono porównanie wyników większości prac jakie się ukazały do chwili jej wydania. Zawiera ona również bogatą bibliografię oraz wykaz patentów.

W jednym z najnowszych opracowań [7] Bloor i Ingham rozwiązali równanie Naviera-Stokes'a dla płynu newtonowskiego we współrzędnych sferycznych uzyskując rozkłady prędkości w hydrocyklonie zgodne z wynikami pomiarów Kelsalla. Rozwiązano również równania ruchu dla warstwy granicznej za pomocą metody różnic skończonych wykorzystując metodę Pohlhausen'a. Przedstawiono sposób obliczania sprawności separacji przy założeniu, że wymiary cząstek fazy stałej nie wpływają na ruch płynu.
Ponadto rozwiązano równania ruchu wewnątrz warstwy granicznej uwzględniając wpływ koncentracji fazy stałej na tę warstwę za pomocą lepkości efektywnej oraz dla przepływu składającego się z fazy stałej i ciekłej.

Do rozpowszechnienia się hydrocyklonów w Polsce przyczyniły się prace Battagli [2], [3] i Nowaka [42] w kopalnictwie oraz Bednarskiego [4], [5], [6] - w przemyśle chemicznym i spożywczym.
Battaglia [2] przeprowadził pierwsze w kraju pomiary ciśnień i składowych prędkości w hydrocyklonie i wykazał brak symetrii przepływu spowodowany jednostronnym zasilaniem hydrocyklonu.
Nowak [43] przedstawił zastosowanie hydrocyklonów w przeróbce mechanicznej węgla.
Bednarski [4] przeanalizował kilkadziesiąt wzorów na wydajność hydrocyklonów i kilkanaście wzorów na średnicę podziałową ziarna,

w konkluzji stwierdzając, że żaden z nich nie obejmuje zagadnienia w sposób pełny i jednoznaczny.

7.3. Parametry hydrocyklonu

Parametry hydrocyklonu można podzielić na parametry technologiczne /operacyjne/ i projektowe. Parametry technologiczne nie zależą od wymiarów i proporcji geometrycznych hydrocyklonu a jedynie od procesu technologicznego do jakiego dany hydrocyklon jest stosowany i należą do nich objętościowy strumień masy nadawy oraz jej skład.
Nadawę charakteryzują: koncentracja fazy stałej, wielkość i kształt cząstek stałych, gęstość fazy stałej oraz gęstość i lepkość płynu.
Parametry projektowe zawierają wymiary: wlotu, przelewu, wylewu oraz proporcje geometryczne hydrocyklonu. Efektem prawidłowego doboru parametrów hydrocyklonu powinna być jego praca z maksymalnym objętościowym strumieniem masy nadawy i z najwyższą skutecznością rozdziału faz przy jak najmniejszej stracie ciśnienia.
Do oceny jakości pracy hydrocyklonu służą trzy wskaźniki: skuteczność działania, strata ciśnienia oraz wskaźnik rozdziału faz.

7.3.1. Skuteczność działania hydrocyklonu

Ocena skuteczności działania hydrocyklonów napotyka na znaczne trudności spowodowane różnorodnością zastosowań hydrocyklonów i związaną z tym koniecznością określenia "wydajności" i "jakości" pracy tych urządzeń.
Przykładowo, w hydrocyklonie służącym do klasyfikacji, poza oddzielaniem cząstek o żądanych wielkościach ziaren powinien zacho-

dzić proces separacji z najwyższą możliwą ostrością rozdziału, aby uzyskać produkt o wysokiej jakości. Natomiast hydrocyklon służący do wzbogacania nie tylko powinien usuwać maksymalną ilość fazy stałej z cieczy, lecz również powinien odprowadzać fazę stałą z minimalną ilością cieczy. Istnieje wiele definicji sprawności hydrocyklonu [48] . Proces separacji faz w hydrocyklonie najlepiej charakteryzuje zależność:

$$\eta = \frac{\dot{V}mw}{\dot{V}mn} - \frac{\dot{V}vw}{\dot{V}vn} \qquad /7.21./$$

Gdzie: $\dot{V}mw$ i $\dot{V}mn$ - oznaczają objętości strumienia masy fazy stałej w wylewie i w nadawie

$\dot{V}vw$ i $\dot{V}vn$ - oznaczają objętości strumienia masy fazy ciekłej w wylewie i w nadawie

Iloraz objętości strumienia masy fazy stałej w wylewie do objętości strumienia masy fazy stałej w nadawie określany jest mianem sprawności całkowitej:

$$\eta' = \frac{\dot{V}mw}{\dot{V}mn} \qquad /7.22./$$

Przedstawione powyżej określenia sprawności odnoszą się do całkowitej objętości masy stałej w nadawie. Ponieważ w nadawie z reguły znajdują się ziarna o różnych wielkościach to do oceny skuteczności działania hydrocyklonu niezbędne jest odniesienie sprawności do wielkości ziaren, lub do krzywych składu ziarnowego i wykreślenie na ich podstawie tak zwanych krzywych sprawności. Ponieważ krzywe sprawności są niedogodne w użyciu, ustalono że miarą sprawności hydrocyklonu będzie taka wielkość ziarna d_{50} dla którego prawdopodobieństwo przedostania się do przelewu lub wyle-

wu równe jest 50%. Okazało się, że przebieg krzywych sprawności zachowuje ten sam charakter jeśli odniesie się je nie do średnicy ziarn ale do stosunku $\frac{d}{d_{50}}$. Otrzymane w ten sposób wykresy noszą nazwę zredukowanych krzywych sprawności.

Zestawienia różnych wzorów na średnicę ziarna podziałowego znajdują się w: [4], [5], [14], [43].

Bradley [14] po przeanalizowaniu kilkunastu wzorów podaje ogólną teoretyczną zależność na średnicę ziarna podziałowego:

$$d_{50} = C \left(\frac{D^3 \mu}{\dot{V}_n \cdot \Delta \varrho} \right)^{0.5} \qquad /7.23./$$

7.3.2. Strata ciśnienia w hydrocyklonie

Strata ciśnienia w hydrocyklonie definiowana jest jako różnica ciśnień statycznych dla przekrojów znajdujących się przed wlotem i za przelewem.

Wielkość straty ciśnienia można obliczyć z zależności [14]:

$$\frac{dp}{dr} = \varrho \frac{w^2}{r} \qquad /7.24./$$

Podstawiając wzór na prędkość styczną /7.4./ i całkując równanie w granicach $r = D/2$ i $r = d_p/2$ otrzymuje się:

$$\frac{\Delta p/\varrho}{w_i^2/2} = \frac{\alpha^2}{n} \left[\left(\frac{D}{d_p} \right)^{2n} - 1 \right] \qquad /7.25/$$

Lewa strona powyższego równania nosi nazwę współczynnika strat a wielkość Δp jest różnicą ciśnień między powierzchnią obwodową hydrocyklonu a powierzchnią przelewu.

Tarjan [56] przedstawił powyższe równanie w postaci:

$$H_o - H_p = \frac{H_w}{n} \left[\left(\frac{D/2}{r} \right)^{2n} - 1 \right] \qquad /7.26./$$

Gdzie:

$H_o = \frac{p_o}{\varrho g}$ - oznacza statyczną wysokość ciśnienia na obwodzie hydrocyklonu

$H_p = \frac{p_p}{\varrho g}$ - oznacza statyczną wysokość ciśnienia dla promienia przelewu

$H_w = \frac{w^2}{2g}$ - oznacza dynamiczną wysokość ciśnienia dla prędkości stycznej na obwodzie hydrocyklonu.

7.3.3. Wskaźnik rozdziału w hydrocyklonie

W celu uzyskania najlepszej separacji faz konieczne jest rozdzielenie nadawy na przelew i wylew w pożądanym stosunku objętościowym.

Objętościowe rozdzielenie nadawy na przelew i wylew charakteryzują: wskaźnik rozdziału S

$$S = \frac{\dot{V}w}{\dot{V}p} \qquad /7.27./$$

oraz iloraz wylewu i nadawy R_f

$$R_f = \frac{\dot{V}w}{\dot{V}n} \qquad /7.28./$$

Między tymi wskaźnikami zachodzi związek:

$$R_f = \frac{S}{(1+S)} \qquad /7.29./$$

Wskaźnik rozdziału zależy głównie od średnic przelewu i wylewu oraz od ciśnienia powrotnego.

Według Bradley'a [14] wskaźnik rozdziału S może być wyrażony ogólną zależnością empiryczną:

$$S = C\left(\frac{d_w}{d_p}\right)^x \dot{V}_n^y \qquad /7.30./$$

Natomiast dla ilorazu wylewu i nadawy obowiązuje wzór:

$$1 - R_f = C_1/1 + C_2\left(\frac{d_w}{d_p}\right)^x \qquad /7.31./$$

7.3.4. Średnica hydrocyklonu

Za średnicę hydrocyklonu przyjmuje się średnicę części cylindrycznej. Według Bradley'a [14] dla ustalonego natężenia przepływu obowiązują zależności:

$$d_{50} \sim D^x \qquad /7.32./$$

oraz

$$\Delta p \sim D^y \qquad /7.33./$$

Gdzie $x = 1,36 - 1,52$ i $y = (-3,6) \div (-4,1)$

Natomiast dla ustalonej straty ciśnienia:

$$V_n \sim D^z \qquad /7.34./$$

oraz

$$d_{50} \sim D^x \qquad /7.35./$$

Gdzie $z = 1,8 \div 2,0$ i $x = 0,41 \div 0,5$

W oparciu o przedstawione zależności można stwierdzić, że w hydrocyklonie o mniejszej średnicy będą podlegać separacji ziarna o mniejszych wymiarach przy większej stracie ciśnienia niż w hydrocyklonie o większej średnicy.

7.3.5. Średnice otworów: wlotowego - d_o, przelewu - d_p i wylewu - d_w.

Rozdział faz w hydrocyklonie sterowany jest za pomocą trzech otworów: wlotowego, przelewu i wylewu.
Średnice wlotu i przelewu decydują o sprawności separacji i stracie ciśnienia w hydrocyklonie. Średnica wylewu decyduje o wskaźniku rozdziału.

Otwór wlotowy powinien mieć średnicę zapewniającą uzyskanie maksymalnego iloczynu $\dot{V}_n \cdot \dot{w}_i$ doprowadzanego płynu. Jak wykazały badania [14] istnieje optymalna średnica wlotowa dla każdego hydrocyklonu.

Wielu autorów podaje empirycznie znalezione optymalne średnice wlotu między którymi istnieją znaczne różnice. Jako przeciętne wartości można przyjąć $d_o = \frac{D}{6} \div \frac{D}{7}$ ale nie istnieje jedna optymalna średnica dla różnych zastosowań i wymiarów hydrocyklonów. Bednarski [6] zaleca stosowanie króćców wlotowych o różnych kształtach geometrycznych w zależności od zastosowania hydrocyklonu. Bradley [14] podaje następujące zależności empiryczne określające średnicę otworu wlotowego:

$d_{50} \sim d_o^x$ /7.36/ gdzie $x = 0,6 \div 0,68$

$\Delta p \sim d_o^y$ /7,37/ gdzie $y = (-1,8) \div (-4,0)$

$\dot{V}_n \sim d_o^z$ /7,38/ gdzie $z = 0,9 \div -2,0$

W celu określenia optymalnej średnicy przelewu należy uwzględnić "efekt przecieku" /patrz rys.7.3/ oraz usytuowanie powierzchni zerowych prędkości osiowych. "Efekt przecieku" powoduje przedostawanie się zawiesiny wprost z wlotu hydrocyklonu po górnej ścianie bezpośrednio do przelewu. Jeżeli średnica przelewu jest większa od średnicy przy której występuje maksymalna prędkość styczna to część zawiesiny podlegająca "efektowi przecieku" przedostanie się spowrotem do głównego przepływu i ulegnie separacji. Ponieważ jednak pogorszenie sprawności następuje na skutek przedostawania się do przelewu grubych ziarn, zmniejszenie średnicy przelewu powoduje podniesienie sprawności w stosunku do ziaren drobnych.

Jeżeli średnica przelewu jest większa niż średnica powierzchni zerowych prędkości pionowych to powoduje to zmianę rozkładu prędkości promieniowych i porywanie ziaren do przelewu zanim zostaną one poddane separacji.

Bradley [14] przedstawia szereg zależności na obliczanie optymalnej średnicy przelewu i zaleca przyjęcie $d_p = \frac{D}{7}$. Podaje również zależności Dahlstrom'a i Fontein'a wiążące ze sobą średnicę dolotową i średnicę przelewu $d_p = (1 \div 1,6) \cdot do$ i $d_p = 2 \cdot d_o$

Z reguły wylew hydrocyklonu zaopatrzony jest w zawór regulujący objętościowy strumień masy wylewu. W związku z tym średnica wylewu jest zmienna. Przyjmuje się że wielkość średnicy wylewu powinna wynosić $d_w = \frac{D}{10} \div \frac{D}{5}$. Średnica wylewu ma niewielki wpływ na stratę ciśnienia w hydrocyklonach.

7.3.6. Wysokość przelewu - L_p

Zwiększenie wysokości przelewu powoduje zwiększenie drogi, którą musi pokonać zawiesina poddana działaniu "efektu przecieku" i w związku z tym powoduje powiększenie sprawności separacji grubych frakcji. Z drugiej jednak strony większość drobnych frakcji przedostaje się do przelewu w strumieniu powrotnym płynącym od wierzchołka stożka hydrocyklonu i zwiększenie wysokości przelewu skraca czas separacji tych cząstek co w konsekwencji powoduje spadek sprawności.

Bradley [14] podaje zalecane wysokości przelewu mieszczące się w zakresie $L_p = \frac{D}{2} \div \frac{D}{4}$. Błędnym jest projektowanie hydrocyklonów zakończonych przelewem na wysokości dolnej krawędzi wlotu lub w miejscu łączenia części cylindrycznej hydrocyklonu z częścią stożkową gdyż w obydwu przypadkach powstają dodatkowe straty polegające na przedostawaniu się grubych frakcji do przelewu.

7.4. Metody projektowania hydrocyklonów

W zasadzie możliwe jest zaprojektowanie poprawnie działającego hydrocyklonu na podstawie zależności wiążących średnicę ziarna podziałowego z wymiarami geometrycznymi hydrocyklonu, objętościowym strumieniem masy nadawy oraz stratą ciśnienia.
Jednakże, ze względu na dużą ilość wzorów podawanych przez różnych autorów nie bardzo wiadomo na których z nich należy się oprzeć.

Bednarski [4] , [5] poddał analizie kilkanaście sposobów obliczania wielkości ziarna podziałowego i kilkadziesiąt wzorów okreś-

lających objętościowy strumień masy nadawy i uważa że żaden z nich nie ujmuje zagadnienia w sposób wyczerpujący i ostateczny. Ponadto wyżej wymieniony autor wykazuje, że szereg wywodów poszczególnych autorów wzorów jest niezgodnych z rzeczywistością, a większość z analizowanych wzorów nie nadaje się do żadnych przeliczeń i wprowadzają one niepotrzebny chaos w literaturze dotyczącej problematyki hydrocyklonów.

Firmy specjalizujące się w budowie hydrocyklonów dzięki wieloletniemu doświadczeniu wytwarzają urządzenia o wysokiej jakości ale stosowane przez nie metody projektowania stanowią swego rodzaju tajemnice zawodowe tych firm. Większość opublikowanych metod projektowania hydrocyklonów polega na dobieraniu z odpowiednich nomogramów wymiarów hydrocyklonów w zależności od ich warunków pracy. Powarow [43] przedstawia metodę projektowania hydrocyklonów w oparciu o nomogramy służące do wyznaczania objętościowego strumienia masy nadawy i średnicy ziarna podziałowego na podstawie wymiarów geometrycznych i całkowitej straty ciśnienia.
Ternowskij i inni [55] podają wzory i nomogramy dla wyznaczenia objętościowego strumienia masy nadawy, ale nie uwzględniają w nich średnicy ziarna podziałowego.
Zanker [56] opracował nomogramy na podstawie których wyznacza się średnicę ziarna podziałowego, średnicę części cylindrycznej hydrocyklonu oraz współczynnik przyśpieszenia odśrodkowego.
Bohnet [9] zaleca dobór takich wymiarów geometrycznych hydrocyklonów, aby reprezentujące je współczynniki miały wartości leżące w pobliżu określonej krzywej leżącej na opracowanym w tym celu wykresie.

Trawiński [47] podaje warunki prawidłowej pracy hydrocyklonu w postaci empirycznych wzorów na podstawie których można obliczyć wymiary geometryczne i zdolność rozdzielczą hydrocyklinu, ale nie uwzględniają one lepkości zawiesiny.

Rietema [48] wyznaczył tak zwaną liczbę charakterystyczną hydrocyklonu, określił jej wartość odpowiadającą optymalnym wymiarom geometrycznym hydrocyklonu i na podstawie obliczonej liczby Reynold'sa podaje sposób wyznaczania średnicy hydrocyklonu i objętościowego strumienia masy nadawy /analitycznie, lub za pomocą nomogramu/. Za najbardziej przydatną metodę służącą do projektowania odmulaczy hydrocyklonowych, można uznać półempiryczną metodę Rietemy. Metoda ta, przeznaczona do projektowania hydrocyklonów służących do usuwania ziarn o małych wymiarach jest ścisła i daje jednoznaczne wyniki. W toku obliczeń uwzględnia się lepkość cieczy, co ma istotne znaczenie dla wody sieciowej.

Metoda Powarowa przeznaczona jest dla hydrocyklonów klasyfikujących o dużych wymiarach.

Metoda Trawińskiego ze względu na przybliżone wartości współczynników doświadczalnych daje zbyt szeroki zakres wyników. Metoda Zankera, nie podaje całkowitej straty ciśnienia w hydrocyklonie.

8. Model matematyczny przepływu cieczy i cząstek zanieczyszczeń przez hydrocyklon.

Przepływ cieczy przez hydrocyklon jest przepływem burzliwym w którym jedna składowa prędkości jest znacznie większa od dwóch pozostałych i w zasadzie o trójwymiarowym charakterze, występującym w dość skomplikowanej geometrii. Tego rodzaju przepływ stwarzał duże trudności w jego matematycznym opisie. Równania, opisujące ten przepływ to równanie ciągłości i bilansu pędu. Są to równania różniczkowe cząstkowe typu eliptycznego, nieliniowe i dla przepływu turbuletnego jaki występuje w rzeczywistym hydrocyklonie silnie nieliniowe i sprzężone. Te cechy wykluczają możliwość jakichkolwiek prób rozwiązania analitycznego tego układu równań, a silne ich sprzężenie stwarza niebagatelne trudności w ich numerycznym rozwiązaniu. Prawie wszystkie przepływy w zastosowaniach inżynierskich są przepływami turbulentnymi o charakterze turbulencji izotropowej do modelowania których może być zastosowany model $k-\varepsilon$ [9] . Dla przepływów w hydrocyklonach założenie o izotropowości turbulencji jest nie do przyjęcia ze względu na fakt że składowa prędkości stycznej jest wielokrotnie większa od składowych prędkości osiowej i promieniowej. Tak więc w tym przypadku zastosowano model bardziej złożony niż model $k-\varepsilon$. [11] , [29] . Przepływ w hydrocyklonie ma charakter dwufazowy, ale ze względu na duże trudności opisu i rozwiązania "czysto" dwufazowego przepływu zastosowano model pseudo - dwufazowy przepływu w cyklonach podany przez Boysana [13] .

Model ten stał się bazą przy modelowaniu przepływu cieczy i

cząstek zanieczyszczeń w hydrocyklonach. Opis ruchu cząstek zanieczyszczeń przedstawiono w układzie Lagrange'a ,przy założeniu że ich ruch wywołuje przepływająca w hydrocyklonie faza otaczająca /ciecz/.

W przedstawionym modelu ruchu cząstek zanieczyszczeń, równania opisujące ich ruch są równaniami różniczkowymi zwyczajnymi pierwszego rzędu względem czasu. Obliczenia przeprowadzono metodą różnic skończonych w węzłach siatki różnicowej jaką zastosowano w obliczeniach fazy ciekłej. Następnie poprzez całkowanie prędkości cząstek zanieczyszczeń obliczono tory tych cząstek oraz sprawność gromadzenia zanieczyszczeń. Dopiero w ostatnich latach głównie na skutek szybkiego rozwoju numerycznych technik obliczeniowych oraz budowy coraz to szybszych i pojemniejszych komputerów stało się możliwe kompleksowe modelowanie i rozwiązywanie równań ruchu płynu i fazy stałej w hydrocyklonach.

8.1. Równania podstawowe

Podstawowymi równaniami opisującymi przepływ cieczy przez hydrocyklon są równania ciągłości oraz równania bilansu pędu. Przepływ przez hydrocyklon w sąsiedztwie stycznego wlotu ma charakter trójwymiarowy a dalej staje się w zasadzie przepływem osiowo-symetrycznym - co potwierdzają wyniki doświadczalne. W związku z tym pominięto w przedstawionych równaniach wszystkie pochodne względem współrzędnej-θ co znacznie redukuje trudności obliczeniowe przy niewielkim wpływie na poprawność wyników. Założono, że przepływ ma charakter stacjonarny, a więc człony akumulacji w poniższych równaniach są równe zeru.

Równania dla fazy otaczającej zapisane w nieruchomym, związanym z hydrocyklonem układzie współrzędnych cylindrycznych / z, r, θ / mają następującą postać:

Równanie ciągłości:

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv) = 0 \qquad /8.1./$$

Ogólne równanie bilansu pędu można zapisać w postaci następującego związku:

$$\left\{\begin{matrix}\text{człon}\\ \text{konwek-}\\ \text{cyjny}\end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix}\text{człon}\\ \text{ciśnie-}\\ \text{niowy}\end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix}\text{człon}\\ \text{dyfuzyj-}\\ \text{ny}\end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix}\text{człon}\\ \text{naprę-}\\ \text{żeń tur-}\\ \text{bulentnych}\end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix}\text{człon}\\ \text{sił}\\ \text{maso-}\\ \text{wych}\end{matrix}\right\} \qquad /8.2/$$

Równanie /8.2 / można zapisać w następujących postaciach szczegółowych odpowiednio względem współrzędnych z, r i θ : /kolejne wyrazy w równaniach /8.3/ , /8.4/ i /8.5/ odpowiadają poszczególnym członom równania /8.2/ .

$$u\frac{\partial u}{\partial z} + v\frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\varrho}\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\varrho}\left[\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u}{\partial r}\right)\right] + \qquad /8.3/$$

$$-\left\{\frac{\partial}{\partial z}\overline{u'^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\overline{u'v'}\right)\right\} + \frac{F_z}{\varrho}$$

$$u\frac{\partial v}{\partial z} + v\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{w^2}{r} = -\frac{1}{\varrho}\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\varrho}\left[\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v}{\partial r}\right) - \frac{v}{r^2}\right] + \qquad /8.4/$$

$$-\left\{\frac{\partial}{\partial z}\overline{u'v'} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\overline{v'^2}\right) - \frac{\overline{w'^2}}{r}\right\} + \frac{F_r}{\varrho}$$

$$u\frac{\partial w}{\partial z} + v\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{vw}{r} = 0 + \frac{\mu}{\varrho}\left[\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial w}{\partial r}\right) - \frac{w}{r^2}\right] + \qquad /8.5/$$

$$-\left\{\frac{\partial}{\partial z}\overline{u'w'} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\overline{v'w'}\right) - \frac{\overline{v'w'}}{r}\right\} + \frac{F_\theta}{\varrho}$$

Wielkości u, v, w oraz u', v', w' są wartościami średnimi i pulsacyjnymi składowych prędkości odpowiednio w kierunku z, r i θ . Symbole F_z, F_r i F_θ charakteryzują efekty wzajemnego oddziaływania płynu i cząstek zanieczyszczeń i nie zostały one uwzględnione w przedstawionym programie obliczeniowym. Ponieważ, jak wykazano w punkcie 4 niniejszej pracy zanieczyszczenia wody sieciowej składają się głównie z drobnych ziaren o wielkościach rzędu kilku μm i o masie właściwej około 2,54g/cm^3 [36] tak więc efekty ich wzajemnego oddziaływania mogą być pominięte. Składowe tensora naprężeń burzliwych Reynolds'a /zapisane w nawiasach klamrowych / w równaniach bilansu pędu można obliczyć jeśli do podanego układu równań ciągłości i bilansu pędu dołączy się równania różniczkowe modelujące turbulencję.

8.2. Opis turbulencji

Zastosowany model turbulencji powinien opisywać charakterystyczne cechy przepływu oraz umożliwiać określenie składowych tensora naprężeń burzliwych Reynolds'a występujących w równaniach bilansu pędu w oparciu o znane lub możliwe do obliczenia wielkości.

Przy modelowaniu turbulencji wykorzystano zapis lepkości turbulentnej zgodnie z hipotezą Boussinesq (1877r.) używając w opisie lepkości wirowej - ν_t , która jak wiadomo nie opisuje stanu fizycznego płynu a charakteryzuje przepływ.

W często obecnie stosowanym modelu turbulencji k -ε [29], [52], składowe tensora Reynolds'a związane są z lepkością wirową następującą zależnością przedstawioną w zapisie tensorowym:

$$\overline{u_i' u_j'} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \qquad /8.6/.$$

W równaniu tym $k = \frac{1}{2}\overline{u_i' u_i'}$ jest kinetyczną energią turbulencji a δ_{ij} - jest deltą Kroneckera. Aby obliczyć wartości ν_t w całym przepływie należy rozwiązać równania różniczkowe transportu dla kinetycznej energii turbulencji - k oraz dla dysypacji energii turbulencji - ε.

Lepkość turbulentną ν_t w każdym punkcie pola można następnie obliczyć według zależności:

$$\nu_t = C\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad /8.7/$$

Gdzie stała $C\mu = 0,09$.

Przedstawiony powyżej model nie daje dostatecznego przybliżenia wartości, w szczególności dla składowych $\overline{u'w'}$, $\overline{v'^2}$ i $\overline{w'^2}$ naprężeń Reynoldsa. Nawet modyfikacja równania dysypacji energii turbulencji /poprzez wprowadzenie liczby Richardsona /, [30] nie daje pożądanych efektów w takich przepływach, w których składowa styczna prędkości jest kilka razy większa od pozostałych składowych prędkości [11]. Tak więc, dla silnie zawirowanych przepływów występujących w hydrocyklonach model k -ε powinien być rozszerzony. Istnieją możliwości zapisania różniczkowych cząstkowych równań transportu dla wszystkich składowych naprężeń Reynolds'a jednakże powoduje to duże trudności związane z obliczeniami oraz z ustaleniem wartości stałych w równaniach /stałe C_1' i C_2' /.

Boysan et al [11], [13] proponują dla tego typu przepływów jakie występują w hydrocyklonach zastosowanie 4-równaniowego modelu turbulencji dla: k -ε - $\overline{v'w'}$ - ($\overline{v'^2}$ - $\overline{w'^2}$). W niniejszej pracy zastosowano ten model turbulencji.

Równania dla k, ε mają wtedy ogólną postać:

$$\left\{\begin{matrix}\text{człon}\\ \text{konwekcji}\\ \text{kinetycznej}\\ \text{energii tur-}\\ \text{bulencji lub}\\ \text{jej dysypacji}\end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix}\text{człon}\\ \text{dyfuzyjny}\\ \text{kinetycznej}\\ \text{energii tur-}\\ \text{bulencji lub}\\ \text{jej dysypacji}\end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix}\text{człon}\\ \text{produk-}\\ \text{cji}\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\text{człon}\\ \text{dysypa-}\\ \text{cji}\end{matrix}\right\} \qquad /8.8/$$

Ogólne równanie /8.8/ można zapisać w postaci:

$$u\frac{\partial k}{\partial z} + v\frac{\partial k}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t \frac{\partial k}{\partial z}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\,\nu_t \frac{\partial k}{\partial r}\right) + P - \varepsilon \qquad /8.9/$$

$$u\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + v\frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right) + C_{\varepsilon 1}P\frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad /8.10/$$

Gdzie P - produkcję energii turbulencji można przedstawić zależnością:

$$P = -\overline{u'^2}\frac{\partial u}{\partial z} - \overline{v'^2}\frac{\partial v}{\partial r} - \overline{w'^2}\frac{v}{r} - \overline{u'w'}\frac{\partial w}{\partial z} - \overline{u'v'}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial r}\right) - \overline{v'w'}\left(\frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r}\right) \qquad /8.11/$$

Stałe występujące w równaniu /8.10/ mają następujące wartości[13]:

$$C_{\varepsilon 1} = 1{,}44, \qquad C_{\varepsilon 2} = 1{,}92, \qquad \sigma_\varepsilon = 1{,}3 .$$

Równania dla $\overline{v'w'}$ oraz $\overline{v'^2} - \overline{w'^2}$ mają postać:

$$u\frac{\partial(\overline{v'w'})}{\partial z} + v\frac{\partial(\overline{v'w'})}{\partial r} + (\overline{v'^2} + \overline{w'^2})\frac{w}{r} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t\frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\,\nu_t\frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial r}\right) +$$

$$/8.12/$$

$$-4\frac{\nu_t}{r^2}\overline{v'w'} + C_1\frac{\varepsilon}{k}(\overline{v'w'}) - (1-C_2)\left[\overline{v'^2}\frac{\partial w}{\partial r} - \overline{w'^2}\frac{w}{r} + \overline{u'v'}\frac{\partial w}{\partial z} - \overline{v'w'}\frac{\partial u}{\partial z} - \overline{u'w'}\frac{\partial v}{\partial z}\right]$$

$$u\frac{\partial(\overline{v'^2}-\overline{w'^2})}{\partial z}+v\frac{\partial(\overline{v'^2}-\overline{w'^2})}{\partial r}-4\overline{v'w'}\frac{w}{r}=\frac{\partial}{\partial z}\left(\nu_t\frac{\partial(\overline{v'^2}-\overline{w'^2})}{\partial z}\right)+ \qquad /8.13/$$

$$+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\nu_t\frac{\partial(\overline{v'^2}-\overline{w'^2})}{\partial r}\right)+4\frac{\nu_t}{r^2}(\overline{v'^2}-\overline{w'^2})+C_1\frac{\varepsilon}{k}(\overline{v'^2}-\overline{w'^2})+$$

$$+2(1-C_2)\left[\overline{v'w'}\left(\frac{\partial w}{\partial r}+\frac{w}{r}\right)-\overline{u'v'}\frac{\partial v}{\partial z}-\overline{v'^2}\frac{\partial v}{\partial r}+\overline{u'w'}\frac{\partial w}{\partial z}+\overline{w'^2}\frac{v}{r}\right]$$

Stałe C_1 i C_2 występujące w równaniach /8.12/ i /8.13/ mają wartości $C_1 = 2,5$; $C_2 = 0,55$ [11].

Pozostałe składowe tensora naprężeń Reynolds'a to znaczy $\overline{u'^2}$, $\overline{u'v'}$ oraz $\overline{u'w'}$ obliczane są z równań przedstawionych poniżej. W równaniach tych wykorzystano zależności podane przez Rodi'ego [49].

$$\overline{u'^2}=\frac{1}{1+2\alpha\frac{k}{\varepsilon}\frac{\partial u}{\partial z}}\left[\frac{2}{3}k\left(1-\alpha\frac{P}{\varepsilon}\right)-2\alpha\frac{k}{\varepsilon}(\overline{u'v'})\frac{\partial u}{\partial r}\right] \qquad /8.14/$$

$$\left[1-\alpha\frac{k}{\varepsilon}\frac{v}{r}-2(a_1+a_2)\alpha^2\frac{k^2}{\varepsilon^2}\frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial u}{\partial r}\right](\overline{u'w'})=-\frac{k^2}{\varepsilon}\left[\frac{2}{3}\left(1-\alpha\frac{P}{\varepsilon}\right)\left(a_2\frac{\partial u}{\partial r}+a_1\frac{\partial v}{\partial z}\right)\alpha+\right. \qquad /8.15/$$

$$\left.+2a_2\alpha(\alpha+\lambda)\frac{\overline{v'w'}\frac{w}{r}}{\varepsilon}\frac{\partial u}{\partial r}\right]+(\alpha+\lambda)\frac{k}{\varepsilon}(\overline{u'w'})\frac{w}{r}$$

$$\left[1-\alpha\frac{k}{\varepsilon}\frac{\partial v}{\partial r}\right](\overline{u'w'})=-\left[\frac{2}{3}\alpha\left(1-\alpha\frac{P}{\varepsilon}\right)a_1-2a_3\alpha^2\frac{\overline{u'v'}\frac{\partial u}{\partial r}}{\varepsilon}\right]\frac{k}{\varepsilon}\frac{\partial w}{\partial z}+ \qquad /8.16/$$

$$-\alpha\frac{k}{\varepsilon}\overline{v'w'}\frac{\partial u}{\partial r}-\alpha\frac{k}{\varepsilon}\overline{v'w'}\frac{\partial u}{\partial r}-\left(\alpha\frac{\partial w}{\partial r}+\lambda\frac{w}{r}\right)\frac{k}{\varepsilon}\overline{u'w'}$$

Gdzie wielkości a_1, a_2, a_3 oznaczają:

$$a_1=\frac{1}{1+2\alpha\frac{k}{\varepsilon}\frac{\partial u}{\partial z}} \qquad /8.17/$$

$$a_2 = \frac{1}{1+2\alpha\frac{k}{\varepsilon}\frac{\partial v}{\partial r}} \qquad /8.18/$$

$$a_3 = \frac{1}{1+2\alpha\frac{k}{\varepsilon}\frac{v}{r}} \qquad /8.19/$$

Natomiast współczynniki α i λ wyznaczone są przez:

$$\alpha = \frac{1 - C'_2}{\frac{P}{\varepsilon} - 1 + C'_1} \qquad /8.20/$$

$$\lambda = \frac{C'_3}{\frac{P}{\varepsilon'} 1 + C'_1} \qquad /8.21/$$

Stała C'_3 w wyrażeniu na λ ma wartość zawartą w przedziale $<0,1>$, przy czym dla przepływu przez hydrocyklon wartość C'_3 jest bliska zeru [13] .

Przedstawione równanie ciągłości /8.1/, bilansu pędu /8.3/, /8.4/, /8.5/ oraz równania: kinetycznej energii turbulencji /8.9/, dyssypacji energii turbulencji /8.10/ wraz z równaniami na składowe tensora naprężeń turbulentnych Reynoldsa /8.12/, /8.13/, /8.14/, /8.15/, /8.16/ tworzą zamknięty, sprzężony układ ośmiu równań różniczkowych cząstkowych oraz trzech równań uzupełniających algebraicznych.

Układ ten opisuje zachowanie się cieczy przepływającej przez hydrocyklon i pozwala obliczyć wszystkie wielkości polowe występujące w przepływie to znaczy: 3 składowe prędkości u,v,w, ciśnienie -p oraz siedem wielkości turbulencji: k, ε, $\overline{v'w'}$, $\overline{v'^2}-\overline{w'^2}$, $\overline{u'^2}$, $\overline{u'v'}$, $\overline{u'w'}$.

8.3. Opis ruchu cząstek fazy stałej

Opisu ruchu cząstek fazy stałej dokonano w ruchomym układzie Lagrange'a. Ruch tych cząstek wywoływany jest ruchem cieczy. Zakłada się, że nie ma wzajemnego oddziaływania między cząstkami oraz że cząstki fazy stałej nie wpływają na ruch cieczy, a w szczególności na turbulencję.

W wyniku obliczeń określa się tory cząstek dla określonych klas wymiarowych ziaren i na tej podstawie można stwierdzić, czy dana cząstka została zatrzymana w stożkowej części hydrocyklonu, czy też opuści to urządzenie wraz z fazą otaczającą przez przelew. Tak więc, dla określonej ilości klas, wielkości i gęstości cząstek zanieczyszczeń na wlocie można określić ilość cząstek wychwyconych a tym samym obliczyć całkowitą sprawność hydrocyklonu. W programie obliczeniowym wykorzystano opis ruchu cząstek i ich gromadzenia podany przez Boysana et al. [10] , [13]

Przy pominięciu wszystkich sił zewnętrznych działających na ziarno za wyjątkiem sił oporu ośrodka /cieczy/, równania ruchu cząstek dla danej klasy wielkościowej "i" przedstawione w układzie cylindrycznym mają następującą postać:

$$\frac{du_{p,i}}{dt} = -\gamma(u_{p,i} - u - u') \qquad /8.22/$$

$$\frac{dv_{p,i}}{dt} = \frac{w_{p,i}}{r_i} - \gamma(v_{p,i} - v - v') \qquad /8.23/$$

$$\frac{dw_{p,i}}{dt} = -\frac{v_{p,i}\, w_{p,i}}{r_i} - \gamma(w_{p,i} - w - w') \qquad /8.24/$$

Gdzie człon oporu γ można wyrazić następującą zależnością:

$$\gamma = \left(\frac{18\mu}{\varrho_1 D_{p,i}^2} \right) \left(\frac{C_D Re}{24} \right) \qquad /8.25/$$

a względna liczba Reynolds'a $Re = \varrho D_{p,i}(u_{p,i} - u)/\mu$ /8.26/

Powyższe równania uzupełniają równania torów cząstek:

$$\frac{dz_i}{dt} = u_{p,i} \qquad /8.27/$$

$$\frac{dr_i}{dt} = v_{p,i} \qquad /8.28/$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \frac{w_{p,i}}{r_i} \qquad /8.29/$$

Współczynnik oporu C_D wyrażony w funkcji względnej liczby Reynoldsa ma postać:

$$C_D = a_1' + \frac{a_2'}{Re} + \frac{a_3'}{Re^2} \qquad /8.30/$$

Wartości współczynników a' dla odpowiednich zakresów Re według Morsi i Aleksander [42] zestawiono w Tablicy 8.1.

Tablica 8.1. Współczynniki oporu C_D dla poszczególnych zakresów liczb Reynoldsa.

Zakres liczb Reynoldsa	a_1'	a_2'	a_3'
$0,1 < Re < 1,0$	3,69	22,73	0,0903
$1,0 < Re < 10$	1,222	29,17	- 3,889
$10,0 < Re < 1000,0$	0,6167	46,5	- 116,7
$1000,0 < Re$	0,3644	98,33	- 2778,0

Stochastyczne podejście zastosowano dla określenia wpływu pulsacyjnych składowych prędkości na tory ruchu ziaren. Wpływ ten istnieje jedynie w ciągu czasu "życia" wiru.
Przyjęto rozkład prawdopodobieństwa według krzywej Gaussa, a więc:

$$u' = \phi\sqrt{\overline{u'^2}} \quad , \quad v' = \phi\sqrt{\overline{v'^2}} \quad , \quad w' = \phi\sqrt{\overline{w'^2}} \qquad /8.31/$$

Gdzie ϕ jest liczbą losową generowaną według rozkładu normalnego.
Czas życia wiru obliczyć można z zależności [13] :

$$\tau = 0{,}16\,\frac{k}{\varepsilon} \quad . \qquad /8.32/$$

8.4. Warunki brzegowe

Ze względu na eliptyczną naturę równań zachowania masy i pędu całkowity opis przepływu wymaga wyszczególnienia warunków brzegowych na wszystkich granicach pola przepływu.
Na wlocie do hydrocyklonu podane są: wielkość oraz rozkład równomierny prędkości. W osi hydrocyklonu przyjęto zerowy gradient dla prędkości u, kinetycznej energii turbulencji k oraz dysypacji energii turbulencji ε, natomiast dla pozostałych zmiennych v, w, $\overline{v'w'}$, $(\overline{v'} - \overline{w'^2})$ ze względu na symetrię układu przyjęto ich wartości równe zeru.

W przekroju wylotowym przelewu przyjęto znikanie osiowych gradientów wszystkich zmiennych. W pobliżu ścian podany w punkcie 8.2. model turbulencji nie może być zastosowany ponieważ lepkość burzliwa jest w tym obszarze równa bądź mniejsza od lepkości cieczy, a efekty laminarnego przepływu nie mogą być pominięte. W związku z tym w omawianym obszarze zastosowano funkcje przyścienne.

Całkowite styczne naprężenia na ścianie hydrocyklonu można opisać zależnością [13]:

$$\tau_w = -\frac{\rho U}{\left\{ \frac{1}{\varkappa} \ln\left[E \frac{(\tau_w/\rho)^{1/2}}{\nu} y_w \right] \right\}^2} \qquad /8.33/$$

Gdzie U jest prędkością w odległości y_w od ściany hyfrocyklonu. Wartości naprężeń Reynoldsa na ścianie otrzymuje się poprzez rozłożenie naprężeń stycznych τ_w na składniki. Korzystając z założenia o lokalnej równowadze kinetycznej energii turbulencji i dysypacji energii turbulencji, równania przedstawiające k_{nw} i ε_{nw} można przedstawić w postaci:

$$k_{nw} = \frac{\tau_w}{\rho C_\mu^{1/2}} \qquad /8.34/$$

$$\varepsilon_{nw} = \frac{k_{nw}^{3/2} C_\mu^{3/4}}{\varkappa y_w} \qquad /8.35/$$

Gdzie indeksy "nw" oznaczają wartości w pobliżu ściany a nie na samej ścianie. Stałe $\varkappa$ i E wynoszą [13] : $\varkappa = 0,4187$; $E = 9,793$.

Równania ruchu dla cząstek zanieczyszczeń są równaniami różniczkowymi zwyczajnymi i wymagają jedynie warunku początkowego.

9. Program numeryczny " HCYKLON "

Stosowane są obecnie dwie metody numerycznych rozwiązań równań eliptycznych przepływów - w sformułowaniu funkcji prądu - wirowość oraz w sformułowaniu ciśnienie - prędkości [31] . Podczas gdy pierwsza z metod polega na eliminacji kłopotliwych wielkości ciśnień /za cenę trudności związanych z równaniem wirowości/ druga z nich o nazwie "SIMPLE" /skrót od "semi-implicit method for pressure linked equations" /zajmuje się wprost znalezieniem wielkości niewiadomych.

Metoda "SIMPLE" jest nowocześniejsza i posiada szereg cech korzystniejszych niż metoda funkcja prądu-wirowość i została ona w udoskonalonej formie w postaci algorytmu "SIMPLER" zastosowana przy rozwiązywaniu równań w programie "HCYKLON".

9.1. Technika rozwiązywania równań

Równania Reynoldsa zachowania masy, momentu oraz równania kinetycznej energii turbulencji - k, dysypacji kinetycznej energii turbulencji - ε oraz wielkości $\overline{v'w'}$ i $(\overline{v'}^2 - \overline{w'}^2)$ przedstawione w punkcie 8 niniejszej pracy mają podobną formę i zawierają człony konwekcyjne, dyfuzyjne oraz źródłowe. Podobieństwo istniejące między równaniami pozwala zapisać je w ogólnej postaci [31] :

$$\frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial z}(\varrho u r\phi) + \frac{\partial}{\partial r}(\varrho v r\phi) - \frac{\partial}{\partial z}\left(r\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial z}\right) - \frac{\partial}{\partial r}\left(r\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial r}\right)\right] = S_\phi \qquad /9.1/$$

Przyjmując: $\phi = 1$, $\Gamma_\phi = 0$ i $S_\phi = 0$ otrzymuje się równanie ciągłości. Podstawiając: $\phi = u$; $\phi = v$, $\phi = w$, $\phi = k$, $\phi = \varepsilon$, $\phi = \overline{v'w'}$ i $\phi = \overline{v'}^2 - \overline{w'}^2$; przyjmując wielkości Γ_ϕ oraz dobierając od-

powiednie wartości członów źródłowych S_ϕ otrzymuje się pozostałe równania.

Wzajemne powiązania między równaniami powodują wysoki stopień nieliniowości układu równań co stwarza trudności w uzyskaniu rozwiązania. Powiązania między równaniami zawierającymi składowe prędkości są szczególnego rodzaju. Każde z nich zawiera nieznany gradient ciśnienia a ponadto składowe prędkości są dodatkowo powiązane przez równanie ciągłości, w którym ciśnienie nie występuje. Procedura rozwiązania polega na uwzględnieniu wzajemnych powiązań i zapewnieniu sukcesywnego dopasowywania poszczególnych zmiennych aż do uzyskania zbieżności. Do rozwiązywania równań zastosowano metodę różnic skończonych, gdzie zmiennymi zależnymi są składowe prędkości i ciśnienie. Wartości ciśnień są obliczane z kombinacji równania ciągłości i równań momentów co daje w wyniku nową formę równania w postaci równania Poisson'a dla ciśnienia. Dla każdej iteracji od pierwszego przybliżenia wartości u, v, w i p następują sukcesywne korekty. Obliczane są wszystkie wielkości polowe dla obszaru ograniczonego ścianami hydrocyklonu, przy czym obszar ten jest podzielony siatką prostokątną w kierunku promieniowym i osiowym. Wielkości obliczane magazynowane są w punktach znajdujących się w środku między węzłami siatki.

Do rozwiązania wynikowego układu równań różnicowych / algebraicznych/ zastosowano technikę relaksacji "linia za linią" /"line-by-line relaxation technique"/ z wykorzystaniem algorytmu dla trójdiagonalnej macierzy "TDMA" /"tri-diagonal matrix algorithm /

9.2. Opis programu

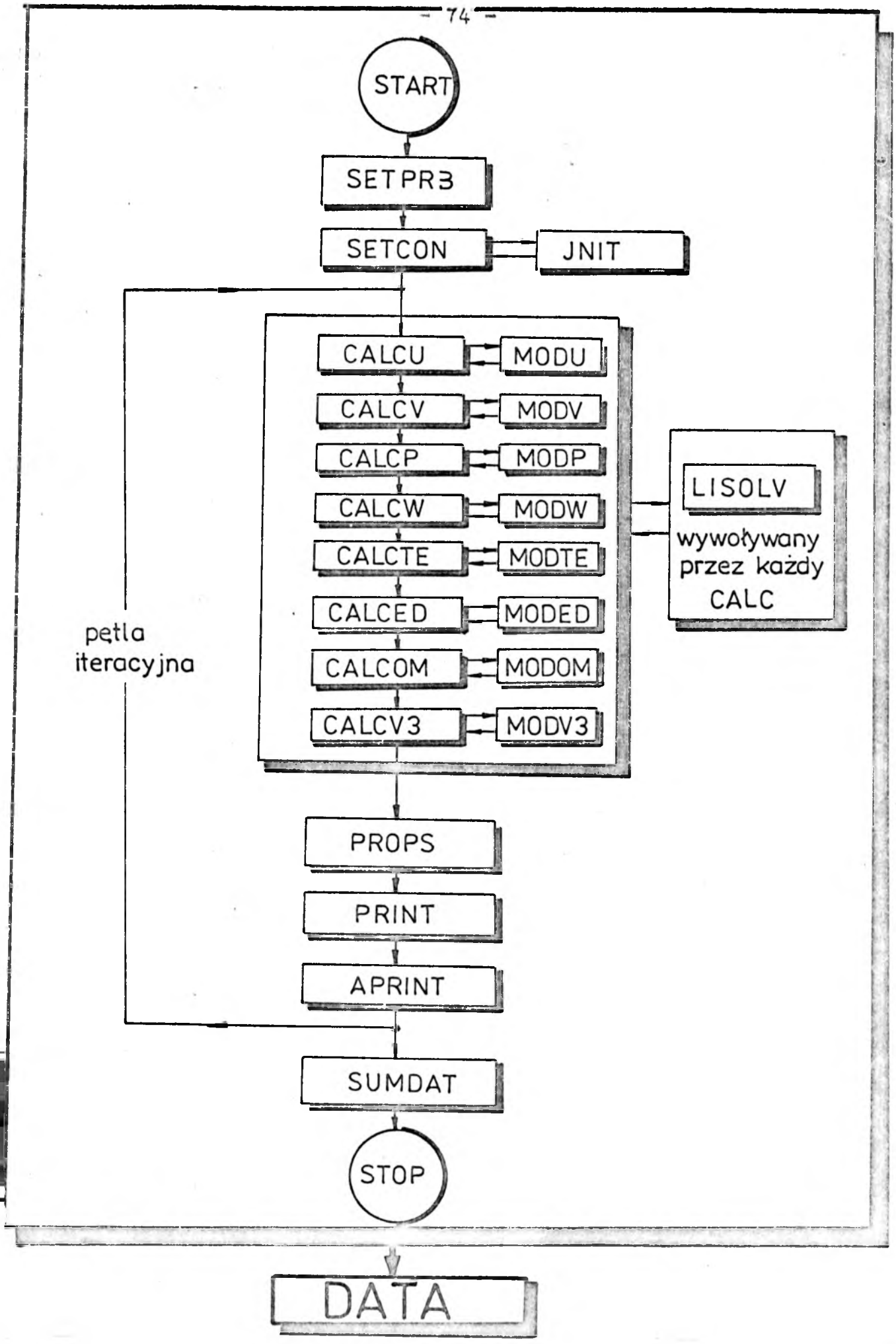
Program "HCYKLON" powstał na bazie programu numerycznego "SPRINT-4" opracowanego przez Boysana at al [10], [11], [12], [13] dla przepływu przez cyklony. Program został napisany w języku Fortran IV i składa się z segmentu głównego i 31 podprogramów, co w sumie stanowi około 3500 linii. Cały program zajmuje około 350 kB.

Dla szczegółowych obliczeń przyjęto siatkę 20 x 32 węzły odpowiednio w kierunku osiowym i promieniowym. Dla osiągnięcia zadowalającej zbieżności przy obliczaniu ruchu fazy otaczającej liczba iteracji dochodzi do 1000. W wyniku tego, czasy obliczeń są stosunkowo długie, równie długie są czasy w przypadku obliczania torów cząstek i sprawności hydrocyklonu. W związku z tym obliczenia realizowane są w dwóch etapach. W pierwszym obliczane są wszystkie wielkości charakteryzujące ruch fazy otaczającej, a wielkości wynikowe niezbędne do obliczania torów cząstek przechowywane są w założonym zbiorze danych do drugiego etapu. W drugim etapie obliczane są tory cząstek oraz sprawność całkowita. Program numeryczny, a w zasadzie dwa programy "POLA" i "SPRAW" składają się odpowiednio: program pierwszy z segmentu głównego /sterującego/ i 24 podprogramów, a program drugi z segmentu głównego i 8 podprogramów. Po każdorazowym zakończeniu obliczeń programu pierwszego zakładano zbiór danych Data, gdzie przechowywano wielkości obliczone. Zbiór Data dołączano z kolei do programu drugiego w trakcie jego realizacji. Schemat funkcyjny programu przedstawiono na rysunkach.

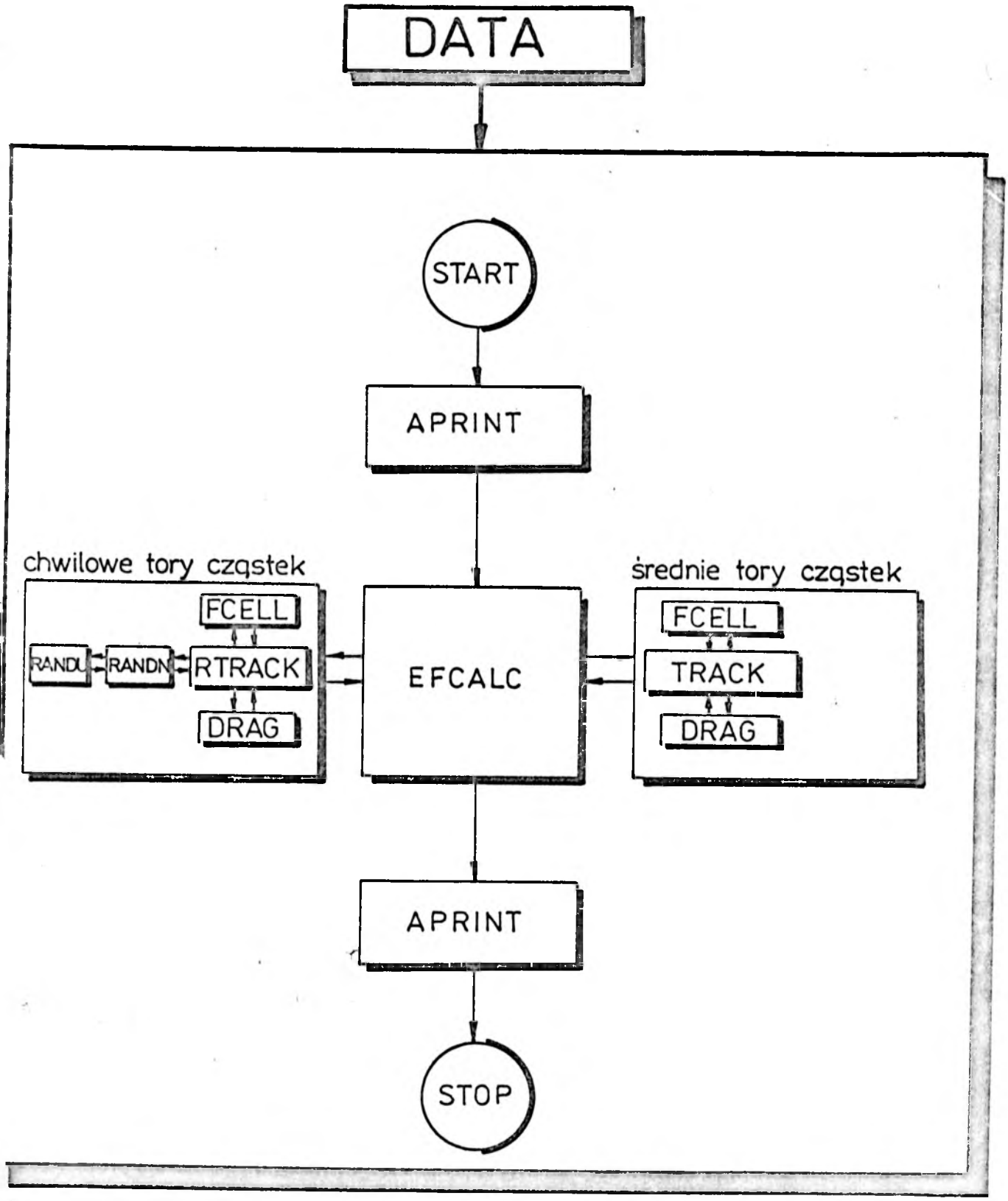
Na rysunku 9.1. przedstawiono schemat pierwszego etapu progra-

mu - "POLA" w którym obliczane są wielkości polowe to znaczy składowe prędkości u,v,w oraz ciśnienie -p.

Na rysunku 9.2. przedstawiono schemat drugiego etapu programu - "SPRAW" w którym obliczane są tory cząstek fazy stałej dla poszczególnych klas wielkościowych ziaren oraz sprawność całkowita hydrocyklonu.



Rys.9.1. Schemat funkcyjny programu "HCYKLON" - program "TOLM"



Rys.9.2. Schemat funkcyjny programu "HCYKLON" - program "SPRAWNOŚĆ"

Opis podprogramów programu "POLA"

MAIN - Segment kontrolujący i sterujący przebiegiem obliczeń całego programu. Zajmuje się wyprowadzeniem wielkości wejściowych do programu oraz wielkości końcowych /obliczanych/oraz wydrukami kontrolnymi. Oblicza niektóre wielkości początkowe i zakłada zbiór danych potrzebnych do obliczania sprawności hydrocyklonu. Pętla iteracyjna ma za zadanie uaktualnienie głównych zmiennych.

SETPRB - Definiuje problem który jest przedmiotem rozwiązania. Zadaje geometrię hydrocyklonu, siatkę różnic skończonych, rodzaj wlotu i wielkości wlotowych do hydrocyklonu, a także parametry materiałowe /lepkość, gęstość / oraz parametry rozwiązania /współczynniki podrelaksacji/.

SETCON - Definiuje pewne wielkości stałe związane z geometrią hydrocyklonu. Segment ten wywołuje podprogram INIT.

INIT - Oblicza szereg wielkości geometrycznych hydrocyklonu związanych ze strukturą siatki różnicowej oraz nadaje wartości początkowe wszystkim zmiennym /w większości przypadków wartości zerowe /.

CALCU, CALCV - Obliczają odpowiednie współczynniki w równaniach różnicowych dla prędkości osiowej u* /podprogram CALCU / oraz prędkości promieniowej v* /podprogram CALCV /. W poszczególnych podprogramach wywoływane są podprogramy modyfikujące, odpowiednio MODU i MODV , których zadaniem jest modyfikacja wartości współczynników lub zmiennych w warstwie granicznej /w pobliżu ścian/ oraz

podprogram LISOLV dla całego pola zmiennych w celu obliczenia nowych wartości dla pól u^* i v^* .

CALCP - Oblicza odpowiednie współczynniki w równaniu różnicowym na poprawkę ciśnienia p' . W segmencie tym wywoływany jest podprogram modyfikujący wartości w warstwie granicznej MODP oraz podprogram LISOLV w celu uzyskania pola wartości p' . Podprogram CALCP oblicza następnie skorygowane wartości prędkości -u i-v oraz ciśnienia - p.

CALCW
CALCTE
CALCED
CALCOM
CALCV3

Obliczają współczynniki w równaniach różnicowych odpowiednio: dla prędkości stycznej -w /podprogram CALCW/, kinetycznej energii turbulencji -k /TE/ /podprogram CALCTE/, dysypacji energii turbulencji - ε /ED/ /podprogram CALCED/, turbulentnych naprężeń stycznych - $\overline{v'w'}$ /OM//podprogram CALCOM/ i różnicy turbulentnych naprężeń normalnych -$(\overline{v'}^2 - \overline{w'}^2)$ /VS3/ /podprogram CALCV3/. W poszczególnych segmentach wywoływane są odpowiednie podprogramy modyfikujące wartości w warstwie granicznej, kolejno MODW, MODTE, MODED, MODOM i MODV3 a także podprogram LISOLV do obliczenia pól kolejnych zmiennych.

MODU
MODV
MODP
MODW
MODTE
MODED
MODOM
MODV3

Zadaniem tych podprogramów jest modyfikacja wartości współczynników w odpowiednich równaniach różnicowych lub zmiennych w warstwie granicznej /w pobliżu ścian/ to znaczy w tych rejonach obszaru obliczeń gdzie korzystano z funkcji przyściennych.

LISOLV - Oblicza nowe pola dla wartości poszczególnych zmiennych wykorzystując algorytm trójdiagonalnych macierzy /TDMA/ dla wszystkich linii siatki różnicowej w kierunku promieniowym kolejno od lewej do prawej strony w obszarze całkowania.

PROPS - Oblicza nowe wartości parametrów materiałowych uwzględniając obliczone poprzednie wartości lepkości burzliwych.

PRINT - Zajmuje się wydrukiem całych pól wartości poszczególnych zmiennych według standartowego formatu na drukarce wierszowej.

APRINT - Wykonuje skrócony wydruk pól wartości poszczególnych zmiennych.

SUMDAT - Wykonuje wydruk najważniejszych danych do obliczeń hydrocyklonu oraz całkowitego spadku ciśnienia.

Podprogram DATA stanowi zbiór danych, czyli wielkości obliczonych z programu POLA, które są niezbędne do obliczeń sprawności gromadzenia cząstek fazy stałej w programie SPRAW.

Opis podprogramów programu "SPRAW":

MAIN - Steruje i kontroluje przebiegiem obliczeń, wykonuje wydruk wielkości wejściowych do programu /w tym skrócony wydruk danych ze zbioru danych DATA/ oraz wielkości końcowych /obliczonych/ i wydruki kontrolne.

APRINT - Dokonuje skróconego /kontrolnego/ wydruku pól wartości poszczególnych zmiennych ze zbioru danych DATA .

EFCALC - Steruje i kontroluje przebieg obliczeń sprawności gromadzenia cząstek fazy stałej /sprawności całkowitej i sprawności frakcyjnej/ w hydrocyklonie.

Segment EFCALC wywołuje podprogram TRAC - jeżeli obliczane są tylko średnie tory cząstek, lub RTRAC - gdy obliczane są chwilowe tory cząstek / z uwzględnieniem turbulentnych fluktuacji na tory cząstek/.

TRACK - Oblicza średnie tory cząstek fazy stałej dla poszczególnych klas ziarnowych. Segment ten wywołuje podprogramy: FCELL - którego zadaniem jest ustalenie komórki w której znajduje się śledzona cząstka, oraz podprogramu DRAG- który oblicza wielkość współczynnika oporu hydrodynamicznego w funkcji liczby Reynoldsa.

RTRACK - Oblicza chwilowe tory cząstek, z uwzględnieniem efektów turbulentnych fluktuacji na tory cząstek dla poszczególnych klas ziarnowych. Analogicznie jak w programie TRACK segment ten wywołuje podprogramy FCELL i DRAG a ponadto podprogramy do generowania liczb losowych z przedziału /0,1/ wstępnie o rozkładzie równomiernym - RANDU, następnie zaś o rozkładzie normalnym - RANDN.

FCELL - Zajmuje się poszukiwaniem komórki w której aktualnie znajduje się śledzona cząstka.

DRAG - Zajmuje się obliczaniem wielkości współczynnika oporu hydrodynamicznego cząstki w zależności od wielkości liczby Reynoldsa według [42] .

RANDU - Generuje liczby losowe o rozkładzie równomiernym z przedziału /0,1/.

RANDN - Generuje liczby losowe o rozkładzie normalnym. W segmencie tym wywoływany jest podprogram RANDU.

Kompletny listing programu "HCYKLON" znajduje się w archiwum autora.

10. Wyniki obliczeń numerycznych

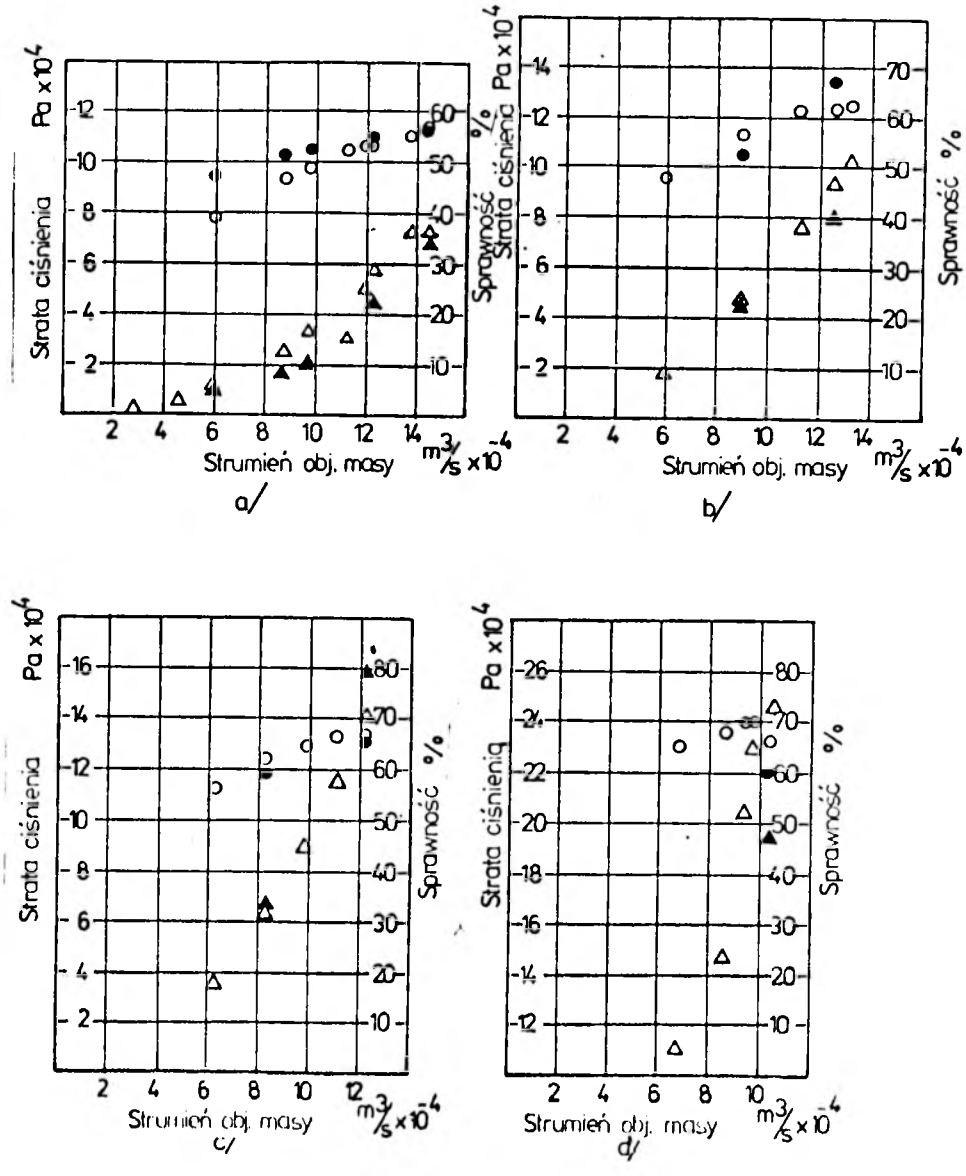
Obliczenia przeprowadzono na komputerze R-32 w systemie TSO oraz na mikrokomputerze IBM-PC/XT w języku PROFESSIONAL FORTRAN. Przy obliczeniach wielkości polowych, dla uzyskania zbieżności programu przyjmowano różne wartości współczynników podrelaksacji oraz różne ilości pętli wewnętrznych. Wymagana ilość iteracji w celu osiągnięcia zbieżności /przy wartości residuum dla prędkości - w poniżej 0,001 / wahała się od około 150 do 800 w zależności od obliczanego przypadku. Ze względu na niewielki wzrost dokładności obliczeń przy dużej liczbie iteracji /na przykład WYNIK.A31 dla którego całkowita strata ciśnienia wyniosła $\Delta p = 2{,}10 \times 10^4$ Pa przy 259 iteracjach oraz dla tego samego przypadku WYNIK.AA31 dla którego $\Delta p = 2{,}37 \times 10^4$ Pa przy 812 iteracjach/, zdecydowano że dla potrzeb inżynierskich wystarczą obliczenia skrócone, które wykonano przy mniejszej liczbie iteracji. Czas obliczania jednej iteracji wszystkich wielkości polowych : prędkości-u, v, w, ciśnienia-p, oraz wielkości turbulencji- k, ε, $\overline{v'w'}$, $\overline{v'^2} - \overline{w'^2}$, $\overline{u'^2}$, $\overline{u'v'}$, $\overline{u'w'}$ wynosił około 12 sec. Wykonano obliczenia wielkości polowych i sprawności dla 10 przypadków, w tym dwukrotnie obliczono wielkości polowe przy większej liczbie iteracji - WYNIK.AA31 i WYNIK.AA51.

Ponieważ celem obliczeń numerycznych była weryfikacja poprawności obliczeń, wykonano je dla identycznych wymiarów geometrycznych hydrocyklonu oraz wielkości fizycznych jak w badaniach eksperymentalnych /przedstawionych w punkcie 11 niniejszej pracy/, aby możliwe było porównanie wyników obliczeń z eksperymentem. Skrócone wyniki obliczeń przedstawiono w Tablicy 10.1.

Tablica 10.1. Zestawienie wyników obliczeń numerycznych wielkości polowych i sprawności hydrocyklonu.

Lp.	Symbol wyniku	Objętościowy strumień masy nadawy	Szerokość dyszy zasilającej	Całkowita liczba iteracji	Całkowita strata ciśnienia	Sprawność
		V_n	b		Δp	η
		$m^3/s x 10^4$	mm		$Pa x 10^{-4}$	%
1	2	3	4	5	6	7
1	A11/A12	14,47	17	135	6,89	56,51
2	A21/A22	12,30	17	160	4,58	55,24
3	A31/A32	9,80	17	259	2,10	52,70
4	AA31/	9,80	17	812	2,37	-
5	A41/A42	9,78	17	270	1,66	51,43
6	A51/A52	5,93	17	133	1,04	47,62
7	AA51/	5,93	17	455	0,808	-
8	B11/B12	12,61	10	250	8,08	67,30
9	B21/B22	9,03	10	170	4,57	52,70
10	C11/C12	12,30	6,5	200	15,9	65,40
11	C21/C22	8,44	6,5	250	6,66	59,05
12	D11/D12	10,47	3,0	433	19,4	59,68

Wyniki obliczeń numerycznych w postaci graficznej znajdują się na rysunku 10.1 a, b, c, d wraz z wynikami eksperymentalnymi. Kompletne wydruki wyników obliczeń znajdują się w archiwum autora.



Rys.10.1. Eksperymentalne - O Δ i teoretyczne - ● ▲ wartości straty ciśnienia-Δ ▲ oraz sprawności-O ● dla hydrocyklonu o szerokości dyszy zasilającej: a/ 17 mm, b/ 10 mm, c/ 6,5 mm, d/ 3 mm.

11. Badania eksperymentalne modelu hydrocyklonu

Celem badań była weryfikacja obliczeń numerycznych programu "HCYKLON" przedstawionych w punkcie 10 niniejszej pracy. W ramach badań określono skuteczności oczyszczania wody oraz całkowite straty ciśnienia dla hydrocyklonu przy różnych objętościowych strumieniach masy nadawy i przy różnych przekrojach wlotowych dla ustalonej długości części walcowej hydrocyklonu.

11.1. Opis modelu hydrocyklonu

Hydrocyklon, którego schemat przedstawiony jest na rys.11.1 składa się z pionowego cylindra we wnętrzu którego umieszczony jest stożek. Stożek oparty jest na trzech wkręcanych prętach dystansowych co umożliwia regulację długości części walcowej hydrocyklonu poprzez wymianę prętów. W dolnej części hydrocyklonu znajduje się zamknięty zbiornik, służący do gromadzenia zanieczyszczeń zatrzymywanych w hydrocyklonie.

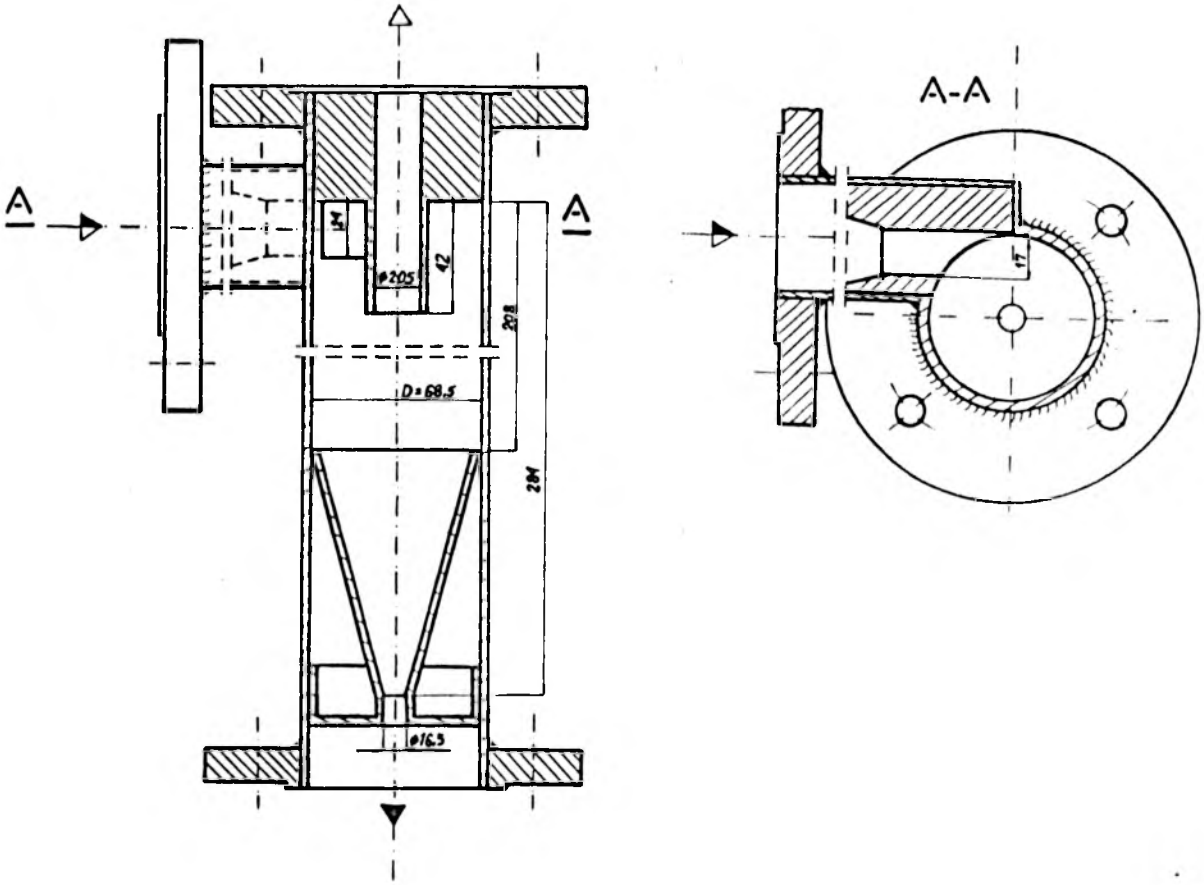
Hydrocyklon posiada wymienne dysze zasilające oraz wymienne tuleje przelewu, co umożliwia przeprowadzenie badań urządzenia przy różnych kształtach i przekrojach wlotowych dyszy zasilającej oraz przy różnych wymiarach geometrycznych rury przelewowej. Badania przeprowadzono przy następujących wymiarach hydrocyklonu:

Średnica części walcowej	$D = 68,5$ mm
Średnica przelewu	$d_p = 20,5$ mm
Średnica wylewu	$d_w = 16,5$ mm
Wysokość kanału wlotowego	$a = 24$ mm
Szerokość kanału wlotowego	$b = 17$ mm; 10 mm; 6,5 mm; 3 mm

Długość całkowita L_c = 284 mm

Długość przelewu L_p = 42 mm

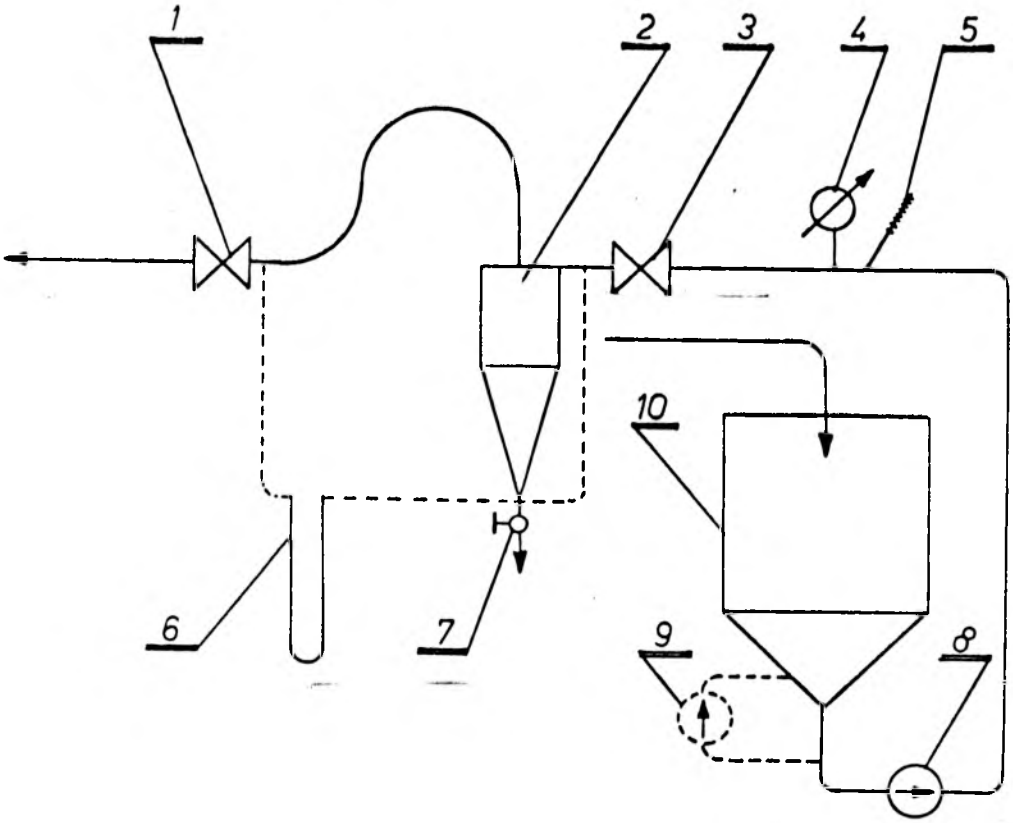
Długość części stożkowej L_s = 76 mm



Rys.11.1. Schemat modelu hydrocyklonu

11.2. Opis stanowiska pomiarowego

Na rys.11.2 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego na którym przeprowadzono badania odmulacza hydrocyklonowego.



Rys.11.2. Schemat stanowiska badawczego odmulaczy hydrocyklonowych

Stanowisko składa się z: hydrocyklonu /2/, zbiornika mieszającego /10/, pomp: mieszającej /9/ i obiegowej /8/, przewodów doprowadzających, odprowadzających, zaworów odcinających /1,3/ i manometrów /4,6/. Zbiornik mieszający ma kształt prostopadłościanu, z dnem wykonanym w formie ostrosłupa, co uniemożliwia osadzaniu się zanieczyszczeń na dnie.

Pompa mieszająca zasysa wodę przy wylocie ze zbiornika i przez dysze rozpylacza tłoczy ją do góry zbiornika, powodując intensywne mieszanie. Pompa obiegowa zasysa jednorodną zawiesinę i tłoczy ją przez badany hydrocyklon.

Manometr różnicowy MUR 1100 z przewodami impulsowymi zamontowanymi przed i za odmulaczem służy do pomiarów oporów hydraulicznych.

Prędkość przepływu zawiesiny regulowano zaworami. Dla umożliwienia badań hydrocyklonu przy małych prędkościach zastosowano przewód obejściowy łączący instalację ze zbiornikiem mieszającym. Odpowiednie otwarcie zaworu powodowało kierowanie zawiesiny z powrotem do zbiornika mieszającego, co pozwoliło na zachowanie stabilności przepływu przy małych prędkościach.

11.3. Metoda pomiarów

Badania przeprowadzono z modelowaniem zanieczyszczeń mączką skaleniową 4800.

Każdy cykl pomiarowy obejmował:

- napełnienie zbiornika mieszającego wodą wodociągową do ustalonej objętości
- wsypaniu ustalonej "dawki" zanieczyszczeń
- dokładne wymieszanie zanieczyszczeń w wodzie
- przepuszczenie zawiesiny przez hydrocyklon przy ustalonej prędkości przepływu
- demontaż hydrocyklonu, zebranie zanieczyszczeń z jego wnętrza
- doprowadzenie zanieczyszczeń do stanu powietrzno-suchego i zważenie ich.

Sprawność całkowitą odmulacza określano ze stosunku masy zanieczyszczeń zatrzymanych w odmulaczu do masy zanieczyszczeń wsypanych do zbiornika:

$$\eta = \frac{m_1}{m_p} \qquad /11.1/$$

Dla pomiarów przyjęto stałą ilość dozowanych zanieczyszczeń $m_p = 200$ g oraz stałą ilość wody w zbiorniku - $V = 0,492\ m^3$.

Z ogólnej ilości skalenia przeznaczonego do badań przygotowano średnie próbki laboratoryjne zgodnie z normą PN-74/Z-04002. Próbki przesiano przez zestaw sit o znormalizowanych wielkościach oczek od c = 0,385 mm do c = 0,060 mm za pomocą wstrząsarki mechanicznej. Skład ziarnowy skalenia o wielkościach ziaren mniejszych od 0,060 mm został określony metodą sedymentacji przy użyciu pipety Andreasena. Gęstość skalenia oznaczono za pomocą piknometru powietrznego zgodnie z PN-74/Z-04002 i wyniosła ona $\rho_1 = 2,50\ g/cm^3$. Dla porównania gęstość rzeczywistych zanieczyszczeń zebranych z sieci określona tą samą metodą wyniosła $\rho_1 = 2,54\ g/cm^3$ [36] .

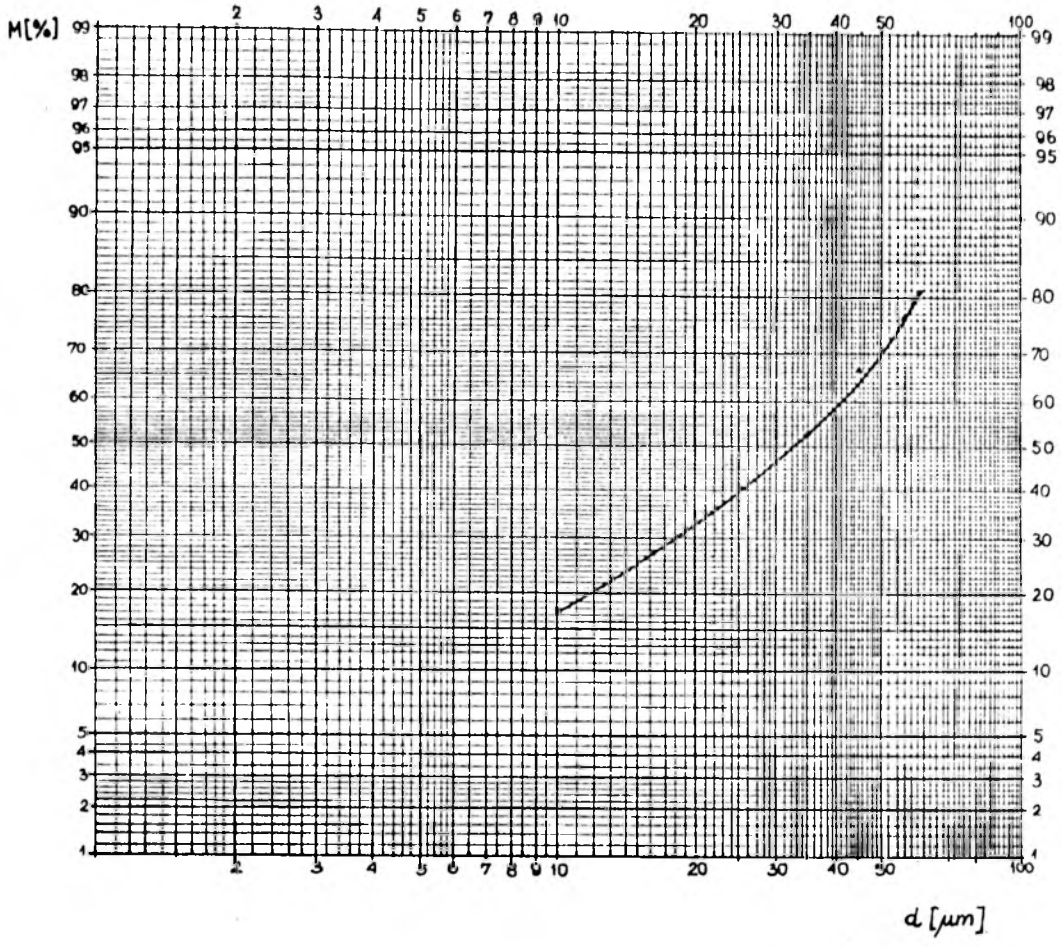
Skład ziarnowy pyłu przedstawiono na rysunkach 11.3 i 11.4.

Dla dokładnego określenia prędkości mierzono czas opróżniania zbiornika za pomocą stopera.

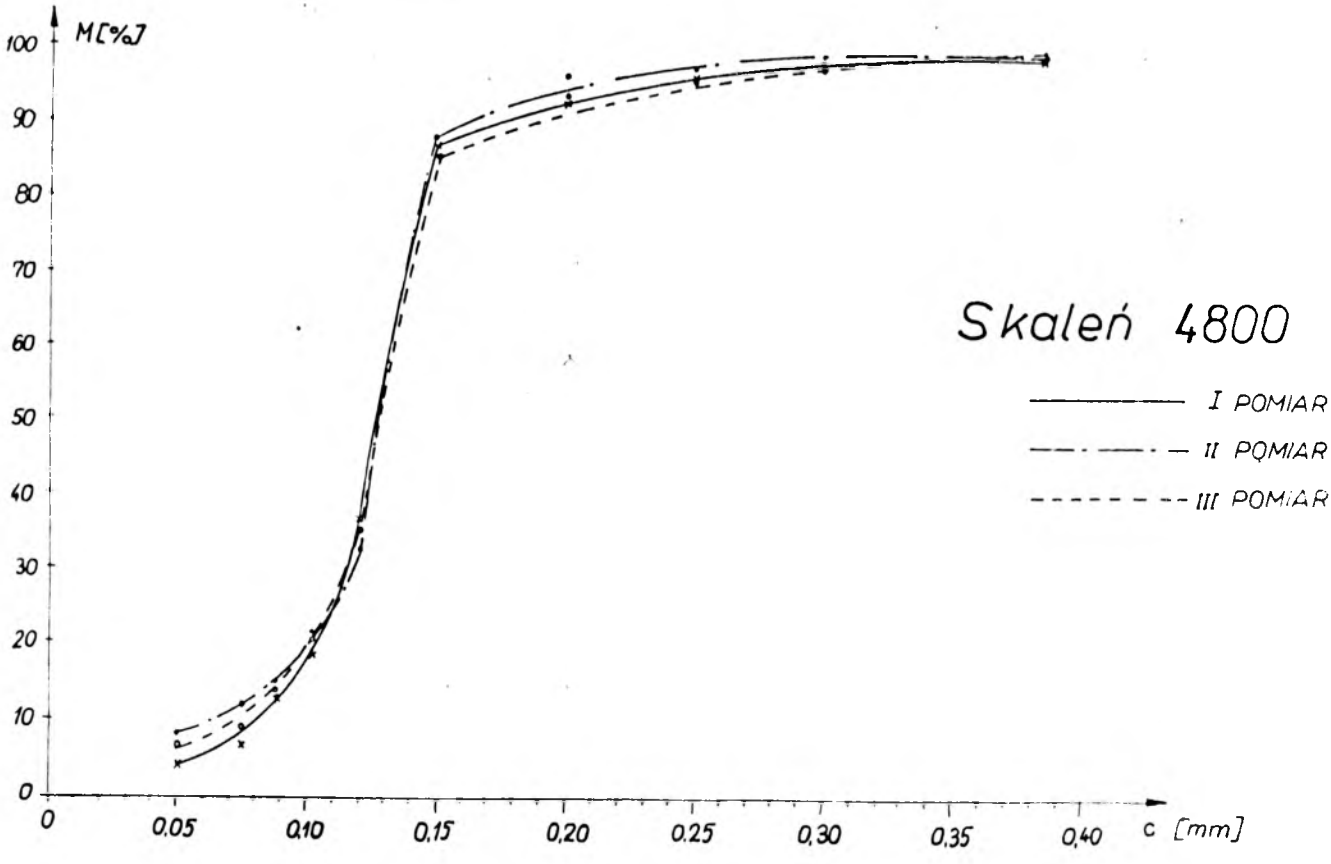
Dla każdego pomiaru określano średnią temperaturę wody termometrem rtęciowym. Zebrany osad filtrowano przez uprzednio zważone sączki. Po każdym pomiarze instalację, zbiornik mieszający oraz hydrocyklon płukano z ewentualnych pozostałości zanieczyszczeń wodą wodociągową.

11.4. Wyniki badań i analiza dokładności pomiarów

Uzyskane wyniki pomiarów przedstawiono w Tablicy 11.1 oraz na rysunku 10.1 a b c d na którym zamieszczono w postaci graficznej sprawności oraz całkowite straty ciśnienia w funkcji strumienia objętościowego masy nadawy. Jednocześnie na rysunkach tych umieszczono wyniki obliczeń numerycznych. Nie określono sprawności dla przepływów poniżej $V_n = 6x10^{-4}\ m^3/s$ gdyż byłyby one obarczone



Rys.11.3. Skład ziarnowy mączki skaleniowej uzyskany metodą sedymentacji



Rys.11.4. Skład ziarnowy mączki skaleniowej uzyskany metodą przesiania przez sita

zbyt dużymi błędami na skutek sedymentacji skalenia w przewodach instalacji. Badania hydrocyklonu przeprowadzono przy stałej długości części walcowej urządzenia L = 208 mm, przy stałej wysokości kanału wlotowego a = 24 mm oraz przy następujących szerokościach kanału wlotowego: b = 17 mm; 10 mm, 6,5 mm i 3 mm.

Temperatury zawiesiny mierzono rtęciowym termometrem laboratoryjnym o zakresie pomiarowym 0 - 50°C z działką elementarną 0,1 deg. Można przyjąć, że łącznie z błędami odczytu i wynikającymi z klasy przyrządu, błąd bezwzględny pomiaru temperatury wynosi 0,1 deg. Czas opróżniania zbiornika mierzono stoperem z dokładnością do 0,2 sec. Próbki skalenia ważono przy użyciu wagi laboratoryjnej o zakresie 0 - 2 kg z dokładnością do 10 mg. Pomiar różnicy ciśnień przeprowadzono za pomocą manometru różnicowego o zakresie pomiarowym 0 - 1100 Tr z działką elementarną 1 mm. Błąd odczytu wysokości ciśnienia nie przekracza 0,5 mm Tr.

Dla dyszy zasilającej o szerokości 3 mm pomiary ciśnień przeprowadzono przy użyciu ciśnieniomierza sprężynowego - rurkowego o zakresie pomiarowym 0 - 1,6 MPa z działką elementarną 0,025 MPa i dokładnością wskazań 0,0014 MPa.

Błąd pomiaru ciśnienia łącznie z błędami odczytu i wynikającymi z klasy przyrządu nie przekracza 0,007 MPa.

Tablica 11.1. Zestawienie wyników badań hydrocyklonu

Nr cyklu	Nr pomiaru	Temperatura nadawy	Czas opróżniania zbiornika	Objętość strumienia masy nadawy	Prędkość nadawy w przekroju wlotowym	Masa zatrzymanego pyłu	Sprawność hydrocyklonu	Strata ciśnienia	Szerokość kanału wlotowego
		T	t	V_n	W	m_1	η	Δp	b
		°C	sec	$m^3/s \times 10^3$	m/s	g	%	$Pa \times 10^4$	mm
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	6,15	340	1,447	3,546	113,46	56,730	7,396	17
	2	5,05	357	1,378	3,378	110,32	55,160	7,396	
	3	5,3	400	1,230	3,015	107,88	53,940	5,903	
	4	7,2	408	1,206	2,956	106,86	53,430	5,109	
	5	6,6	432	1,131	2,772	105,32	52,66	1,187	
	6	6,6	502	0,980	2,402	98,21	49,105	3,346	
	7	6,5	560	0,878	2,151	93,96	46,99	2,610	
	8	6,85	830	0,593	1,453	77,79	38,895	1,155	
	9	6,8	1076	0,457	1,121	-	-	0,578	
	10	7,1	1738	0,283	0,694	-	-	0,246	
2	1	5,7	373	1,319	5,496	125,18	62,59	10,289	10
	2	6,9	390	1,261	5,254	123,82	61,91	9,407	
	3	7,1	431	1,141	4,754	123,08	61,54	7,687	
	4	6,95	545	0,903	3,763	113,22	56,61	4,692	
	5	7,25	826	0,596	2,483	96,20	48,10	1,913	
3	1	5,5	400	1,230	7,885	132,65	66,325	13,960	6,5
	2	5,7	439	1,120	7,179	133,18	66,590	11,451	
	3	5,7	493	0,998	6,397	128,51	64,255	9,020	
	4	6,0	583	0,844	5,410	123,57	61,785	6,305	
	5	5,5	770	0,639	4,096	111,88	55,940	3,470	

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	6,05	470	1,047	14,54	132,52	66,26	24,520	
	2	5,55	500	0,984	13,67	140,16	70,08	22,850	
4	3	5,6	523	0,941	13,07	140,27	70,14	20,476	3
	4	5,6	564	0,872	12,11	135,63	67,82	14,631	
	5	5,5	714	0,689	9,57	129,66	64,83	11,033	

12. Porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych

Na rys.10.1 a b c d str.82 oraz w tablicy 12.1 przedstawiono wyniki eksperymentalne oraz wyniki obliczeń numerycznych. Dla dyszy zasilającej o szerokości 17 mm /rys.10.1 a/ rozbieżności między wynikami /eksperymentalnymi i teoretycznymi/całkowitej straty ciśnienia wahały się od 6,89% - WYNIK A11 do 37,31%-WYNIK A31 w odniesieniu do wyników eksperymentu,przy czym przebieg punktów teoretycznych i eksperymentalnych był podobny. Wszystkie wartości ciśnień obliczane teoretycznie mają bezwzględne wartości mniejsze od eksperymentalnych, Całkowita strata ciśnienia obliczana przy 812 iteracjach /WYNIK A.A31/ jest bliższa wartości otrzymanej z eksperymentu o około 8% niż całkowita strata ciśnienia obliczana przy 359 iteracjach /WYNIK A31/. Rozbieżności między wynikami eksperymentalnymi i teoretycznymi dotyczącymi sprawności są znacznie mniejsze i wahają się od 0,39% /WYNIK A11/ do 22,41% /WYNIK A51/ przy czym rozbieżności stopniowo wzrastają wraz ze zmniejszaniem się objętościowego strumienia masy nadawy. W jednym przypadku /WYNIK A11/ sprawność teoretyczna jest mniejsza od eksperymentalnej a w pozostałych jest większa. Najlepszą zgodność wyników obliczeń teoretycznych i eksperymentalnych reprezentują wyniki A11 i A12. Dla dyszy zasilającej o szerokości 10 mm /rys.10.1 b/ wykonano obliczenia numeryczne dla dwóch wartości objętościowych strumieni nadawy. Podobnie jak dla dyszy o szerokości 17 mm, obliczane teoretyczne wartości całkowitych strat ciśnienia mają bezwzględne wartości mniejsze od strat ciśnienia wyznaczonych eksperymentalnie. Najlepszą zgodność wyników obliczeń teoretycznych i eksperymentalnych przy obliczeniach

Tablica 12.1. Porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami obliczeń numerycznych

Lp.	WYNIK	Strata całkowita ciśnienia $\Delta p \times 10^{-4}$ /Pa/			Sprawność separacji η / % /		
		Teoretyczna	Eksperymental.	Różnica %	Teoretyczna	Eksperyment.	Różnica %
1	A11/A12	6,89	7,40	+6,89	56,51	56,73	+0,39
2	A21/A22	4,58	5,90	+22,37	55,24	53,94	-2,41
3	A31/A32	2,10	3,35	+37,31	52,70	49,11	-7,31
4	AA31/	2,37	3,35	+29,25	-	-	-
5	A41/A42	1,66	2,61	+36,40	51,43	46,99	-9,45
6	A51/A52	1,04	1,15	+9,56	47,62	38,90	-22,41
7	B11/B12	8,08	9,41	+14,13	67,30	61,91	- 8,71
8	B21/B22	4,57	4,69	+ 2,56	52,70	56,61	+ 6,91
9	C11/C12	15,9	13,96	-13,90	65,40	66,32	+ 1,39
10	C21/C22	6,66	6,30	-5,71	59,05	61,78	+ 4,42
11	D11/D12	19,4	24,52	+20,88	59,68	66,26	+ 9,93

ciśnienia reprezentuje WYNIK.B21 dla którego różnica między wartością wyznaczoną doświadczalnie a obliczoną numerycznie wynosi 2,56%. Jedna z teoretycznie obliczonych sprawności jest większa od wyznaczonej eksperymentalnie o 8,71% /WYNIK.B12/, druga mniejsza o 6,91% /WYNIK.B22/.

Dla dyszy zasilającej o szerokości 6,5 mm /rys. 10.1 c/ wykonano również obliczenia dla dwóch wartości objętościowych strumieni masy nadawy. Dla tego przypadku obliczone teoretycznie wartości całkowitych strat ciśnienia mają wartości bezwzględne większe od wyznaczonych eksperymentalnie o 13,9% /WYNIK.C11/ oraz o 5,71% /WYNIK.C 21/ w odniesieniu do eksperymentu. Obliczone teoretycznie wartości sprawności są mniejsze od eksperymentalnych o 1,39% /WYNIK.C12/ oraz o 4,42% /WYNIK.C22/.

Dla dyszy zasilającej o szerokości 3 mm /rys.10.1 d/ wykonano jedno obliczenie. Obliczona teoretycznie wartość całkowitej straty ciśnienia jest mniejsza o 20,88% /WYNIK.D11/ od eksperymentalnej a teoretyczna wartość sprawności mniejsza o 9,93% od eksperymentalnej.

13. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono metodę projektowania odmulaczy hydrocyklonowych dla potrzeb ciepłownictwa. Metoda ta w postaci programu numerycznego oparta jest o matematyczny model przepływu cieczy i cząstek zanieczyszczeń przez hydrocyklon. Wykazano, że dla silnie burzliwych przepływów w których jedna składowa prędkość /styczna/ jest większa od dwóch pozostałych należy zastosować model przepływu cieczy znacznie rozszerzony w stosunku do modeli stosowanych do opisu klasycznych przepływów recyrkulacyjnych. Zastosowany model matematyczny turbulencji $k-\varepsilon-\overline{v'w'}$ - / $\overline{v'}^2-\overline{w'}^2$/ pozwolił w sposób zadowalający przybliżyć teoretyczny model przepływu do rzeczywistego. Wykazano celowość stosowania modelu pseudodwufazowego dla modelowania przepływu drobnych zanieczyszczeń przez hydrocyklon ponieważ w tym przypadku sprzężenia pomiędzy równaniami ruchu dla fazy ciekłej i stałej są niewielkie. Ponadto wykazano, że sposób obliczania sprawności gromadzenia cząstek zanieczyszczeń w oparciu o znajomość rozkładu wielkości cząstek oraz torów ich ruchu daje zadowalające rezultaty.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych wykazały zadowalającą zgodność z wynikami eksperymentalnymi.

W zakresie analizy teoretycznej zastosowanej w pracy przedstawiono:

- Matematyczny model przepływu przez hydrocyklon wraz z opisem turbulencji oraz opisem ruchu cząstek fazy stałej.
- Ogólny opis programu numerycznego służącego do projektowania odmulaczy hydrocyklonowych.
- Wyniki obliczeń numerycznych zawierające: sprawności separacji,

pola ciśnień i prędkości oraz straty ciśnienia dla hydrocyklonów o różnych wymiarach geometrycznych.

W zakresie pomiarów eksperymentalnych przedstawiono:

- Wyniki badań frakcji zanieczyszczeń wody sieciowej wykonane między innymi przy użyciu własnej metodyki badań za pomocą kolumny sitowo-filtracyjnej, które wykazały rzeczywisty rozkład wielkościowy zanieczyszczeń w sieciach cieplnych.
- Wyniki badań sprawności klasycznych urządzeń służących do usuwania zanieczyszczeń wody sieciowej, które wykazały niską sprawność oczyszczania odmulaczy siatkowo-inercyjnych.
- Wyniki badań eksperymentalnych odmulaczy hydrocyklonowych, które posłużyły do weryfikacji wyników uzyskanych z obliczeń numerycznych.

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Biblioteka Główna

Spis literatury

1. Bacciarelli J.,Kuciński P.-"Badania eksploatacyjne odmulaczy". OBRC SPEC /1979/
2. Battaglia A.- "Prace Główn.Inst.Górn.Komunikat nr 144" /1953/
3. Battaglia A.-Arch.Górn.Tom VII Zeszyt 2 str.124, /1962/
4. Bednarski St.- "Hydrocyklonowy Konstr.i Obl.Technolog"/1967/
5. Bednarski St.- Chemische Technik nr 1 str.12 /1968/
6. Bednarski St.- Inż.i Ap.Chem.nr 1, str.17 /1983/
7. Bloor M.I.G.,Ingham D.B.-"Theoretical Aspects of Hydrocyclone Flow" w książce R.I.Wakemana - "Progress in Filtration and Separation",str.57 /1983/
8. Bobrowicz M.-"Opracowanie końcowe.." BISTYP /1976/
9. Bohnet M.- "Design Methods for Aerocyclones and Hydrocyclones" w książce R.Gupta "Handbook of Fluids in Motion", str.847 /1983/
10. Boysan F.,Ayers W.H.,Swithenbank J.-"A Fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design"- Trans. J.Chem.Eng.vol.60, str 222 /1982/
11. Boysan F.,Ewan B.C.R.,Swithenbank J.,Ayers W.H.-"Experimental and Theoretical Studies of Cyclone Separator Aerodynamics"- J.Chem.E.Symposium Series No 69, str.305 /1983/
12. Boysan F.-"SPRINT 4- User's Manual" /1983/
13. Boysan F.-"Selected Topics in Two-Phase Flow" - Lecture Series No 9, Trondheim, str. 137 /1984/
14. Bradley D.-"The Hydrocyclone"- Pergamon, Oxford /1965/

15. Chmicz D.- "Problemy jakości wody.." COBRTI INSTAL /1983/

16. Chomicz D.,Górecki A. i inni- "Stan wiedzy... sieci ciepłowniczych" /1985/

17. Cobb T.J., Kincannon D.F.,Tiederman W.G.-"The Hydrocyclone for Water Clarification"- J.A.W.W.A.,str.409 /June 1973/

18. Czajkowski M.,Neuman K.,"Badania odmulaczy..."-Przegl.Inf. Ciepłownictwa nr 2, str.64 /1970/

19. Day R.W.-"The Hydrocyclone In Process and Pollution Control" Chem.Eng.Progr.Vol.69 No 9, str.67 /1973/

20. Driessen M.B.-"Theorie de L'ecoulement dans un cyclone" Rev.Industr.Min.vol 31, str.482 /1951/

21. Gajewska R.-"Badania odmulaczy..." OBD-SPEC /1971/

22. Grosman A.D., Ideriak F.J.K.-"A General Computer Program..." -Report Dep.of Mech.Eng. Imperial College London, June /1976/

23. Heitman G.G.- "Use of Electromagnetic Filters..." - Int.Conf. Water Chem.of Nuclear Reactor Syst.-Papers Bournemouth /U.K/ str. 285 October /1977/

24. Heitman H.G.-"Studies of the Application of Electromagnetic Filters in Power Plants".

25. Kwapisz J.-"Oczyszczanie sieci cieplnej z zanieczyszczeń.." -OBD SPEC /1971/

26. Kwapisz J.-"Odmulacze dla węzłów cieplnych"- COBRTI INSTAL /1981/

27. Kwapisz J.-"Typowe konstrukcje odmulaczy" - COBRTI INSTAL /1984/

28. Launder B.E.,Spalding D.B. -Computer Meth.in Appl.Mech.Engg. vol.3 str. 269 /1974/

29. Launder B.E.,Spalding D.B.-"Mathematical Models of Turbulence"- Academic Press London, New York /1972/

30. Launder B.E.,Priddin C.H.,Sharma B.J.-"The Calculation of Turbulent Boundary Layers on Spinning and Curved Surfaces" ASHE.J.Fluids Eng.,str.231, March /1977/

31. Lilly D.G.,Rhode D.L.-"A Computer Code for Swirling Turbulent Axisymmetric Recirculating Flows..." NASA Report 3442 /1982/

32. Mańkowski St.-"Projektowanie instalacji ciepłej wody użytkowej" Arkady /1981/

33. Mańkowski St.i inni - "Odmulacze węzłów cieplnych.." IOiW PW /1981/

34. Mańkowski St.,Szadkowski W.- "Oczyszczanie wody sieciowej z zanieczyszczeń..." - IOiW PW /1982/

35. Mańkowski St., Szadkowski W.- "Badania sprawności siatkowych odmulaczy..." COiW nr 7-8 /1983/

36. Mańkowski St.,Grzywacz A.,Szadkowski W.-"Oczyszczanie wody sieciowej..." IOiW PW /1984/

37. Mańkowski St.,Szadkowski W., Zwierzchowski R. "Oczyszczanie wody sieciowej .." IOiW PW /1985/

38. Mańkowski St.,Zwierzchowski R.-"Symulacja numeryczna przepływów w cyklonach i hydrocyklonach" - II Ogólnopolska Konf."Mech.Płyn.w Ochr.Srod." Kwiecień, Wisła /1985/

39. Mańkowski St., Szadkowski W., Zwierzchowski R.-"Eksperymentalne i teoretyczne badanie przepływów cieczy i cząstek zanieczyszczeń w hydrocyklonach" - III Międzynarod.Konf."Klimatyzacja i Ciepł. Racjonal.Rozw.Konstr. Wrocław, Szklarska Poręba, Maj /1987/.

40. Marcinkiewicz J. i inni - "Badania odmulaczy sieciowych..." COBRTI INSTAL /1984/

41. Marcinkiewicz J.-"Wyniki badań odmulacza IOiW-2Ø40mm" COBRTI INSTAL

42. Morsi S.,Alexander A.- "An investigation of paricle trajectories in two-phase flow systems" Journal of Fluid Mechanics vol 55, str.193 /1972/

43. Nowak Z.-"Hydrocyklony w przeróbce mechanicznej kopalin - /1970/

44. Opracowanie - "Program rozwoju ciepłownictwa w miastach i na wsiach... z uwzględnieniem oszczędnego gospodarowania paliwami i energią na ten cel w latach 1986-1990" Grudzień /1986/

45. Paneskar P.S.,Sarma K.J.R.-"Design of Hydrocyclone" Chem. Proc.Equipment Sem., Indian Chem J. vol.4, No 1, str. 53 /1969/

46. Patankar S.V.- "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow" -Hemisphere Mc.Graw. Hill N.Y. /1980/

47. Pikoń J.- "Aparatura chemiczna" - PWN- W-wa str.691 /1978/

48. Rietema K.,Verver C.G.,-"Cyclones in industry"- Elsevier, /1961/

49. Rodi W.- "A New Algebraic Relation for Calculating the Reynolds Stresses" ZAMM, vol.56 str. 218 /1976/

50. Słomkowska - "Badania... filtru elektromagnetycznego" - Prace ITC Łódź, Zeszyt 78 /1981/

51. Spalding D.B.- "Turbulence Models, a Lecture Course" CFD/82/4 Imperial College, London /1983/

52. Spillner F. -"Wasser-und Korrosjonsfragen bei Fernheiznetzen Hertzung-Luftungs-Hertztechnika /HLH21/, /2/1970/

53. Stąsiek J.,Zwierzchowski R.-"Experimental verification of Numerical Simulation of Flows in Cyclones and Hydrocyclones" - Int.Symp.on Fluid Control and Measurement, FLUCOME-Tokyo /1985/

54. Szadkowski W.,Zwierzchowski R.-"Theoretical and Experimental Investigations of Liquid Flow and Particles Collection in Hydrocyclones" - Second Danish-Polish Workshop on Modelling Heat Flow and Fluid Flow Problems Copenhagen /1986/

55, Ternovskii I.G., Kutepov A.M.,Kuznetsov A.A., Zh.Prikl.Khim, Volume 51, str. 1967, No 9 /1978/

56. Tarjan G.- "Some Theoretical Questions on Classifying and Separating Hydrocyclones" - Acta Tech. Hung. vol.33 str.357 /1961/

57. "Unifikacja Budownictwa Przemysłowego" Cz.III COBRTI INSTAL /1976/

58. Zanker A.- "Hydrocyclones: dimensions and performance" - Chem.Eng. str. 122, May 9 /1977 /

59. Zwierczhowski R.- "Numerical Computation of Fluid Flow and Particles Motion in Cyclones and Hydrocyclones" - Proc.of First Danish-Polish Workshop on Modelling Heat Flow and Fluid Flow Problems. May 15-16, 1985 Warsaw. Thermal Insulation Lab. Copenhagen /1985/

60. Zwierzchowski R.-"Numeryczne obliczanie przepływów płynu i cząstek zanieczyszczeń w cyklonach i hydrocyklonach" - Zeszyty Naukowe Polit.Warsz.IOiW /1987/

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Biblioteka Główna

B.
20446

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
B.020446/01

Wypożyczalr
dla Pracownik