

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

P. 3351/93

FRANCISZEK PLEWA



**BADANIE ZJAWISK WYSTĘPUJĄCYCH
W SZYBOWYM TRANSPORCIE RUROWYM
SUROWCÓW MINERALNYCH
ZALEGAJĄCYCH NA DUŻYCH GŁĘBOKOŚCIACH**

GÓRNICtwo

**Z. 215
GLIWICE
1993**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 1208

Q. 3351/93

FRANCISZEK PLEWA



BADANIE ZJAWISK WYSTĘPUJĄCYCH
W SZYBOWYM TRANSPORCIE RUROWYM
SUROWCÓW MINERALNYCH
ZALEGAJĄCYCH NA DUŻYCH GŁĘBOKOŚCIACH

GLIWICE

1993

OPINIODAWCY

Prof. zw. dr hab. inż. Adam Klich

Dr hab. inż. Stanisław Czaban
Profesor Akademii Rolniczej we Wrocławiu

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY - Prof. dr hab. inż. Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU - Prof. dr hab. inż. Walery Szuścik

SEKRETARZ REDAKCJI - Mgr Elżbieta Leško

REDAKCJA

Mgr Anna Błażkiewicz

REDAKCJA TECHNICZNA

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0372-9508

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 150 + 83 egz. Ark. wydł. 6,5 Ark. druk. 1,0 Papier offset, kl. III 70x100, 80g.
Oddano do druku 17.06.93 Połpis. do druku 17.06.93 Druk ukończ. w czerwcu 1993
Zam. 1713/93 Cena zł. 23.000,-

Fotokopie, druk i oprawę
wykonano w INTEC-GRAF Gliwice, Bankowa 12

SPIS TREŚCI

SPIS OZNACZEŃ	13
1. WSTĘP	17
2. KLASYFIKACJA INSTALACJI DO PIONOWEGO TRANSPORTU CZĄSTEK STAŁYCH	18
2.1. ZASADA PRACY INSTALACJI TRANSPORTU HYDRAULICZNO PNEUMATYCZNEGO	19
2.2. PRZEGLĄD KONSTRUKCJI MIESZALNIKÓW	21
2.3. PRZEGLĄD KONSTRUKCJI ODDZIELACZY POWIETRZA	28
3. PRZEGLĄD LITERATURY Z ZAKRESU MODELOWANIA PRZEPŁYWU WIELOFAZOWEGO	33
3.1. TEORIA PODOBIEŃSTWA DLA INSTALACJI Z PRZEPŁYWAMI WIELOFAZOWYMI	33
3.2. METODA ANALIZY WYMIAROWEJ	34
3.2.1. Podstawowe twierdzenia analizy wymiarowej	34
3.3. CHARAKTERYSTYKA MODELI TEORETYCZNYCH DLA MIESZANIN DWUFAZOWYCH CZIECZ – POWIETRZE	37
3.4. AKTUALNY STAN BADAŃ I METOD OBLICZANIA PARAMETRÓW PRZEPŁYWU W INSTALACJACH TRANSPORTU HYDRAULICZNO – PNEUMATYCZNEGO	39
3.5. PODSUMOWANIE	46
4. CEL, TEZA I METODA PRACY	48
4.1. TEZA PRACY	48
4.2. METODA PRACY	49
5. BADANIE PARAMETRÓW MIESZANINY WODNO–POWIETRZNEJ ..	50
5.1. TEORETYCZNE PODSTAWY PRZEPŁYWU PĘCHERZYKÓW POWIETRZA W WODZIE	56
5.2. MODELOWANIE TEORETYCZNE PRZEPŁYWU POWIETRZA W WODZIE	61

5.2.1. Modelowanie przepływu pojedynczego pęcherzyka powietrza w wodzie	61
5.2.2. Model matematyczny przepływu mieszaniny wodno–powietrznej	63
5.2.3. Uproszczony model matematyczny przepływu mieszaniny woda – powietrze	66
5.3. MODEL MATEMATYCZNY PRZEPIYU W WODZIE CZĄSTEK STAŁYCH O GĘSTOŚCI MNIEJSZEJ OD GĘSTOŚCI WODY	69
5.3.1. Model matematyczny przepływu w wodzie pojedynczych cząstek stałych o gęstości mniejszej od gęstości wody	69
5.3.2. Model matematyczny przepływu mieszaniny woda – cząstki stałe	73
5.3.3. Uproszczony model matematyczny przepływu mieszaniny woda – cząstki stałe	77
5.4. PODSUMOWANIE	80
5.5. BADANIA LABORATORYJNE PRZEPIYU POJEDYNCZYCH CZĄSTEK POWIETRZA I STYROPIANU W WODZIE	80
5.5.1. Opis instalacji laboratoryjnej	82
5.5.2. Zasada prowadzenia pomiarów	83
5.5.3. Wyniki pomiarów	83
6. BADANIA PARAMETRÓW PRZEPIYU MIESZANIN WIELOFAZOWYCH W INSTALACJI LABORATORYJNEJ	99
6.1. OPIS INSTALACJI LABORATORYJNEJ	99
6.2. BADANIE PRĘDKOŚCI UNOSZENIA I PRĘDKOŚCI TRANSPORTOWEJ CZĄSTEK STAŁYCH W INSTALACJACH TRANSPORTU HYDRAULICZNO – PNEUMATYCZNEGO	105
6.2.1. Rozpoznanie literaturowe	105
6.2.2. Badanie prędkości unoszenia i prędkości transportowej cząstek stałych w instalacjach transportu hydrauliczno – pneumatycznego	107
7. MODELOWANIE PRZEPIYU WIELOFAZOWEGO (WODA – GAZ – CIAŁA STAŁE)	121
7.1. ZAŁOŻENIA DO MODELU TEORETYCZNEGO	121
7.1.1. Rozpady cząstek	125
7.1.2. Symulacja pracy instalacji [47,48]	126
7.2. PARAMETRY MODELU TEORETYCZNEGO	128
7.3. WYNIKI I ANALIZA SYMULACJI KOMPUTEROWEJ PRZEPIYWÓW WIELOFAZOWYCH	129

7.3.1. Przepływ dwufazowy	129
7.3.2. Przepływ trójfazowy – ustalony Przebiegi przepływu powietrza i wody, prędkości	134
7.3.3. Przepływ trójfazowy – nieustalony	137
7.4. WERYFIKACJA MODELU TEORETYCZNEGO	139
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	142
LITERATURA	145
STRESZCZENIA	150

CONTENTS

NOMENCLATURE	13
1. INTRODUCTION	17
2. CLASSIFICATION OF INSTALLATIONS FOR VERTICAL TRANSPORT OF SOLID PARTICLES	18
2.1. Principles of the work of installations for hydraulic and pneumatic transport	19
2.2. Review of mixer constructions	21
2.3. Review of constructions of air separators	28
3. REVIEW OF LITERATURE IN THE FIELD OF MODELLING MULTIPHASE FLOW	33
3.1. Theory of similarity for installations with multiphase flow	33
3.2. Dimensional analysis method	34
3.2.1. Basic theorems of dimensional analysis	34
3.3. Characteristics of theoretical models for liquid-air two-phase mixtures ...	37
3.4. Current research and computational methods for flow parameters in installations for hydraulic and pneumatic transport	39
3.5. Summary	46
4. AIM, THESIS, AND METHOD	48
4.1. Thesis of the work	48
4.2. Method of the work	49
5. INVESTIGATIONS OF PARAMETERS OF WATER-AIR MIXTURE	50
5.1. Theoretical basis for air bubbles flow in water	56
5.2. Theoretical modelling of air flow in water	61
5.2.1. Modelling the flow of single air bubble in water	61
5.2.2. Mathematical model of water-air mixture flow	63
5.2.3. Simplified mathematical model of water-air mixture	66
5.3. Mathematical model of flow in water solid particles of density lower than the density of water	69
5.3.1. Mathematical model of the flow in water single solid particles of density lower than the density of water	69

5.3.2. Mathematical model of water-solid particles mixture flow	73
5.3.3. Simplified mathematical model of water-solid particles mixture flow	77
5.4. Summary	80
5.5. Laboratory investigations of the flow of air particles and foamed polystyrene in water	80
5.5.1. Description of laboratory installations	82
5.5.2. Principles of conducting measurements	83
5.5.3. Results of measurements	83
6. INVESTIGATIONS OF PARAMETERS OF MULTIPHASE MIXTURE FLOW IN LABORATORY INSTALLATIONS	99
6.1. Description of laboratory installations	99
6.2. Investigations of convection velocity and transport velocity of solid particles in installations for hydraulic and pneumatic transport	105
6.2.1. Literature review	105
6.2.2. Investigations of convection velocity and transport velocity of solid particles in installations for hydraulic and pneumatic transport	107
7. MODELLING MULTIPHASE FLOW (WATER-GAS-SOLID BODIES)	121
7.1. Assumptions for a theoretical model	121
7.1.1. Destruction of particles.	125
7.1.2. Simulation of work of the installation.	126
7.2. Parameters of a theoretical model	128
7.3. Results and analysis of a computer simulation of multiphase flow	129
7.3.1. Two-phase flow	129
7.3.2. Three-phase flow (stable)	134
7.3.3. Three-phase flow (unstable)	137
7.4. Verification of the theoretic model	139
8. SUMMARY AND FINAL CONCLUSIONS	142
LITERATURE	145
SUMMARISE	150

INHALTSVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER BEZEICHNUNGEN	13
1. EINFÜHRUNG	17
2. KLASSIFIKATION DER ANLAGE ZUM SENKRECHTEN TRANSPORT FESTER TEILCHEN	18
2.1. Principien der Arbeit der Anlage für den hydraulisch - pneumatischen Transport	19
2.2. Überblick über die Konstruktion der Mischern	21
2.3. Überblick über die Konstruktion der Sichern	28
3. ÜBERBLICK ÜBER DIE LITERATUR AUS DEM BEREICH DES MODELLIEREN DER MEHRPHASENSTRÖMUNG	33
3.1. Ähnlichkeitstheorie für Anlagen mit Mehrphasenströmung	33
3.2. Methode der Dimensionsanalyse	34
3.2.1. Grundlegende Lehrsätze der Dimensionsanalyse	34
3.3. Charakteristik theoretischer Modelle für zweiphasige Mischungen Flüßigkeit - Luft	37
3.4. Aktueller Stand der Untersuchungen und Berechnungsmethoden von Stömungsparametern in Anlagen für den hydraulisch - pneumatischen Transport	39
3.5. Zusammenfassung	46
4. ARBEITZIEL, -THEZE UND -METHODE	48
4.1. Arbeitsthese	48
4.2. Arbeitsmethode	49
5. UNTERSUCHUNG VON PARAMETERN DER WASSER-LUFT - MISCHUNG	50
5.1. Theoretische Grundlagen der Luftblasenströmung in Wasser	56
5.2. Theoretisches Modellieren der Luftströmung in Wasser	61
5.2.1. Modellieren der Strömung einer einzelnen Luftblase im Wasser	61
5.2.2. Mathematisches Modell der Strömung von Wasser-Luft-Mischung	63

5.2.3. Vereinfachtes mathematisches Modell der Strömung von Wasser-Luft-Mischung	66
5.3. Mathematisches Modell der Strömung im Wasser fester Teilchen, deren Dichte kleiner ist als die Wasserdichte im Wasser einzelner fester Teilchen	69
5.3.1. Mathematisches Modell der Strömung im Wasser einzelner fester Teilchen, deren Dichte kleiner ist als die Wasserdichte	69
5.3.2. Mathematisches Modell der Strömung von Mischung Wasser–feste Teilchen	73
5.3.3. Vereinfachtes mathematisches Modell der Strömung von Mischung Wasser–feste Teilchen	77
5.4 Zusammenfassung	80
5.5. Laboruntersuchungen der Strömung einzelner Luft – und Styroparteilchen im Wasser	80
5.5.1. Beschreibung der Laboranlage	82
5.5.2. Prinzipien, wie die Messungen geführt werden	83
5.5.3. Messungsergebnisse	83
6. UNTERSUCHUNGEN VON PARAMETERN DER STRÖMUNG VON MEHRPHASENMISCHUNGEN IN LABORANLAGEN	99
6.1. Beschreibung der Laboranlage	99
6.2. Untersuchungen der Schebegeschwindigkeit und der Transportgeschwindigkeit fester Teilchen in Anlagen für den hydraulisch – pneumatischen Transport	105
7. MODELLIEREN DER MEHRPHASENSTRÖMUNG (WASSER–GAS–FESTKÖRPER)	121
7.1. Grundlagen für das theoretische Modell	121
7.1.1. Zerfall der Teilchen	125
7.1.2. Simulation der Anlagearbeit	126
7.2. Parameter des theoretischen Modells	128

7.3. Ergebnisse und Analyse der Computersimulation von Mehrphasenströmungen 129

7.3.1. Zweiphasige Strömung 129

7.3.2. Festgelegte dreiphasige Strömung 134

7.3.3. Nichtfestgelegte dreiphasige Strömung 137

7.4. Verifikation des theoretischen Modells 139

8. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUßFOLGERUNGEN 142

LITERATUR 145

KURZFASSUNG 150

SPIS OZNACZEŃ

- A – pole powierzchni, m^2 ,
- c_p – współczynnik oporu czołowego cząstek powietrza w wodzie,
- c_T – koncentracja transportowa w mieszaninie dwufazowej,
- c_t – koncentracja transportowa w mieszaninie trójfazowej,
- c_v – koncentracja objętościowa,
- c_w – współczynnik oporu czołowego cząstek stałych w wodzie,
- D – średnica rurociągu, m,
- d – średnica cząstki, m,
- d_1 – średnica dyszy doprowadzającej powietrze do instalacji, m,
- E_x – liczba ekspansji,
- f – współczynnik kształtu ziarna,
- g – przyspieszenie ziemskie, $m\ s^{-2}$,
- G – ciężar, kG,
- H – całkowita wysokość instalacji, m,
- H_2 – wysokość części pasywnej instalacji, m,
- H_m – wysokość mieszalnika, m,
- H_t – wysokość transportowa instalacji, m,
- h – wysokość zatopienia dyszy wlotu powietrza, m,
- K_N – współczynnik Newtona,
- K_S – współczynnik Stokesa,
- M – masa, kg,
- \dot{M} – masowe natężenie przepływu, $kg\ s^{-1}$,
- n – liczba pęcherzyków,
- N_w – moc włożona, W,
- N_u – moc użyteczna, W,
- p – ciśnienie, Pa,
- R – siła oporu ośrodka, N,
- Re – liczba Reynoldsa,
- Q – objętościowe natężenie przepływu, $m^3\ s^{-1}$,

- T – siła tarcia, N,
 v – prędkość, $m s^{-1}$,
 α – względny współczynnik zatopienia instalacji równy:

$$\alpha = \frac{H_t}{H_t + h}$$

- γ – ciężar właściwy, $N m^{-3}$,
 δ – błąd względny,
 ϵ – koncentracja przekrojowa,
 η – współczynnik sprawności instalacji,
 λ – współczynnik oporu cząstek,
 ν – kinematyczny współczynnik lepkości, $m^2 s^{-1}$,
 ρ – gęstość, $kg m^{-3}$,
 Q – parametr określający względne zużycie powietrza równy Q_{pn}/Q_w ,
 σ – napięcie powierzchniowe cieczy, $N m^{-1}$,
 ψ – współczynnik sferyczności,
 η – dynamiczny współczynnik lepkości, $kg m^{-1} s^{-1}$,

Pozostałe oznaczenia objaśniono w tekście lub na rysunku.

SPIS INDEKSÓW

- kr – warunki krytyczne,
 m – medium,
 n – warunki normalne,
 p – powietrze,
 r – rurociąg,
 s – cząstki stałe,
 w – woda,
 x – styropian,
 z – zbiornik,
 pas – odcinek pasywny (przepływ ciał stałych i wody),
 akt – odcinek aktywny (przepływ ciał stałych, wody i powietrza),

- r- s - pomiędzy rurociągiem i cząstkami stałymi
- r- w - pomiędzy rurociągiem i wodą,
- r- p - pomiędzy rurociągiem i powietrzem,
- r- x - pomiędzy rurociągiem i styropianem,
- w- s - pomiędzy wodą i ciałem stałym,
- w- p - pomiędzy wodą i powietrzem,
- w- x - pomiędzy wodą i styropianem,
- m- s - pomiędzy medium i ciałem stałym,
- wl - dotyczy miejsca wlotu powietrza do instalacji,
- c - ciecz,
- g - gaz.

1. WSTĘP

Hydrotransport jako jeden z najtańszych sposobów transportu materiałów ziarnistych charakteryzuje ostatnio dynamiczny rozwój. Ten rodzaj transportu stosowany jest zarówno do przesyłania materiałów ziarnistych na duże odległości, jak i na krótkich odcinkach w wielu procesach technologicznych różnych gałęzi przemysłu, a głównie w górnictwie, energetyce, budownictwie i przemyśle chemicznym [1,2,4,8,12,13,19,26]. Duże możliwości zastosowania hydrotransportu istnieją również w rolnictwie [73].

Podstawowymi zaletami hydrotransportu są:

1. prosta konstrukcja urządzeń
2. niezawodność pracy
3. niskie koszty eksploatacyjne
4. możliwość pełnej automatyzacji
5. minimalizacja negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

Do nielicznych wad należy zaliczyć erozyjne oddziaływanie transportowanego materiału na elementy instalacji, możliwości zatkań rurociągu i potrzebę oczyszczania wody w przypadku stosowania obiegów otwartych.

W przemyśle wydobywczym, zarówno przy eksploatacji kopalni z Ziemi, jak i złóż zalegających na dnie mórz i oceanów, do podnoszenia urobku w rurach pionowych i silnie nachylonych stosuje się instalacje z zastosowaniem pomp wirowych, tłokowych, strumieniowych, bądź instalacji z transportem hydrauliczno-pneumatycznym (airliftem) [17,23,26,27,32,36].

Podnoszenie urobku za pomocą strumieni lub airliftu cechuje stosunkowo niska sprawność, która dla istniejących instalacji przemysłowych nie przekracza 40% [42,50].

Rozwiązania te jednak charakteryzują się prawie bezawaryjną pracą i bardzo małą ilością remontów ze względu na brak ruchomych elementów (tłoków, zaworów, wirników itp.) narażonych na erozyjne działanie cząstek, co w wielu przypadkach przesądza o ich stosowaniu.

2. KLASYFIKACJA INSTALACJI DO PIONOWEGO TRANSPORTU CZĄSTEK STAŁYCH

Hydraulicznego podnoszenia i transportu materiałów ziarnistych z poziomu niższego na wyższy można dokonać za pomocą:

- pomp,
- strumieni wodnych,
- strumieni powietrznych,
- instalacji hydrauliczno–pneumatycznych,
- instalacji hydrotransportu z cząstkami stałymi o gęstości mniejszej od gęstości cieczy.

W instalacjach hydrauliczno–pneumatycznych można wydzielić instalacje wykorzystujące jako czynnik nośny mieszaninę przegrzanej pary wodnej i powietrza. Ich zalety to wykorzystanie nadmiaru pary technologicznej elektrowni lub elektrociepłowni po odpowiednim zmieszaniu z powietrzem za pomocą strumienicy parowej oraz zmniejszenie maksymalnej prędkości wylotowej mieszaniny ciecz – para – powietrze z uwagi na efekt ochłodzenia i skroplenia pary wodnej.

Instalacje transportu hydrauliczno–pneumatycznego oprócz wielu zalet mają także cechy ujemne, a jedną z nich jest wzrost prędkości powietrza wraz z wysokością transportową, spowodowaną rozprężaniem powietrza, powodującą zwiększenie oporów przepływu, zużycie rurociągów itp. Sposobem eliminacji tego niekorzystnego zjawiska może być zastąpienie sprężonego powietrza cząstkami stałymi o gęstości mniejszej od gęstości cieczy [40,42].

Na efektywność pracy tego typu instalacji istotny wpływ ma mieszalnik, w którym następuje mieszanie doprowadzonego powietrza z cieczą, oraz część końcowa instalacji, w której powietrze oddziela się od mieszaniny cieczy i cząstek stałych (oddzielacz powietrza).

2.1. ZASADA PRACY INSTALACJI TRANSPORTU HYDRAULICZNO – PNEUMATYCZNEGO

Transport hydrauliczno–pneumatyczny znany jest w świecie od końca XVIII wieku. C.J. Locker w książce z roku 1897 opisał sposób pionowego transportu wody za pomocą powietrza (airlift). Zasada pracy instalacji transportu hydrauliczno–pneumatycznego stosowanych do podnoszenia cząstek ciał stałych jest następująca. Jeżeli w pionowej rurze (rys. 1) wypełnionej cieczą i zanurzonej w zbiorniku otwartym unoszą się pęcherzyki powietrza, które zajmują objętość $dV = Adz$, to ciężar słupa cieczy o objętości $dV = A\epsilon_p dz$ jest o $dG = A\epsilon_p (\rho_w - \rho_p) dz$ mniejszy od ciężaru wody, która by wypełniła rurę do tej samej wysokości.

Ciśnienie na wysokości wlotu powietrza do mieszalnika jest o

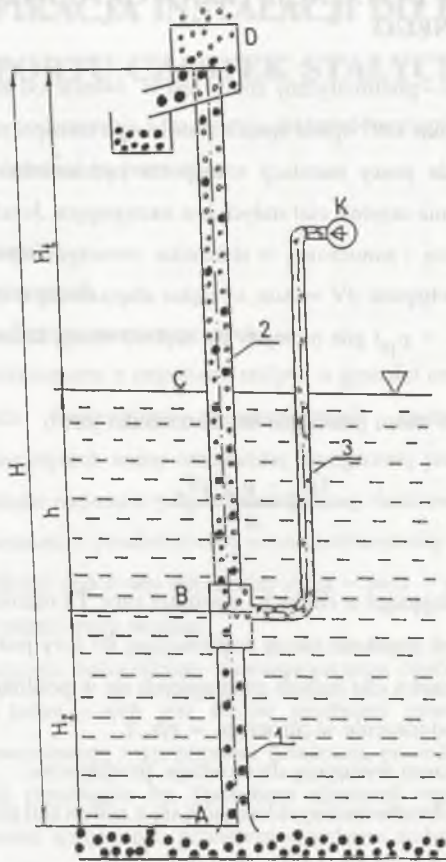
$$\frac{(\rho_w - \rho_p) gV_p}{A}$$

mniejsze od ciśnienia panującego w cieczy na zewnątrz rury. Ta różnica ciśnień powoduje ruch cieczy w rurze. Jeżeli prędkość cieczy dopływającej do rury jest dostatecznie duża, to powoduje unoszenie ziaren ciał stałych znajdujących się w pobliżu otworu wlotowego i następnie ich łączne podnoszenie w rurociągu – rys. 1.

W instalacji transportowej występują dwa rodzaje przepływów:

- przepływ cieczy lub hydromieszanki składającej się z ziaren ciał stałych i wody poniżej wlotu powietrza,
- przepływ mieszaniny wodno–powietrznej lub mieszaniny wody, ziaren ciał stałych i powietrza powyżej wlotu powietrza.

Rurociąg transportowy jest wprowadzony do zbiornika z wodą i materiałem ziarnistym w ten sposób, że jego wlot dotyka lub znajduje się w niewielkiej odległości od materiału ziarnistego.



Rys. 1. Schemat instalacji transportu hydrauliczno-pneumatycznego:
 A – wlot do instalacji, B – mieszalnik, C – poziom cieczy na zewnątrz rurociągu,
 D – wylot z instalacji – oddzielacz powietrza, K – kompresor, H – całkowita
 wysokość instalacji, H_1 – wysokość transportowa, H_2 – wysokość transportu
 dwufazowego (odcinek pasywny), 1 – rurociąg dwufazowego przepływu,
 2 – rurociąg trójfazowego przepływu, 3 – rurociąg sprężonego powietrza

Fig. 1. The infrastructure of hydraulic-pneumatic transport:
 A – input, B – mixer, C – level of the fluid outside the pipeline, D – output –
 air separator, K – air compressor, H – total height of the installation,
 H_1 – transportation height, H_2 – height of 2-phase transport (passive section),
 1 – 2-phase flow pipeline, 2 – 3-phase flow pipeline, 3 – compressed air
 pipeline

Jeżeli do rurociągu transportowego doprowadzone zostanie sprężone powietrze, to przy dopływie niewielkiej jego ilości następuje podniesienie słupa wody w rurociągu transportowym na wysokość odpowiadającą równości ciśnień. Jeżeli wysokość ta jest mniejsza od długości rurociągu nad zwierciadłem wody (wysokość transportowa), to wtedy w rurociągu pionowym powstają tylko zawirowania, bez wypływu wody.

Wzrost ilości dopływającego powietrza powoduje podniesienie poziomu mieszaniny wodno-powietrznej aż do wylotu z rurociągu i można obserwować transport wody z małymi prędkościami. Dalsze zwiększenie ilości sprężonego powietrza wywołuje przyrost prędkości wody i unoszenie materiału ziarnistego z dna zbiornika. Jeżeli prędkość ta nie jest dostatecznie duża, to ziarna unoszą się tylko z dna zbiornika i opadają. Przy dalszym wzroście ilości powietrza obserwuje się transport ziaren stałych z dna zbiornika.

Przy wtłoczeniu dużej ilości powietrza do rurociągu następuje gwałtowny przyrost prędkości, z którą wiążą się duże straty energetyczne przepływu oraz zajęcie coraz większej części przekroju rurociągu przez powietrze, co prowadzi do zmniejszenia objętościowego przepływu wody, a w granicznym przypadku do przerwania pracy instalacji. Istnieje więc takie ilościowe natężenie przepływu, przy którym wydajność i sprawność instalacji osiągają wartości maksymalne.

2.2. PRZEGLĄD KONSTRUKCJI MIESZALNIKÓW

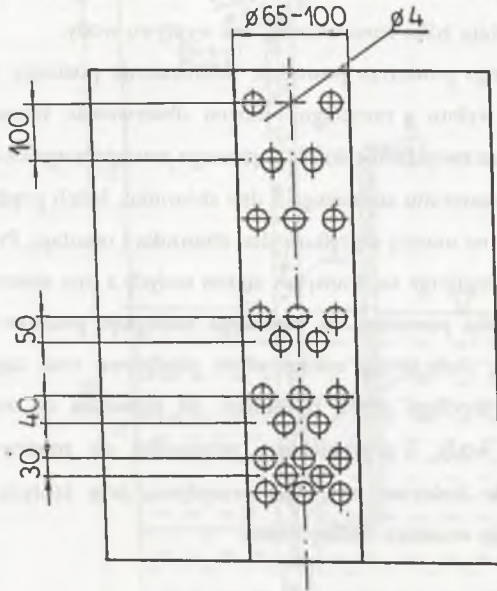
Konstrukcja mieszalnika powinna się cechować:

- dużą niezawodnością pracy,
- prostotą konstrukcji,
- pełnym wymieszaniem wody z powietrzem,
- równomiernością procesu transportu cząstek stałych, instalacji,
- dużą trwałością i odpornością na zużycie,
- małymi gabarytami i małym ciężarem.

Można powiedzieć, że istnieje prawie tyle rozwiązań konstrukcyjnych mieszalników, ile pracujących instalacji. Wiąże się to bowiem z przeznaczeniem instalacji (zastosowanie do konkretnych warunków i transportowanych mediów) oraz indywidualnymi koncepcjami konstruktorów czy pracowników prowadzących badania naukowe.

Na rys. 2 przedstawiono rozwiązanie opisane w pracach [20,69], w których przewód powietrzny o średnicy 65...100 mm i długości (3...4) D znajduje się wewnątrz rurociągu transportowego.

Przykładowy sposób rozmieszczenia otworów w przewodzie powietrznym przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Mieszalnik w postaci rury perforowanej umieszczonej wewnątrz rury transportowej
Fig. 2. The mixer in the form of perforated pipe placed inside the transport pipe

Średnica otworów i ich ilość wynika z warunku zapewnienia prędkości wypływu powietrza w przedziale 2...3 m/s. Wysokość strat w takim mieszalniku określa się z zależności [69]:

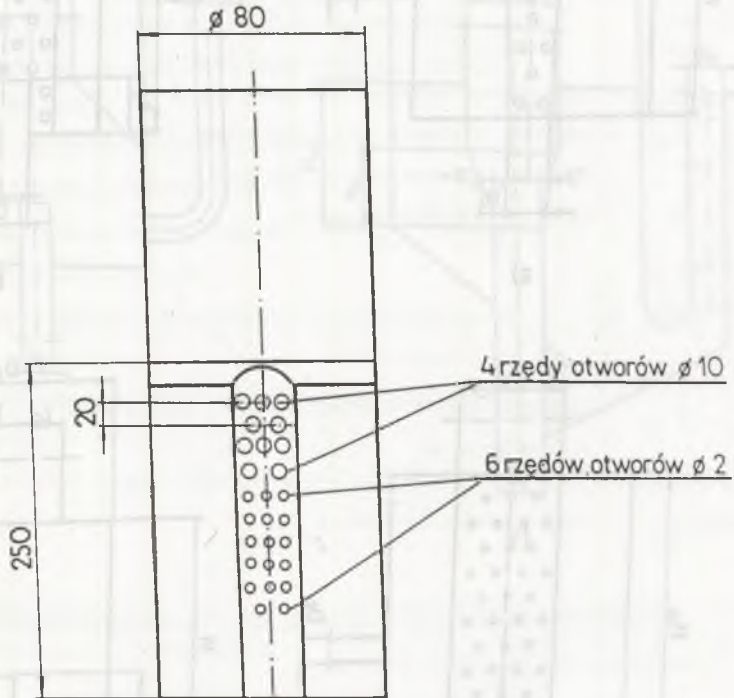
$$h = \frac{v_c^2 \rho_c}{2g\rho_m} \left(\frac{1}{C^2} - 1 \right) \quad [m]$$

gdzie:

- v_c – prędkość cieczy na wejściu do mieszalnika, [m/s],
- ρ_c – gęstość cieczy, [kg/m³],
- ρ_m – gęstość mieszaniny w rurze transportowej, [kg/m³],
- $C = 0.64$ – współczynnik, [-].

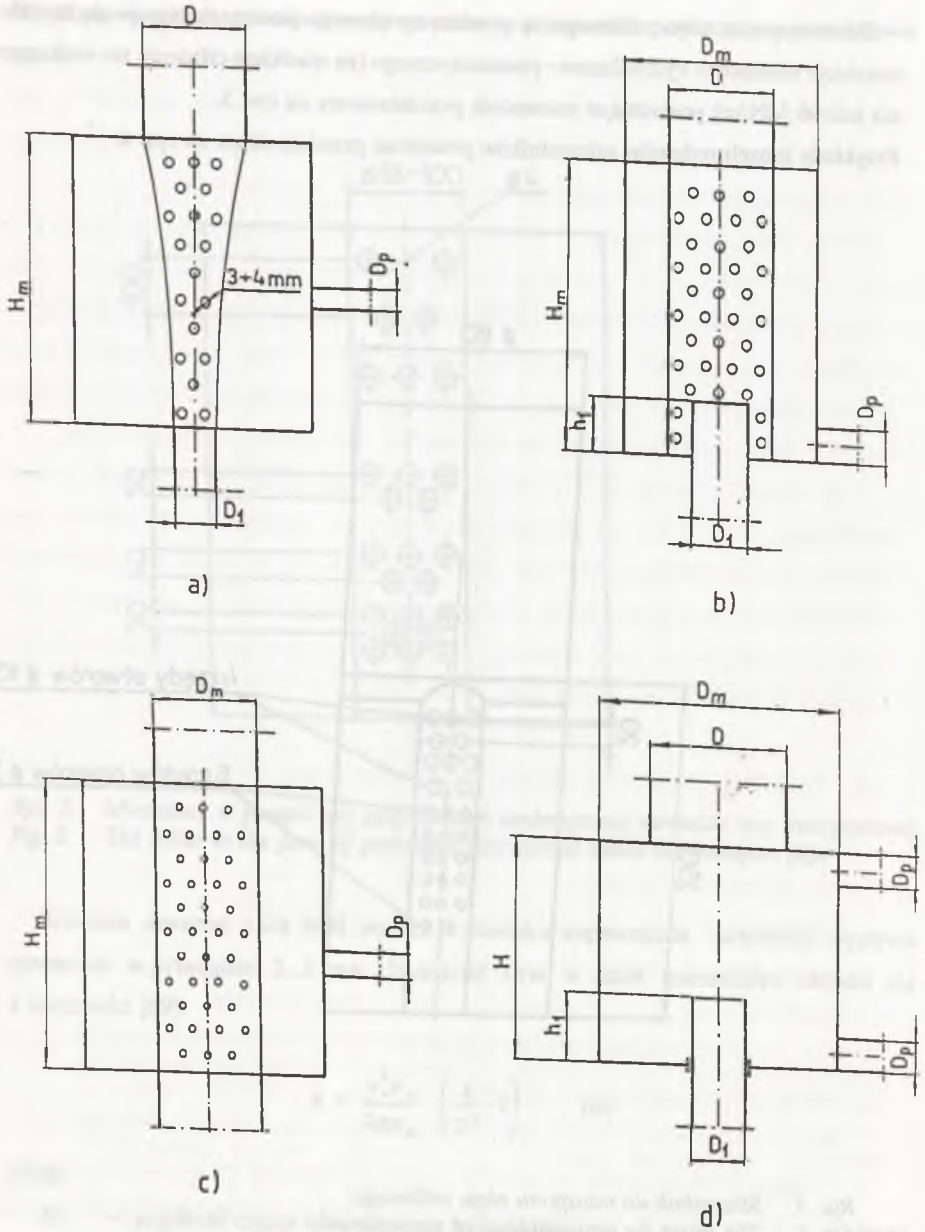
Do transportu oleju roślinnego za pomocą sprężonego powietrza stosuje się krótkie instalacje transportu hydrauliczno-pneumatycznego (ze spadkiem ciśnienia nie większym niż 0.0196 MN/m^2) posiadające mieszalnik przedstawiony na rys. 3.

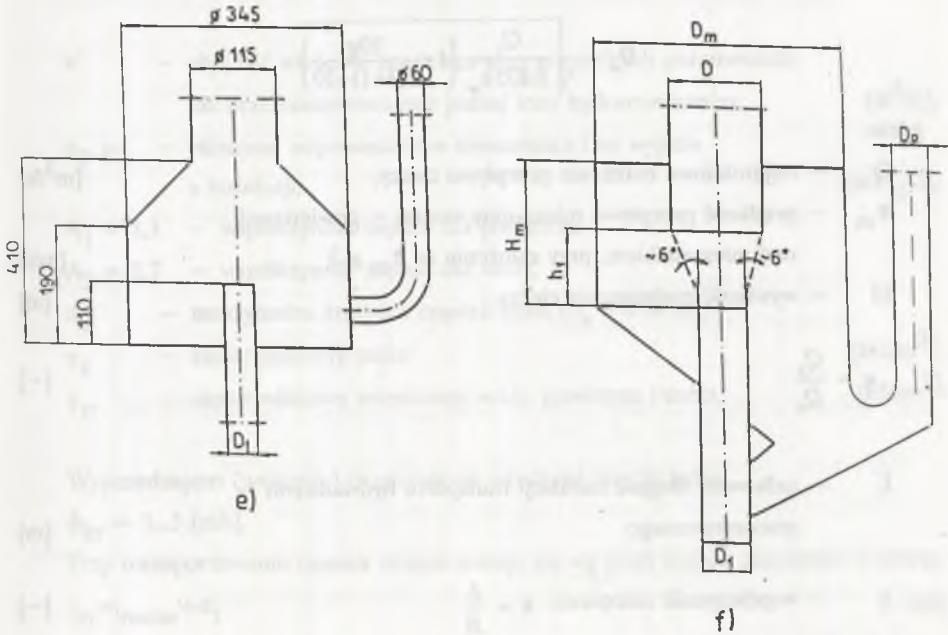
Przykłady innych rodzajów mieszalników powietrza przedstawiono na rys. 4.



Rys. 3. Mieszalnik do transportu oleju roślinnego

Fig. 3. The mixer for transportation of vegetable oil





Rys. 4. Przykładowe konstrukcje mieszalników:
 a) paraboliczny perforowany,
 b) perforowany ze zmienną średnicą rury transportowej,
 c) perforowany ze stałą średnicą rury transportowej,
 d) z dolnym i górnym doprowadzeniem powietrza,
 e) o zmiennym przekroju komory mieszalnika,
 f) z recyrkulacją cząstek stałych

Fig. 4. Examples of different solutions of mixer constructions:
 a) perforated parabolic mixer,
 b) perforated with changing diameter of transportation pipe,
 c) perforated with constant diameter of transportation pipe,
 d) with air input at the top and at the bottom of the mixer,
 e) with changing cross-section of the mixer chamber,
 f) with solid particles recycling

W większości z nich stosunek sumarycznej powierzchni otworów mieszalnika do powierzchni przekroju poprzecznego rury sprężonego powietrza wynosi 2.2...2.4.

Wypływ powietrza dokonuje się z reguły w górnej części mieszalnika, co praktycznie nie daje równomiernego rozplywu powietrza i wymieszania się z cieczą.

Wielkość średnicy mieszalnika proponuje się wyznaczać z zależności empirycznej [69]:

$$D_m = \sqrt{\frac{Q_c}{0.875 v_m} \left(1 + \frac{10q}{L(k-1)+10} \right)}$$

gdzie:

Q_c – objęściowe natężenie przepływu cieczy, [m³/h]

v_m – prędkość przepływu mieszaniny wodno – powietrznej nad mieszalnikiem, przy założeniu że $v_m \geq 3$ [m/s]

H – wysokość podnoszenia cieczy, [m]

$$q = \frac{Q_p}{Q_c} \quad [-]$$

L – całkowita długość instalacji transportu hydrauliczno – pneumatycznego [m]

k – współczynnik zatopienia $k = \frac{L}{H}$ [-]

W elektrociepłowniach stosuje się mieszalnik o kształcie parabolicznym (rys. 4a) [20,69] z otworami o średnicy 0.003...0.004 m.

Minimalną prędkość strumienia mieszaniny w mieszalniku określa się według następującej formuły empirycznej:

$$v_{kr} = 5.2 A_n \sqrt{\frac{d_z \gamma_z}{\gamma_{sr}}} \quad \left[\frac{m}{s} \right]$$

gdzie:

A_n – współczynnik zapasu w miejscu wejścia powietrza do mieszalnika,

$$A_n = \frac{v \frac{P_1}{P_2} A_1 + A_2}{v \frac{P_1 + 1}{P_2}}$$

- V – objętość właściwa powietrza przy normalnych parametrach dla przetransportowania jednej tony hydromieszaniny, [m³/t],
- p₂, p₁ – ciśnienie, odpowiednio w mieszalniku i na wyjściu z instalacji, [m H₂O],
- A₁ = 1.1 – współczynnik zapasu dla powietrza,
- A₂ = 1.7 – współczynnik zapasu dla wody,
- d_z – maksymalna średnica cząstek żuźla (d_z ≈ 0.04 m),
- γ_z – ciężar właściwy żuźla [kG/m³],
- γ_{sr} – ciężar właściwy mieszaniny wody, powietrza i żuźla, [kG/m³].

Wyprzedzająco (wstępnie) przyjmuje się prędkość cząstki żuźla:

$$v_{kr} = 3...5 \text{ [m/s].}$$

Przy transportowaniu cząstek stałych stosuje się wg prof. Gejera zależność, w której:

$$l_m = l_{motw} + d_1 \quad [m]$$

gdzie:

l_{motw} – długość części rury transportowej, na której są otwory robocze, [m]

d₁ – średnica rury transportowej, [m]

Wewnętrzną średnicę korpusu mieszalnika określa się z warunku, że powierzchnia pierścienia powinna być trzy razy większa od powierzchni przekroju rurociągu powietrznego:

$$D_m = \sqrt{3D_p^2 + D_z^2} \quad [m]$$

gdzie:

D_p – średnica rurociągu powietrznego, [m]

D_z – średnica zewnętrzna rury transportowej [m].

Na rys. 4f przedstawiono bardzo często spotykany mieszalnik w kształcie pierścieniowej nasadki obejmującej rurociąg podający i transportowy.

Pole przekroju pierścienia mieszalnika określa się z zależności [69]:

$$A = \frac{qQ_c}{\frac{p_a + \gamma h}{p_a} v_p}$$

gdzie:

$$q = \frac{Q_p}{Q_c}$$

γ – ciężar właściwy cieczy,

[kg/m^3]

h – wysokość zatopienia instalacji

[m].

2.3. PRZEGLĄD KONSTRUKCJI ODDZIELACZY POWIETRZA

Optymalna konstrukcja oddzielacza powietrza powinna zapewniać:

- dokładne oddzielanie powietrza z mieszaniny wody i cząstek stałych,
- ograniczenie prędkości wylotowej powietrza do około 2...3m/s, w celu wyeliminowania wnoszenia z nim kropel wody i bardzo drobnych frakcji ciał stałych,
- niezawodność pracy.

Ograniczenie wnoszenia cząsteczek wody jest szczególnie istotne w przypadku instalacji pracujących w temperaturach ujemnych, ponieważ może prowadzić do oblodzenia, a w skrajnym przypadku nawet do przerwania pracy instalacji.

Niepożądane jest też wnoszenie drobnych cząstek ciała stałego z uwagi na ochronę środowiska naturalnego.

Rozwój konstrukcji oddzielaczy powietrza można prześledzić na przykładzie instalacji do transportu węgla w kopalniach Ukrainy oraz instalacji do transportu żużla w elektrowniach na terenie byłego ZSRR.

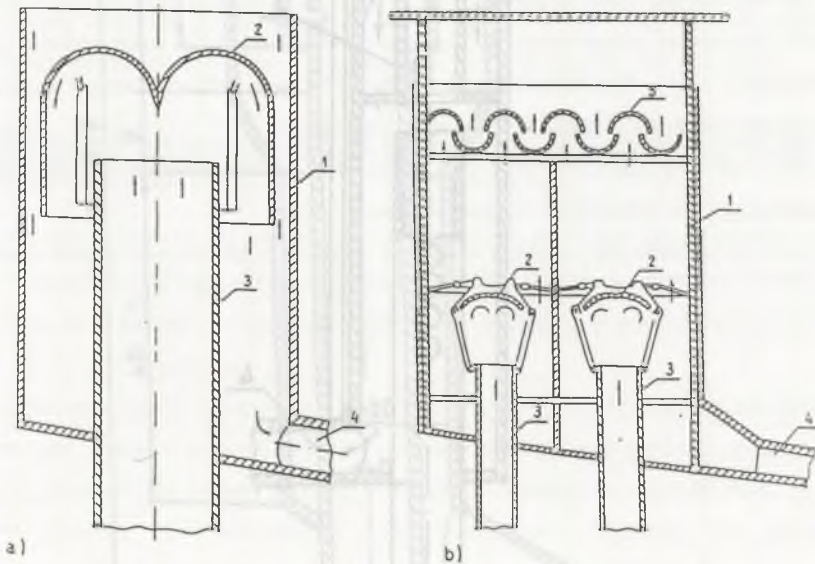
Na rys. 5 przedstawiono rozwój konstrukcji oddzielaczy powietrza na przykładzie instalacji do transportu węgla w kopalni Krasnoarmiejskaja. Przedstawiony na rys. 5a oddzielacz składa się z korpusu 1, blach kierunkowych profilowanych 2, rury transportowej 3. Strumień mieszaniny trójfazowej wychodzącej z rury transportowej 3

uderza w blachy profilowane 2 zmieniając kierunek ruchu o 180° i przez rurę spływową 4 wydostaje się na zewnątrz. Oddzielone powietrze zmienia kierunek na pionowy i unosi się do atmosfery poprzez kierownicę 5.

Oddzielacze powietrza tego typu mają następujące wady:

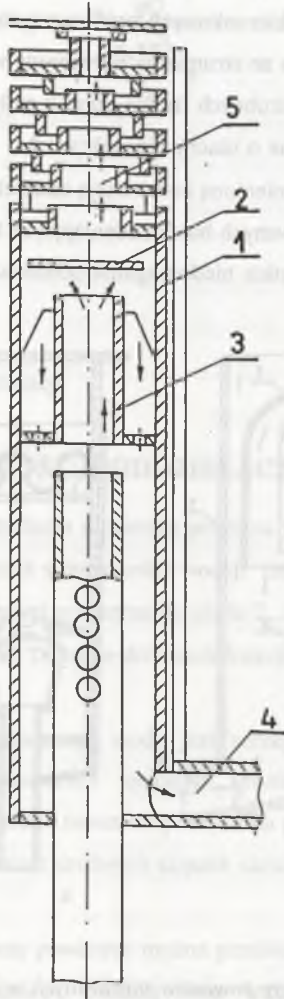
- bardzo duże zużycie blach kierunkowych profilowanych 2,
- słabe oddzielanie powietrza ze strumienia mieszaniny wody i cząstek stałych,
- wynoszenie kropeł wody i drobnych frakcji cząstek stałych,
- silne uderzenia mechaniczne o blachy kierunkowe 2.

Na rys. 5b przedstawiono zmienioną konstrukcję oddzielacza powietrza, który w górnej części posiada "sito" z profilowanych blach zmieniających kierunek przepływu powietrza. Konstrukcja ta posiada wszystkie niedomagania oddzielacza wcześniejszego.

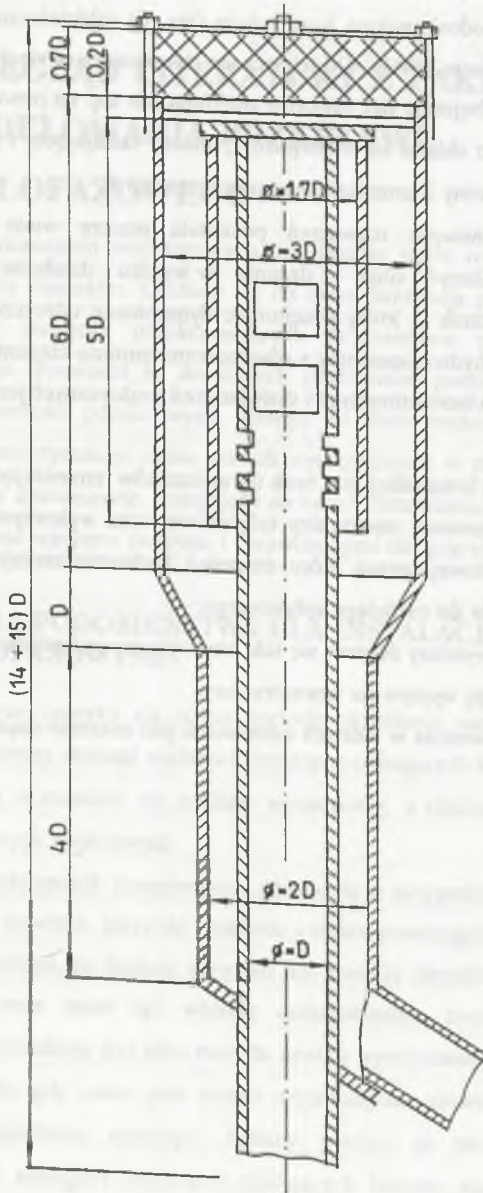


Rys. 5. Przykłady oddzielaczy powietrza stosowanych w kopalni Krasnoarmiejskaja:
 a) z blachami kierunkowymi zmieniającymi kierunek przepływu hydromieszanki o 180° ,
 b) z blachami perforowanymi ułatwiającymi oddzielenie powietrza

Fig. 5. Examples of air separators being used at the "Krasnoarmiejskaja" mine.
 a) with steering plates to change the direction of the flow 180° ,
 b) with perforated plates to facilitate air separation



Rys. 6. Oddzielacz powietrza stosowany w kopalni "50-lecia ZSRR"
 Fig. 6. Air separator being used at "50-Years Of The USSR" mine



Rys. 7. Oddzielacz powietrza nowej konstrukcji
 Fig. 7. Modern construction of air separator

W wyniku przeprowadzonych badań w Instytucie Hydrotransportu Politechniki Donieckiej zaproponowano udoskonaloną konstrukcję (rys. 6) oddzielnika powietrza, zastosowaną w kopalni "50-lecia ZSRR". Oddzielnik ten charakteryzuje się dwuczłonową konstrukcją. Pierwszy człon obejmuje sieć otworów znajdujących się na powierzchni rury transportowej **3**. Drugi człon składa się z korpusu **1**, blachy odbijającej i zmieniającej kierunek ruchu hydromieszanki **2** oraz labiryntu powietrznego **5**.

Konstrukcja ta mimo nowych rozwiązań posiadała jeszcze wiele wad, a do najważniejszych należy zaliczyć silne drgania w wyniku działania strumienia hydromieszanki na ogranicznik **2**, który przejmując dynamiczne uderzenie powoduje wyhamowanie rozpędzonej hydromieszanki z równoczesną zmianą kierunku ruchu.

Wynikiem dalszych badań laboratoryjnych i doświadczeń praktycznych jest konstrukcja przedstawiona na rys. 7.

Najistotniejszą cechą tej konstrukcji jest brak ograniczników zmieniających kierunek ruchu strumienia transportowanej mieszaniny trójfazowej oraz wykorzystanie zespołu otworów w rurze transportowej, przez które strumień hydromieszanki wypływa na zewnątrz i swobodnie opada do rurociągu spływowego.

Ilość otworów oraz ich wymiary dobiera się tak, aby wyhamować prędkość przepływu mieszaniny i spowodować jej wypływ na zewnątrz rury.

Ten typ oddzielnika powietrza w różnych odmianach jest ostatnio często stosowany.



3. PRZEGLĄD LITERATURY Z ZAKRESU MODELOWANIA PRZEPIYU WIELOFAZOWEGO

Przepływ mieszanin wielofazowych jest jeszcze słabo rozpoznany z uwagi na jego skomplikowany charakter. Cechuje się on dużą fluktuacją parametrów przepływowych o wartościach znacznie przekraczających odpowiednie parametry dla przepływu jednofazowego. Prowadzi to do dużych problemów pomiarowych oraz uśrednienia uzyskanych wartości pomiarowych, dlatego też wielu badaczy, nie widząc możliwości dokładnego teoretycznego opisu zjawisk występujących w przepływach wielofazowych, tworzy modele uproszczone, polegające na takim uśrednianiu i upraszczaniu, aby można je było opisywać wzorami znanymi i sprawdzonymi dla przepływów jednofazowych.

3.1. TEORIA PODOBIENSTWA DLA INSTALACJI Z PRZEPIYWAMI WIELOFAZOWYMI

W literaturze spotyka się różne metody określania warunków podobieństwa, tj. związków pomiędzy skalami wielkości fizycznych opisujących badane zjawiska. Wszystkie one oparte są w zasadzie na analizie wymiarowej, a różnice w postępowaniu zależą głównie od danych wyjściowych.

Najogólniejszy sposób postępowania stosuje się w przypadku, gdy nieznan jest model matematyczny zjawiska, kierunki działania i zmian poszczególnych wielkości fizycznych, ale istnieje hipoteza, że badane zjawisko jest funkcją określonych wielkości fizycznych, która to hipoteza musi być właśnie doświadczalnie zweryfikowana. Ten sposób postępowania określany jest jako metoda analizy wymiarowej [39,75].

W przypadku gdy znany jest model matematyczny zjawiska, tj. gdy znane są np. równania różniczkowe opisujące badany proces, to związki pomiędzy skalami poszczególnych wielkości fizycznych opisujących badane zjawisko wyznaczyć można bezpośrednio z równań różniczkowych. Metoda ta jest znana w literaturze jako metoda równań różniczkowych [39,75].

3.2. METODA ANALIZY WYMIAROWEJ

Analizą wymiarową nazywa się tę gałąź matematyki stosowanej, której zadaniem jest wyznaczenie poprawnej pod względem wymiarowym postaci wzorów fizycznych.

Bardzo często rozpatrywane zjawisko jest funkcją wielu zmiennych wymagających bardzo dużej liczby pomiarów.

Rozwiązanie zagadnienia można znacznie uprościć przekształcając podany wzór do postaci bezwymiarowej, tj. takiej, jaką uzyskuje się za pomocą analizy wymiarowej.

3.2.1. Podstawowe twierdzenia analizy wymiarowej

Wymiar każdej wielkości pochodnej może być wyrażony jako iloczyn potęgowej wymiarów wielkości podstawowych.

Wielkości podstawowe nie muszą odpowiadać układowi SI, a przeciwnie, w każdym zadaniu celowy jest wybór nowego układu jednostek podstawowych spośród wielkości charakteryzujących badane zjawisko.

Twierdzenie Buckinghama

Wzorowi fizykalnemu

$$f(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n) = 0 \quad (3.1)$$

zawierającemu n wielkości fizycznych Q odpowiada wzór:

$$F(k_1, k_2, k_3, \dots, k_{n-m}) = 0 \quad (3.2)$$

gdzie m oznacza liczbę wielkości podstawowych wzajemnie niezależnych, dających się wybrać spośród wielkości Q .

k_1, k_2, \dots są bezwymiarowymi iloczynami utworzonymi z wielkości Q . W literaturze wielkości bezwymiarowe k oznaczane są literą π [39].

Zasada Fouriera

Wszystkie prawa fizyki wyrażają się równaniami wymiarowo jednorodnymi. Funkcja jest wymiarowo jednorodna, gdy postać jej nie zależy od układu jednostek miar. Zachodzi wtedy tożsamość:

$$f(a_1 Q_1, a_2 Q_2, a_3 Q_3, \dots, a_n Q_n) = a f(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n) \quad (3.3)$$

natomiast wielkości Q_1, Q_2, \dots, Q_n są wymiarowo niezależne, jeżeli z tożsamości:

$$[Q_1^a] \times [Q_2^b] \times \dots \times [Q_n^c] = 1 \quad (3.4)$$

wynika:

$$a = b = \dots = c = 0 \quad (3.5)$$

Iloczyn określony równaniem (3.4) pozostaje bezwymiarowy wyłącznie w przypadku, gdy każdy wykładnik potęgowy jest równy zero.

Przykład analizy wymiarowej dla przepływu trójwymiarowego

Określając zbiór wielkości Q_i mających wpływ na parametry przepływu mieszaniny dwufazowej, można równanie (3.1) zapisać w postaci:

$$f(Q_p, Q_w, D, L, h, \bar{v}_m, \rho_m, \nu, i, t) = 0 \quad (3.6)$$

gdzie:

Q_p	- objętościowe natężenie przepływu powietrza	$[m^3 s^{-1}]$,
Q_w	- objętościowe natężenie przepływu wody	$[m^3 s^{-1}]$,
D	- średnica rurociągu	$[m]$,
L	$= H_1 + h$	$[m]$,
h	- wysokość zatopienia	$[m]$,
\bar{v}_m	- średnia prędkość mieszaniny	$[ms^{-1}]$,
ρ_m	- gęstość mieszaniny	$[kgm^{-3}]$,
g	- przyspieszenie ziemskie	$[ms^{-2}]$,
ν	- lepkość kinematyczna mieszaniny	$[m^2 s^{-1}]$,
i	- względne opory przepływu	$[Pam^{-1}]$,
t	- czas	$[s]$.

Za wielkości podstawowe przyjmuje się następujące trzy parametry:

$$\begin{aligned} D ; [D] &= m^1 kg^0 s^0 \\ \bar{v}_m , [\bar{v}_m] &= m^1 kg^0 s^{-1} \\ \rho_m , [\rho_m] &= m^1 kg^0 s^{-1} \end{aligned} \quad (3.7)$$

które spełniają zależności (3.4) i (3.5).

Z zależności (3.6) i (3.7) wynika, że można utworzyć osiem **bezwymiarowych**, wzajemnie od siebie niezależnych iloczynów K , np. według następujących równań:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= Q_p D^{a_1} v_m^{b_1} \rho_m^{c_1} & K_2 &= Q_w D^{a_2} v_m^{b_2} \rho_m^{c_2} \\
 K_3 &= L D^{a_3} v_m^{b_3} \rho_m^{c_3} & K_4 &= h D^{a_4} v_m^{b_4} \rho_m^{c_4} \\
 K_5 &= g D^{a_5} v_m^{b_5} \rho_m^{c_5} & K_6 &= v D^{a_6} v_m^{b_6} \rho_m^{c_6} \\
 K_7 &= i D^{a_7} v_m^{b_7} \rho_m^{c_7} & K_8 &= t D^{a_8} v_m^{b_8} \rho_m^{c_8}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Układając dla poszczególnych iloczynów równania wymiarowe i rozwiązując je względem wykładników potęgowych dla poszczególnych jednostek (m, s, kg), uzyskuje się następujące postacie iloczynów K :

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \frac{Q_p}{D^2 v_m} & ; & & K_2 = \frac{Q_w}{D^2 v_m} \\
 K_3 &= \frac{L}{D} & ; & & K_4 = \frac{h}{D} \\
 K_5 &= \frac{g D}{v_m^2} & ; & & K_6 = \frac{v}{D v_m} \\
 K_7 &= \frac{i D}{v_m^2 \rho_m} & ; & & K_8 = \frac{t v_m}{D}
 \end{aligned} \tag{3.81}$$

Przekształcając uzyskane zależności lub wykonując działania algebraiczne, można uzyskać następujące liczby kryterialne:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{Q_p}{Q_w} = \varphi \tag{3.9}$$

$$\frac{K_4}{K_3} = \frac{h}{L} = \alpha \tag{3.10}$$

$$K_5 = \frac{1}{\left(\frac{v_m^2}{g D}\right)} = \frac{1}{Fr} \quad (3.11)$$

$$K_3 \times K_7 = \frac{L}{D} \times \frac{i D}{v_m^2 \rho_m} = \frac{\Delta p}{v_m^2 \rho_m} = E_4 \quad (3.12)$$

$$K_6 = \frac{1}{\left(\frac{D v_m}{\nu}\right)} = \frac{1}{Re} \quad (3.13)$$

Spełnienie wszystkich uzyskanych warunków podobieństwa modelowego jest praktycznie niemożliwe i dlatego w analizie przepływów stosowane są przez badaczy głównie wielkości φ i α .

3.3. CHARAKTERYSTYKA MODELI TEORETYCZNYCH DLA MIESZANIN DWUFAZOWYCH CIECZ – POWIETRZE

Instalacje z przepływem dwufazowym stosowane są od dawna, głównie w przemyśle naftowym [21,24,34,58] oraz przy wypompowywaniu wody z zatopionych kopalni, z otworów wiertniczych, studni itp. (ostatnio stosowano tę metodę w akcji ratowania kopalni soli "Wieliczka").

Z uwagi na bardzo złożoną strukturę przepływającej mieszaniny dwufazowej ciecz – powietrze badacze zmuszeni byli zastosować model uproszczony, w którym zakłada się uśrednioną gęstość mieszaniny ρ_m i prędkość \bar{v}_m , a opory przepływu wyznacza się z równania Darcy'ego–Weisbacha:

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho_m v_m^2}{D 2} \Delta l \quad (3.14)$$

Jedną z najbardziej znanych metod, która przez wiele lat była rozwijana i doskonalona dzięki prowadzonym badaniom na instalacjach laboratoryjnych i przemysłowych, jest teoria W. G. Gejera [17, ..., 23], która również zakłada słuszność równania Darcy'ego – Weisbacha (3.14).

W pierwszym okresie W. G. Gejer przyjmuje wartość hydraulicznego współczynnika oporu λ równą 0,02, by w pracach znacznie późniejszych skorygować go do wartości 0,03.

Bardziej ogólne ujęcie zależności na wydajność instalacji transportu hydrauliczno – pneumatycznego przedstawił L. M. Kozyriackij [33]:

$$Q = 3,46 D^2 \sqrt{\frac{23\varphi \lg\left(\frac{\rho gh + Pa}{Pa}\right) - H}{(1+\varphi^2) + 1,1\lambda(H+h) \left[1 + 23\varphi \frac{1}{h} \lg\left(\frac{\rho gh + Pa}{Pa}\right)\right]^2 \frac{D_w^4}{D^5}}} \quad (3.15)$$

gdzie:

$$\varphi = \frac{Q_2}{Q_w}$$

- h – głębokość zatopienia mieszalnika, [m]
- H – wysokość instalacji, [m]
- D – średnica ekwiwalentna, [m]
- D_w – średnica wylotowa, [m]
- ρ – gęstość wody, [kg m^{-3}]
- Pa – ciśnienie atmosferyczne. [Pa]

A. P. German w pracy [24] wykazał, że współczynnik oporu λ nie jest stały co do wartości i opisuje go zależnością:

$$\lambda = \frac{1}{2} g \frac{D}{v_m^2} \frac{\sqrt{(\alpha-x)x}}{1-x} - \frac{D}{H} \quad (3.16)$$

gdzie:

- \hat{v}_m – prędkość hydromieszanki, [ms^{-1}]
- H – długość rurociągu transportowego, [m]
- D – średnica rurociągu transportowego, [m]
- α – współczynnik zatopienia,
- x – stopień rozprężania opisany zależnością

$$x = \frac{(1+G)h}{GL_1+h} \quad (3.17)$$

gdzie:

h – głębokość zatopienia mieszalnika, [m]

L_1 – praca rozprężania powietrza, [J]

$$G = \frac{Q_p \gamma_p}{Q_w \gamma_w}$$

Wprowadzając oznaczenia

$$\frac{1}{2} g = k, \quad \frac{D}{v_m^2} = z, \quad \sqrt{\frac{(\alpha-x)x}{1-x}} = y^2 \quad (3.18)$$

A. P. German uzyskał równanie:

$$\lambda = ky^2z - \frac{D}{H} \quad (3.19)$$

opisujące zależność współczynnika oporu λ od parametrów geometrycznych i przepływowych instalacji [24]. Nie podaje jednak reżimów pracy instalacji, dla których ważne są wyprowadzone zależności, co uniemożliwia jego praktyczne wykorzystanie.

3.4. AKTUALNY STAN BADAŃ I METOD OBLICZANIA PARAMETRÓW PRZEPIYWU W INSTALACJACH TRANSPORTU HYDRAULICZNO – PNEUMATYCZNEGO

Szczegółowa analizę metod obliczeniowych tego typu instalacji przedstawiono w pracy [48], dlatego też w tym miejscu ograniczono się do krótkiego podsumowania najważniejszych i częściej stosowanych teorii.

We wszystkich rozważaniach teoretycznych przyjęto założenia upraszczające sprowadzające się do zastąpienia hydromieszanki ekwiwalentną cieczą jednorodną.

Uproszczenie takie nie pozwala uwzględnić dokładnie wpływu sił tarcia poszczególnych faz i wzajemnego ich oddziaływania na wielkość strat energetycznych przepływu.

W ogólniejszej nieco teorii Webera [71,72,73] uwzględnia się siły tarcia poszczególnych faz, lecz pominięto także zjawiska poślizgu pomiędzy fazami i wprowadzono skomplikowaną, a mało dokładną metodę iteracyjną określania procentowych zawartości poszczególnych faz wzdłuż rurociągu.

Teoria Chaziteodorou i Wienena [7,8] nie uwzględnia sił tarcia cząstek stałych o ścianki rurociągu i nie podaje sposobu wyznaczenia gradientu ciśnienia mieszaniny wodno–powietrznej, co podane równania czyni nieprzydatnymi do praktycznych obliczeń.

Przedstawione metody Gejera i Drzwarszejszwiliego oraz innych badaczy z byłego ZSRR [14,17...23] ograniczają się do mieszanin wodno–powietrznych. Wprowadzone współczynniki korygujące przy adaptacji tych metod do mieszanin trójfazowych wymagają pomiarów na geometrycznie podobnych instalacjach przemysłowych. W metodach tych nie podaje się również wpływu zjawisk w części pasywnej rurociągu na parametry pracy całej instalacji.

Na szczególnie podkreślenie zasługuje fakt, że wszystkie z wyżej wymienionych teorii wymagają znajomości szeregu współczynników odniesionych do mieszanin trójfazowych. Współczynniki te można wyznaczyć tylko eksperymentalnie.

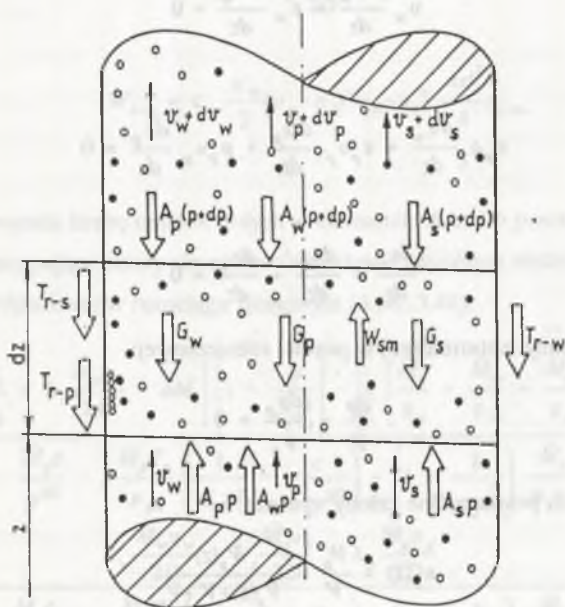
Dokładne wyznaczenie współczynników obliczeniowych i korygujących nie jest możliwe ze względu na ich zależności od szeregu parametrów przepływu mieszaniny trójfazowej i parametrów konstrukcyjnych instalacji. W pracach badaczy radzieckich [10,11,17...23,33,34,36...38] przyjęto, że rozkład ciśnienia wzdłuż instalacji od mieszalnika do oddzielacza powietrza ma charakter liniowy.

Dokładniejsze modele teoretyczne przepływu mieszanin wielofazowych przedstawiono w pracach [40,42,47,...,54], w których nie wprowadzono modeli ekwiwalentnych cieczy, lecz rozpatrzono przepływ mieszaniny z uwzględnieniem faz. Wyjątek stanowiło wprowadzenie, przy określeniu sił wewnętrznych działających na cząstki stałe, ekwiwalentnej cieczy jednorodnej (woda i powietrze), której przyporządkowano zastępczą gęstość ρ_m i prędkość \dot{v}_m [53].

W rozważaniach przyjęto jeszcze następujące założenia;

- cząstki stałe, powietrze i woda przemieszczają się równoległe do osi rurociągu ze stałymi prędkościami niezależnymi od czasu w danym przekroju, ale zmieniającymi się wzdłuż rurociągu. Jest to tzw. przepływ quasi-ustalony,
- transport hydrauliczno-pneumatyczny jest procesem izotermicznym,
- w rozważaniach pominięto rozpuszczalność powietrza w wodzie,
- powietrze przemieszcza się w rurociągu w postaci pęcherzyków z prędkością:

$$v_p = v_w + \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_p} \frac{\rho_w}{\rho_p} d_p g} \quad (3.20)$$



Rys. 8. Rozkład sił działających na element hydromieszanki trójfazowej

Fig. 8. Disposition of forces loaded on a single particle of 3-phase mixture

Rozważając siły działające na element hydromieszanki o przekroju A i długości dz (rys. 8), ułożono równanie równowagi sił w postaci:

$$\dot{M}_p d\dot{\theta}_p + \dot{M}_w d\dot{\theta}_w + \dot{M}_s d\dot{\theta}_s + A d p + G_s + G_w + G_p + T_{rs} + T_{rw} + T_{rp} = 0 \quad (3.21)$$

Wykorzystując następnie założenie o mieszaninie zastępczej, ułożono równanie sił działających na cząstki stałe w tym elemencie:

$$\varepsilon_s A dp + G_s + \dot{M}_s \times \frac{dv_s}{dt} + T_{r-s} + W_{s-m} = 0 \quad (3.22)$$

które uzupełniono równaniami ciągłości w postaci różniczkowej:

$$v_s \frac{d\varepsilon_s}{dz} + \varepsilon_s \frac{dv_s}{dz} = 0 \quad (3.23)$$

$$v_w \frac{d\varepsilon_w}{dz} + \varepsilon_w \frac{dv_w}{dz} = 0 \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_p \rho_p \frac{dv_w}{dz} + \varepsilon_p v_p \frac{d\rho_p}{dz} + \rho_p v_p \frac{d\varepsilon_p}{dz} = 0 \quad (3.25)$$

$$\frac{d\varepsilon_z}{dz} + \frac{d\varepsilon_w}{dz} + \frac{d\varepsilon_s}{dz} = 0 \quad (3.26)$$

i równanie przemiany izotermicznej w postaci różniczkowej:

$$\frac{dp}{p} - \frac{d\rho_p}{\rho_p} = 0 \quad (3.27)$$

W równaniach tych poszczególne człony wynoszą:

$$\varepsilon_p(z) = \frac{V_p}{V} = \frac{V_p(z)}{V_p(z) + V_s + V_w} \quad (3.28)$$

$$\varepsilon_s(z) = \frac{V_s}{V} = \frac{V_s}{V_p(z) + V_s + V_w} \quad (3.29)$$

$$\varepsilon_w(z) = \frac{V_w}{V} = \frac{V_w}{V_p(z) + V_s + V_w} \quad (3.30)$$

$$G_p = A \varepsilon_p \rho_p g dz \quad (3.31)$$

$$G_w = A \varepsilon_w \rho_w g dz \quad (3.32)$$

$$G_s = A \varepsilon_s \rho_s g dz \quad (3.33)$$

$$T_{r-p} = \lambda_p \frac{v_p^2}{2D} \rho_p \varepsilon_p A dz \quad (3.34)$$

$$T_{r-w} = \lambda_w \frac{v_w^2}{2D} \rho_w \varepsilon_w A dz \quad (3.35)$$

$$T_{r-s} = \lambda_s \frac{v_s^2}{2D} \rho_s \varepsilon_s A dz \quad (3.36)$$

$$W_{s-m} = c_m \frac{\rho_m}{2} (v_m - v_s) |v_m - v_s| \frac{\pi d_s^2}{4} n_{s-m} \quad (3.37)$$

gdzie n_{s-m} wyraża liczbę cząstek stałych w elemencie Adz . Po przekształceniach można wyznaczyć następujące cztery równania różniczkowe zwyczajne nieliniowe opisujące ruch mieszaniny trójfazowej w rurociągu pionowym (3.38...3.41).

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\left[g \frac{\dot{M}_s}{v_s} + \lambda_s \frac{\dot{M}_s v_s}{2D} - a \dot{M}_s \right] \left[1 - \frac{b}{r_s v_s^2} \right] - \left[g \left(\frac{\dot{M}_p}{v_p} + \frac{\dot{M}_w}{v_w} + \frac{\dot{M}_s}{v_s} \right) \right]}{A - \frac{\dot{M}_p c}{p^{5/3}} - b \frac{\dot{M}_p p_n}{\rho_{pn}} \left(\frac{1}{v_p p^2} - \frac{c}{v_p^2 p^{8/3}} \right) - \left(1 - \frac{b}{\rho_s v_s^2} \right) \frac{\dot{M}_s}{\rho_s v_s}} + \frac{\lambda_w \frac{\dot{M}_w v_w}{2D} + \lambda_s \frac{\dot{M}_s v_s}{2D} + \lambda_p \frac{\dot{M}_p v_p}{2D}}{A - \frac{\dot{M}_p c}{p^{5/3}} - b \frac{\dot{M}_p p_n}{\rho_{pn}} \left(\frac{1}{v_p p^2} - \frac{c}{v_p^2 p^{8/3}} \right) - \left(1 - \frac{b}{\rho_s v_s^2} \right) \frac{\dot{M}_s}{\rho_s v_s}} \quad (3.38)$$

$$\frac{dv_s}{dz} = - \frac{1}{\rho_s v_s} \frac{dp}{dz} - \frac{g}{v_s} - \frac{\lambda_s v_s}{2D} + a \quad (3.39)$$

$$\frac{dv_w}{dz} = \frac{b}{\dot{M}_p + \dot{M}_w} \left[\frac{\dot{M}_s}{\rho_s v_s^2} \frac{dv_s}{dz} + \frac{\dot{M}_p p_n}{\rho_{pn}} \left(\frac{1}{v_p p^2} - \frac{c}{v_p^2 p^{8/3}} \right) \frac{dp}{dz} \right] \quad (3.40)$$

$$\frac{dv_p}{dz} = \frac{dv_w}{dz} - \frac{c}{p^{5/3}} \frac{dp}{dz} \quad (3.41)$$

gdzie:

$$a = \frac{3}{4} c_m \frac{1}{d_s \rho_s v_s} \frac{\dot{M}_{pn} + \dot{M}_w}{\left(\frac{p_n}{p} Q_{pn} + Q_w \right)} \left(\frac{Q_{pn} \frac{p_n}{p} + Q_w}{A \frac{M_z}{\rho_s v_s}} - v_s \right)^2$$

$$b = \frac{\dot{M}_p + \dot{M}_w}{\frac{\dot{M}_w}{\rho_w v_w^2} + \frac{\dot{M}_p p_n}{\rho_{pn} v_p^2}} ; \quad c = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{c_p} \frac{\rho_w}{\rho_{pn}} d_{pn} g p_n^{4/3}}$$

Opracowano również model uproszczony przepływu hydromieszanki trójfazowej, traktując ją jako mieszaninę jednofazową, zastępując siły tarcia $T_{r-p} + T_{r-w} + T_{r-s}$ jedną siłą tarcia mieszanki:

$$T_{rm} = \frac{\lambda_m v_m \rho_m A dz}{2D} \quad (3.42)$$

gdzie:

$$v_m(z) = \frac{p_n Q_{pn} + p(z)(Q_w + Q_s)}{A p(z)} \quad (3.43)$$

$$\rho_m(z) = \frac{\rho_{pn}Q_{pn} + \rho_s Q_s + \rho_w Q_w}{\frac{\rho_n Q_{pn}}{p(z)} + Q_w + Q_s} \quad (3.44)$$

$$\lambda_m \approx \lambda_w$$

Po przekształceniach uzyskuje się równanie (3.45) na wysokość podnoszenia transportu hydrauliczno-pneumatycznego w zależności od ciśnienia powietrza w mieszalniku, gęstości, objętościowego natężenia przepływu powietrza i hydromieszaniny oraz średnicy rurociągu transportowego. Stałą całkowania C_1 wyznacza się z warunku, że dla wylotu rurociągu $p = p_n$.

Wadą tej metody jest przyjęcie jednej średnicy pęcherzyków powietrza i jego nieograniczonego wzrostu, podczas gdy w instalacji obserwuje się różne średnice oraz ich rozpady na mniejsze. Nie opisuje też różnych kierunków przemieszczeń poszczególnych faz, ruchów powrotnych – opadających oraz stanów nieustalonych.

$$z = \frac{a}{bM_m} p + \frac{2D}{\lambda_w} \ln|p| + \frac{1}{2bM_m} \left(c - \frac{2DbM_m}{\lambda_w} + \frac{\lambda_w a^2 c}{A^2 Db} \right) \times$$

$$\times \left[d + \left(\frac{2bM_m - \frac{\lambda_w c}{D}}{\frac{AB}{a} \left(c - \frac{2Db}{\lambda_w} M_m \right) + \frac{\lambda_w ac}{AD}} - \frac{4\lambda_w a A}{2gA^2 D + \lambda_w a^2} \right) \times f \right] \quad (3.45)$$

gdzie:

$$a = \frac{Q_s}{C_1}$$

$$b = -g - \frac{\lambda_w}{2A^2 D} \left(\frac{Q_s}{C_1} \right)^2$$

$$c = \phi Q_p \rho_n \frac{1-C_t}{C_t}$$

$$d = \ln \left(\left(\bar{r} + \frac{2\lambda_w ac}{2gA^2D + \lambda_w a^2} \right) + \frac{g\lambda_w c^2}{2A^2Db^2} \right)$$

$$f = \frac{2b}{\sqrt{\frac{2g\lambda_w}{D}}} \operatorname{arctg} \frac{p + \frac{g\lambda_w ac}{2gA^2D + \lambda_w a^2}}{\frac{c}{2bA} \sqrt{\frac{2g\lambda_w}{D}}}$$

$$\dot{M}_m = Q_s \left[\frac{1-C_t}{C_t} (\phi \rho_{pn} + \rho_w) + \rho_s \right]$$

$$\phi = \frac{Q_{pn}}{Q_w}$$

3.5. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonego rozpoznania literaturowego wynika, że do tej pory nie ma metody (modelu) teoretycznej opisującej ruch mieszaniny trójfazowej w taki sposób, aby ujmowała jego złożoność i strukturę, a w szczególności:

- różnorodność średnic powietrza, których wielkość ma istotny wpływ na charakter przepływu, strukturę strumienia mieszaniny i siłę nośną,
- wielokierunkowość ruchów poszczególnych faz, włącznie z ruchami powrotnymi i wirowymi, które obserwuje się w pracujących instalacjach,
- zmienność średnic pęcherzyków powietrza, a w szczególności ich rozpad na mniejsze i łączenie w większe przy udziale cząstek pozostałych dwóch faz,

- opis zmian poszczególnych parametrów przepływowych w stanach nieustalonych, do których można zaliczyć: rozruch instalacji, doprowadzenie małej lub zbyt dużej ilości sprężonego powietrza.

Tylko metoda, która potrafi opisać powyższe zagadnienia, może służyć do prawidłowego wyznaczania parametrów pracy instalacji i jej optymalizacji.

4. CEL, TEZA I METODA PRACY

Z przedstawionych rozważań oraz analiz dotyczących badań i modelowania przepływu mieszanin dwu- i trójfazowych wynika, że mieszaniny te tworzą niejednorodną strukturę, zmieniającą się stochastycznie w czasie i przestrzeni. Szczególnie trudne do uchwycenia i opisu są zjawiska rozpadu i łączenia pęcherzyków powietrza oraz powstawania konglomeratów –supercząstek – składających się z powietrza, wody i cząstek stałych lub ich dowolnych kombinacji.

Z przeprowadzonych badań i obserwacji wynika, że wymiary pęcherzyków powietrza silnie wpływają na charakter mieszaniny wodno–powietrznej, a dalej na parametry przepływu i transportu cząstek stałych.

Dotychczasowe metody badań eksperymentalnych pozwalały otrzymać wyniki w postaci uśrednionych wartości współczynników uproszczonych modeli teoretycznych. Modele te i wyznaczone współczynniki z uwagi na uproszczenia nie odzwierciedlają rzeczywistych procesów, a ich transformacja na inne instalacje nie może być dokonywana automatycznie.

Celem pracy jest przeprowadzenie kompleksowych badań laboratoryjnych umożliwiających dokładne rozpoznanie i zarejestrowanie zjawisk występujących w przepływach wielofazowych, które z kolei umożliwią opracowanie modelu (teoretycznego) matematycznego umożliwiającego szczegółową analizę przepływu mieszanin wielofazowych.

1.1. WNIOSKOWANIE

4.1. TEZA PRACY

Na podstawie dotychczasowego stanu wiedzy oraz przedstawionych w poprzednim rozdziale badań można stwierdzić, że istnieje możliwość zamodelowania przepływu mieszanin wielofazowych w pionowym rurociągu.

Model ten ma na celu opisywanie zmian poszczególnych parametrów ruchu w dowolnych stanach pracy, a mianowicie:

- w stanie rozruchu instalacji,
- w stanie pracy ustalonej,
- w innych stanach nieustalonych spowodowanych np. nadmiarem sprężonego powietrza czy dostarczeniem nadmiernej liczby cząstek stałych.

Wykorzystanie możliwości modelu teoretycznego pozwoli na przeprowadzenie optymalizacji parametrów konstrukcyjnych i wydajnościowych instalacji oraz maksymalizacji efektywności pracy.

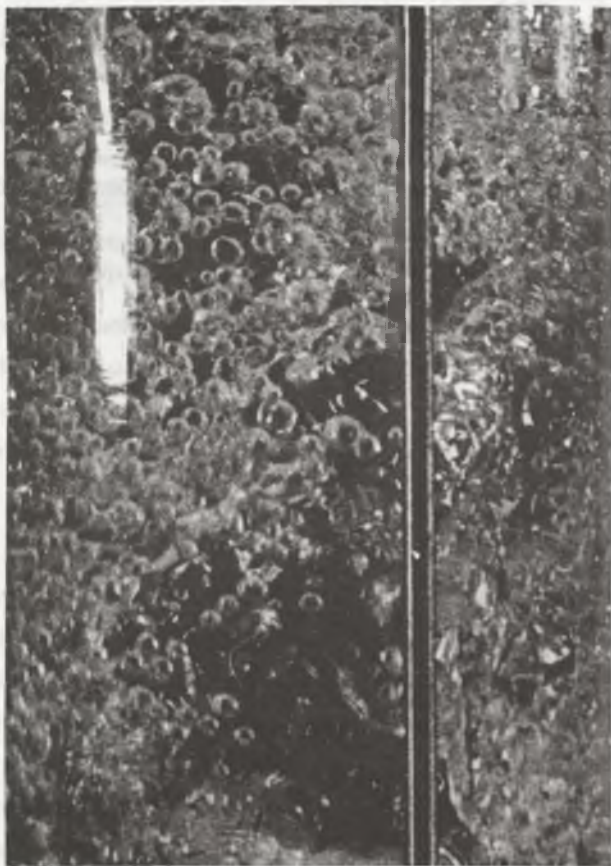
4.2. METODA PRACY

Aby zrealizować przedstawiony cel pracy, zbudowano instalację o wysokości całkowitej 11 m i wymiennych średnicach rury transportowej od 0.05 m do 0.1 m, umożliwiającą obserwację i rejestrację:

- przepływu modelowych cząstek stałych o gęstości mniejszej od gęstości wody, w wodzie stojącej i ruchomej,
- przepływu pojedynczych pęcherzyków powietrza w wodzie stojącej i przepływającej z zadaną prędkością,
- rozkładu średnic pęcherzyków powietrza w wodzie,
- struktury mieszaniny trójfazowej,
- prędkości unoszenia i transportu cząstek stałych o różnym kształcie i ciężarze w mieszaninie wodno–powietrznej,
- optymalizację konstrukcji podstawowych zespołów instalacji.

5. BADANIE PARAMETRÓW MIESZANINY WODNO – POWIETRZNEJ

Dotychczasowe badania własne [50,53] oraz dokumentacja filmowa i zdjęcia wskazują, że pęcherzyki powietrza w czasie hydrotransportu posiadają ograniczoną średnicę, która nie przekracza wartości 10 mm. Można się o tym przekonać np. z obserwacji zdjęć (rys. 9...14) przedstawiających pionowy transport agalitu o średnicach 0.1...8 mm w rurociągu o średnicy 100 mm. Widoczne pęcherzyki powietrza mają średnice o zróżnicowanych wartościach, przy czym ich wielkość zmienia się bardzo silnie w zależności od prędkości przepływającego strumienia, która z kolei jest funkcją ilości doprowadzonego powietrza.



Rys. 9. Widok mieszaniny wodno – powietrznej
Fig. 9. View of an air – water mixture



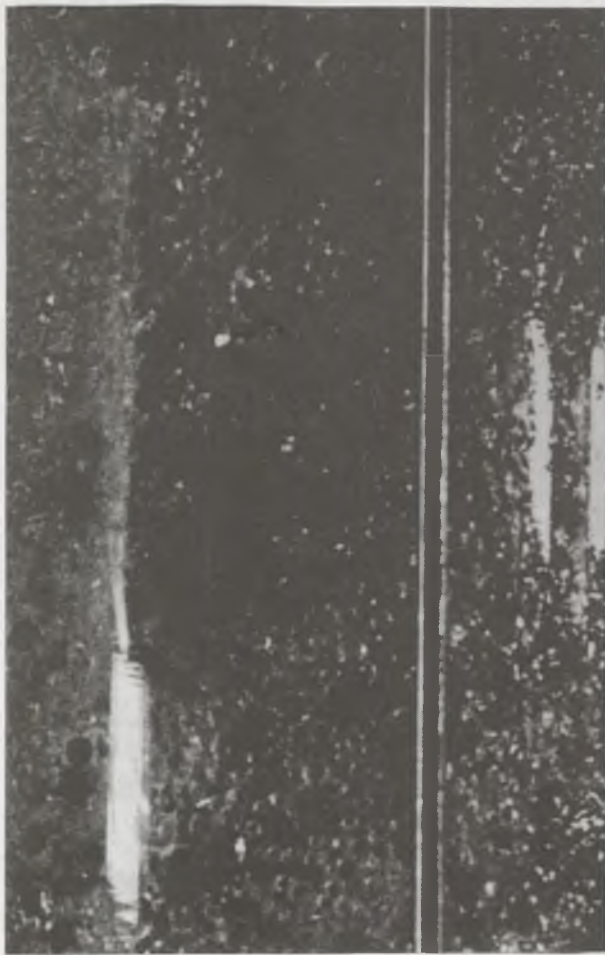
Rys. 10. Widok przepływu mieszaniny wodno-powietrznej z cząstkami agalitu o średnicy 4...5 mm

Fig. 10. View of the flow of an air-water mixture with agalite grains. Diameter of the grains is 4...5 mm

52
E. BADANIE PARAMETRÓW MIESZANINY
WODNO-POWIETRZNEJ



Rys. 11. Widok przepływu mieszaniny wodno-powietrznej z cząstkami agalitu o średnicy 7...8 mm
Fig. 11. View of the flow of an air-water mixture with grains of agalite. Diameter of the grains is 7:8 mm



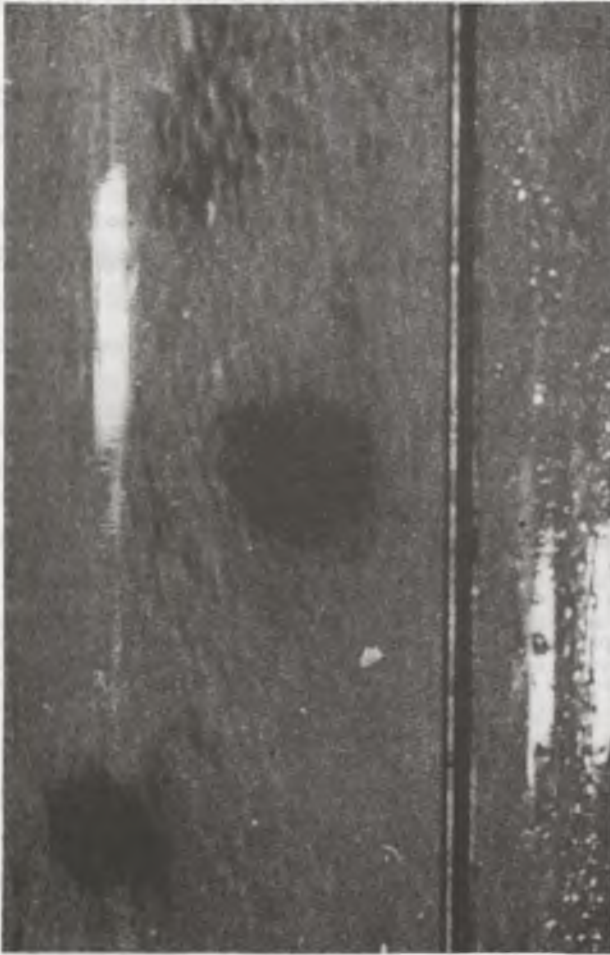
Rys. 12. Widok przepływu mieszaniny wodno-powietrznej z cząstkami agalitu o średnicy 4:5 mm

Fig. 12. View of the flow of an air-water mixture with grains of agalit. Diameter of the grains is 4:5 mm



Rys. 13. Widok przepływu mieszaniny wodno-powietrznej z cząstkami agalitu o średnicy 2:3 mm

Fig. 13. View of the flow of an air-water mixture with grains of agalit. Diameter of the grains is 2:3 mm



Rys. 14. Widok przepływu mieszaniny wodno-powietrznej z cząstkami szklanymi o średnicy 20 mm

Fig. 14. View of the flow of an air-water mixture with glass grains. Diameter of the grains is 20 mm

5.1. TEORETYCZNE PODSTAWY PRZEPLYWU PĘCHERZYKÓW POWIETRZA W WODZIE

Przepływ pęcherzyków powietrza (gazu) przez warstwę cieczy (wody) rozpatrywany jest w wielu zagadnieniach technicznych, a między innymi w inżynierii chemicznej [9,55,60,66] pod nazwą barbotażu.

Zjawisko przepływu powietrza w wodzie opisuje kilka teorii, a jedną z częściej stosowanych jest teoria Van Kravela, która wprowadza następujące uproszczenia [60,66]:

1. Pęcherzyki gazu (powietrza) tworzą się tylko w pojedynczym otworze zwróconym ku górze. Pomija się oddziaływanie innych pęcherzyków gazu (powietrza), które mogą się tworzyć w otworach sąsiednich.
2. Średnica kolumny, w której tworzą się pęcherzyki gazu (powietrza), jest na tyle duża, że oddziaływanie ścianek aparatu (rurociągu) na pęcherzyki można pominąć.
3. Aparat nie ma wypełnienia i zawiera tylko ciecz.
4. W aparacie nie występuje wymuszona cyrkulacja cieczy z wyjątkiem ruchu cieczy wywołanego przepływem pęcherzyków gazu (powietrza).
5. Pęcherzyki przyjmują kształt kulisty o średnicy d_p , średnica otworu, przy którym on się tworzy, wynosi d_1 , a objętościowe natężenie przepływu gazu jest równe M_p .

Na tworzący się pęcherzyk w otworze działają siły:

- siła wyporu

$$W = \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_w - \rho_p) g \quad (5.1)$$

- siła napięcia powierzchniowego utrzymująca pęcherzyk gazu na obwodzie otworu

$$F = \pi d_1 \sigma \quad (5.2)$$

W momencie równoważenia się tych sił następuje oderwanie się pęcherzyka od ścianki i unoszenie się w cieczy ku powierzchni. Poprzez porównanie wartości sił można uzyskać wzór na średnicę pęcherzyka:

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6d_1\sigma}{(\rho_w - \rho_p)g}} \quad (5.3)$$

Gdyby natomiast pęcherzyk nie był kulą, wówczas równanie (5.3) można zapisać w postaci ogólnej:

$$d_{pez} = \sqrt[3]{\frac{Bd_1\sigma}{(\rho_w - \rho_p)g}} \quad (5.4)$$

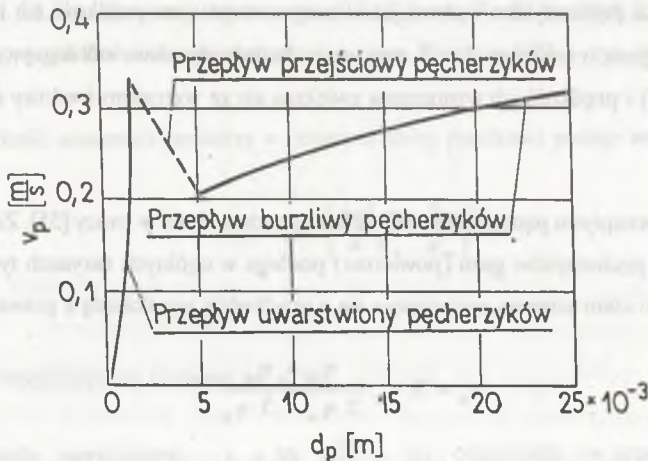
gdzie

B – obwód pęcherzyka w [m], [66],

albo:

$$\frac{d_p^3 (\rho_w - \rho_p)}{d_1 \sigma} = const \quad (5.5)$$

Opierając się na wynikach doświadczeń, można stwierdzić, że dla pewnego określonego zakresu wartości natężeń przepływu równanie (5.5) sprawdza się. Oznacza to, że średnica pęcherzyków nie zależy od objętościowego natężenia przepływu gazu (gdy M_p jest dostatecznie małe), ale tylko od średnicy otworu, przy którym pęcherzyk tworzy się i od napięcia powierzchniowego cieczy oraz różnicy gęstości cieczy i gazu. Wyniki doświadczeń ujęte w postaci graficznej przedstawiono na rys. 15 [66].



Rys. 15. Prędkość wznoszenia się pęcherzyków gazu (powietrza) w zależności od ich średnicy
 Fig. 15. Velocity of lifting of the gas (air) bubbles as function of their diameter

Z charakteru wykresu autor wyciąga następujące wnioski:

- przy niewielkich wymiarach pęcherzyków ruch ich ma charakter laminarny odpowiadający prawu Stokesa:

$$v_p = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_w) g}{18 \eta_w} \quad (5.6)$$

- pęcherzyki gazu o średnicy do 1.5 mm zachowują w zasadzie kształt kulisty,
- prędkość wznoszenia pęcherzyków powietrza zwiększa się wraz ze wzrostem średnicy pęcherzyków gazu (przepływ uwarstwiony),
- pęcherzyki o średnicy $1.5 < d < 6$ mm są zniekształcone ze wzrostem ich średnicy, zaś ich prędkość wznoszenia nieco maleje (przejściowy charakter ruchu),
- w cieczach o innej lepkości i innym napięciu powierzchniowym niż w przypadku wody spadek prędkości wznoszenia pęcherzyków gazu nie występuje,
- przy większych średnicach pęcherzy ruch ma charakter burzliwy odpowiadający równaniu Newtona:

$$v_p = 1.74 \sqrt{\frac{d_p (\rho_p - \rho_w) g}{\rho_w}} \quad (5.7)$$

gdzie średnica pęcherzyków wpływa już w małym stopniu na prędkość ich ruchu,

- pęcherzyki gazu o średnicy $d > 6$ mm mają kształt wyraźnie odbiegający od kuli (muszlowaty) i prędkość ich wznoszenia zwiększa się ze wzrostem średnicy (przepływ burzliwy).

Inne ujęcie przepływu pęcherzyków powietrza przedstawiono w pracy [55]. Zakłada się w niej, że ruch pęcherzyków gazu (powietrza) podlega w ogólnych zarysach tym samym zależnościom co ciało sztywne poruszające się z prędkością wynikającą z prawa Stokesa:

$$v_p = 3 v_{st} \frac{\eta_w + \eta_p}{2 \eta_w + 3 \eta_p} \quad (5.8)$$

gdzie:

v_{st} – prędkość opadania zgodnie z prawem Stokesa:

$$v_{sr} = \frac{(\rho_p - \rho_w) g d_p^2}{18 \eta_w} \quad (5.9)$$

przy czym zakres jej stosowalności zależy od lepkości.

Ponieważ dla gazów $\eta_p \ll \eta_w$, a $\rho_p \ll \rho_w$, prędkość ruchu małych pęcherzyków w polu ciężkości podaje uproszczony wzór wynikający z zależności (5.9):

$$v_p = \frac{3}{2} v_{sr} = \frac{\rho_p d^2 g}{12 \eta_w} \quad (5.10)$$

dla

$$Re < 1.$$

Prędkość unoszenia pęcherzyków średnich rozmiarów ($Re < 1000 \dots 1500$) zależy w znacznym stopniu od obecności środków powierzchniowo czynnych zawartych zawsze w cieczach o czystości niemetalicznej i z reguły odbiega od wartości teoretycznych. Większe pęcherzyki ulegają deformacji i poruszają się w zasadzie z prędkością niezależną od rozmiarów. Graniczna wartość średnicy zależy od lepkości cieczy stanowiącej fazę zwartą i tak np. dla wody wynosi ona 0.2...0.3 cm. Ruch średnich i dużych pęcherzy ilustrują wyniki doświadczalne otrzymane przez Coestera [55] – rys. 16.

Prędkość unoszenia pęcherzy w obszarze stałej prędkości podaje wzór Lewicza [55]:

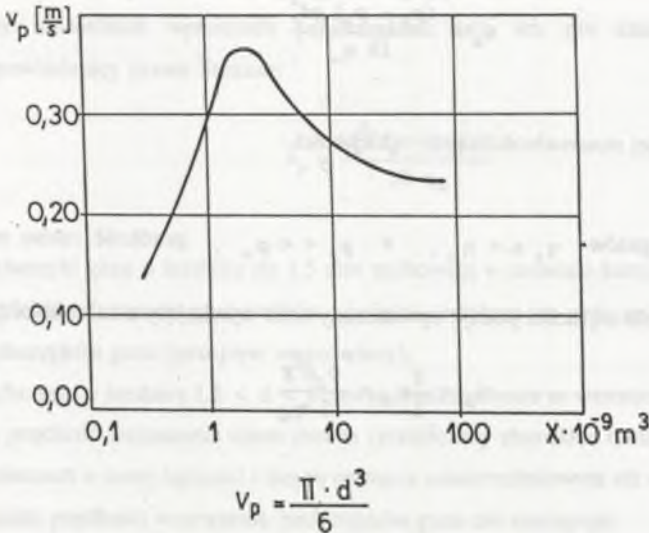
$$v_p = \left(\frac{4 \sigma^2 g}{\alpha \eta_n} \frac{\rho_p}{\rho_w} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (5.11)$$

gdzie:

α – współczynnik liczbowy ($\alpha \approx 30$).

Dla wody uzyskujemy, $v \approx 30 \frac{cm}{s}$, co odpowiada w przybliżeniu danym

doświadczalnym przedstawionym na rys. 16.



Rys. 16. Zależność prędkości przepływu pęcherzyków gazu (powietrza) od ich objętości
 Fig. 16. Velocity of flow of the gas (air) bubbles as function of their capacity

Duże pęcherze silnie zdeformowane o średnicy zastępczej przewyższającej pewną wartość krytyczną ulegają rozpadowi. Rozpad następuje w momencie, gdy siły ciśnienia dynamicznego wewnątrz pęcherza przewyższają siły napięcia powierzchniowego. Na podstawie przybliżonej analizy sił w stanie równowagi Lewicz podał następujący wzór na promień krytyczny pęcherza [55]:

$$r_{kr} = \sqrt{\frac{3}{k} \frac{\sigma}{v_p^2 \sqrt{\rho_p \rho_w^2}}} \quad (5.12)$$

Dla wody, przyjmując wartość współczynnika $k = 0.5$ oraz graniczną prędkość unoszenia $V = 30$ cm/s, otrzymujemy $r = 1.8$ cm, co jest zgodne z doświadczeniem.

Obserwacje prowadzone na instalacji laboratoryjnej do hydrotransportu nie potwierdzają występowania pęcherzyków powietrza o takich wartościach średnic.

Dlatego też w dalszej części opracowania autor przedstawił poszczególne etapy i modele teoretyczne, za pomocą których opisywał rozpatrywane zjawiska.

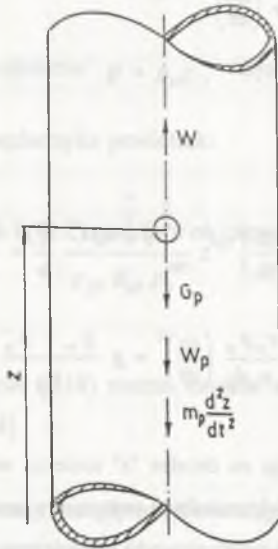
5.2. MODELOWANIE TEORETYCZNE PRZEPEŁYWU POWIETRZA W WODZIE

Modelowanie przepływu powietrza w wodzie dotyczyć będzie następujących przypadków:

- przepływu pojedynczych cząstek powietrza w wodzie stojącej,
- przepływu mieszaniny wody i cząstek stałych.

5.2.1. Modelowanie przepływu pojedynczego pęcherzyka powietrza w wodzie

W celu wyprowadzenia równania opisującego przepływ pojedynczego pęcherzyka w wodzie układa się równanie równowagi sił działających na cząstkę powietrza w wodzie (rys. 17):



Rys. 17. Rozkład sił działających na pęcherzyk powietrza w wodzie
 Fig. 17. Disposition of forces loaded on an air bubble in water

$$-m_p \frac{d^2 z}{dt^2} - G_p - W_p + W = 0 \quad (5.13)$$

gdzie:

$$m_p = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p$$

G_p – ciężar pęcherzyka powietrza

$$G_p = g \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} ,$$

W_p – siła oporu czołowego pojedynczego pęcherzyka powietrza w wodzie,

$$W_p = \frac{c_w \rho_w}{2} v_p^2 \frac{\pi d_p^3}{4} = \frac{c_w \rho_w}{8} \pi d_p^2 \left(\frac{dz}{dt} \right)^2$$

W – siła wyporu,

$$W = \rho_w g \frac{\pi d_p^3}{6} .$$

Po podstawieniu powyższych zależności do równania (5.13) i dokonaniu przekształceń otrzymamy równanie w postaci:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{3}{4} \frac{c_w \rho_w}{\rho_p d_p} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 = g \frac{\rho_w - \rho_p}{\rho_p} \quad (5.14)$$

Pęcherzyk powietrza przepływając na drodze "z" zmienia swoją gęstość, dlatego też istnieje konieczność uwzględnienia odpowiedniej przemiany termodynamicznej. Z uwagi na bardzo dużą różnicę pojemności cieplnej wody i powietrza autor przyjął przemianę izotermiczną w postaci:

$$\frac{\rho_p}{\rho_{p0}} = \frac{p_0}{p} \quad (5.15)$$

a wtedy średnica przepływającego pęcherzyka zmienia się według zależności:

$$d_p = d_{p0} \sqrt[3]{\frac{p_0}{p}} \quad (5.16)$$

Dlatego też po podstawieniu zależności (5.15) i (5.16) do równania (5.14) otrzymuje się:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{3}{4} \frac{c_w \rho_w}{\rho_{p0} d_{p0}} \frac{p^{4/3}}{p_0^{4/3}} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 = \frac{g}{\rho_{p0}} \left(\rho_w - \rho_{p0} \frac{p_0}{p} \right) p \quad (5.17)$$

(94)

W równaniu (5.17) ciśnienie p jest wielkością niewiadomą zależną od drogi z .

$$p = p(z)$$

Przyjmując rozkład ciśnienia $p = \rho_w g z$, uzyskuje się następującą postać równania

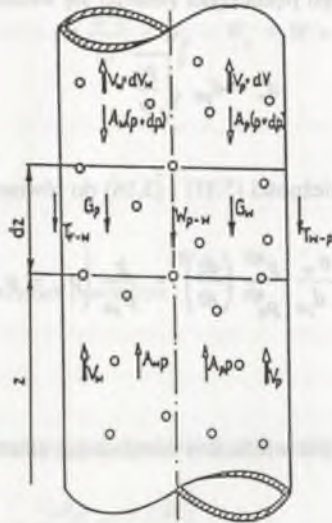
różniczkowego ruchu pęcherzyka powietrza:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{3}{4} \frac{c_w \rho_w}{\rho_{p0} d_{p0}} \frac{g^{7/3}}{p_0^{4/3}} z^{4/3} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 = \frac{g^2 \rho_w^2}{\rho_{p0} p_0} z - g \quad (5.18)$$

Rozwiązanie równania (5.18) można uzyskać w postaci złożonego szeregu [37] lub metodą numeryczną [64].

5.2.2. Model matematyczny przepływu mieszaniny wodno-powietrznej

W celu wyprowadzenia równań ruchu mieszaniny pęcherzyków powietrza autor rozpatruje siły działające na element jej objętości o przekroju "A" i wysokości dz oraz siły działające na pęcherzyki powietrza zawarte w tym elemencie. Należy przy tym zauważyć, że masowe natężenie przepływu poszczególnych faz w rurociągu ma wartość stałą zgodnie z zasadą ciągłości.



Rys. 18. Rozkład sił działających na element mieszaniny wodno-powietrznej
 Fig. 18. Disposition of forces loaded on a particle of the mixture

Przyjmując oznaczenia jak na rys. 18 i stosując kolejno zasadę pędu i zasadę d'Alemberta dla pęcherzyków powietrza, otrzymuje się następujące równania:

$$\dot{M}_p dv_p + \dot{M}_w dv_w + G_w + G_p + Adp + T_{r-p} + T_{r-w} + 0 \quad (5.19)$$

$$\varepsilon_p Adp + G_p + \dot{M}_p \frac{dv_p}{dt} + T_{r-p} + W_p = 0 \quad (5.20)$$

Dodatkowe równania uzyskuje się, wykorzystując równanie ciągłości w postaci różniczkowej:

$$v_w \frac{d\varepsilon_w}{dz} + \varepsilon_w \frac{dv_w}{dz} = 0 \quad (5.21)$$

$$\varepsilon_p \rho_p \frac{dv_p}{dz} + \rho_p v_p \frac{d\varepsilon_p}{dz} + \varepsilon_p v_p \frac{d\rho_p}{dz} = 0 \quad (5.22)$$

$$\frac{d\varepsilon_w}{dz} + \frac{d\varepsilon_p}{dz} = 0 \quad (5.23)$$

Ostatnie równanie otrzymamy z równania przemiany izotermicznej w postaci różniczkowej:

$$\frac{dp}{p} - \frac{d\rho_p}{\rho_p} = 0 \quad (5.24)$$

gdzie:

$$G_p = gA\varepsilon_p dz$$

$$G_w = gA\varepsilon_w dz$$

$$T_{r-p} = \lambda_p \frac{v_p^2}{2D} \rho_p \varepsilon_p dz$$

$$T_{r-w} = \lambda_w \frac{v_w^2}{2D} \rho_w \varepsilon_w dz$$

$$w_{p-w} = \frac{3}{4} c_w \frac{P_w}{\rho_p d_p} (v_p - v_w) |v_p - v_w| \dot{M}_p$$

Po dokonaniu przekształceń matematycznych uzyskuje się następujący układ równań:

$$\dot{M}_p \frac{dv_p}{dz} + \dot{M}_w \frac{dv_w}{dz} + A \frac{dp}{dz} + g \left(\frac{\dot{M}_w}{v_w} + \frac{\dot{M}_p}{v_p} \right) + \lambda_w \frac{\dot{M}_w v_w}{2D} + \lambda_p \frac{\dot{M}_p v_p}{2D} = 0 \quad (5.25)$$

$$\frac{dv_p}{dz} + \frac{1}{\rho_p v_p} \frac{dp}{dz} + \frac{g}{v_p} + \frac{\lambda_p v_p}{2D} + \frac{3}{4} \frac{c_p \rho_w}{\rho_p d_p v_p} (v_p - v_w)^2 = 0 \quad (5.26)$$

$$\frac{\dot{M}_w}{\rho_w v_w^2} \frac{dv_w}{dz} + \frac{\dot{M}_p}{\rho_p v_p^2} \frac{dv_p}{dz} + \frac{\dot{M}_p}{\rho_p v_p p} \frac{dp}{dz} = 0 \quad (5.27)$$

Otrzymany układ rozwiązuje się względem $\frac{dp}{dz}$, $\frac{dv_w}{dz}$, $\frac{dv_p}{dz}$:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\frac{\dot{M}_w}{\rho_w u_w^2} a + b}{\frac{\dot{M}_w}{\rho_w \rho_p u_w^2 u_p} - \frac{A}{\rho_w u_w^2} + \frac{\dot{M}_p}{\rho_p u_p} - \frac{\dot{M}_p}{\rho_p^2 u_p^3}} \quad (5.28)$$

$$\frac{dv_p}{dz} = -\frac{1}{\rho_p u_p} \frac{dp}{dz} - \frac{g}{u_p} - \frac{\lambda_p u_p}{2D} - \frac{3}{4} \frac{c_w \rho_w}{\rho_p d_p u_p} (v_p - v_w)^2 \quad (5.29)$$

$$\frac{dv_w}{dz} = \left(\frac{\dot{M}_p}{\dot{M}_w \rho_p u_p} - \frac{A}{\dot{M}_w} \right) \frac{dp}{dz} + a \quad (5.30)$$

gdzie:

$$a = -\frac{3}{4} \frac{c_w \rho_w \dot{M}_p}{\rho_p d_p u_p} (v_p - v_w)^2 - \frac{\lambda_w u_w}{2D} - \frac{g}{u_w}$$

$$b = -\frac{\dot{M}_p g}{\rho_p u_p^3} - \frac{\lambda_p \dot{M}_p u_w}{2D \rho_p u_p^2} - \frac{3}{4} \frac{c_w \rho_w}{\rho_p^2 d_p u_p^3} (v_p - v_w)^2$$

5.2.3. Uproszczony model matematyczny przepływu mieszaniny woda – powietrze

Wprowadzone w punkcie 5.2.2. równania ruchu mieszaniny wody i powietrza posiadają złożoną postać i są dość kłopotliwe w rozwiązaniu. W wielu przypadkach praktycznych korzystnie jest stosować w obliczeniach wstępnych równania uproszczone, które chociaż w przybliżeniu podają wartości zmian poszczególnych parametrów ruchu.

W celu wyprowadzenia uproszczonych równań ruchu dla mieszaniny woda–powietrze autor przyjął, że mieszaninę tę można zastąpić jednorodną cieczą charakteryzującą się gęstością transportową równą:

$$\rho_m(z) = \frac{\dot{M}_w + \dot{M}_{pn}}{Q_w + \frac{p_n}{p(z)} Q_{pn}} \quad (5.31)$$

i poruszającą się z prędkością zmienną wzdłuż rurociągu równą:

$$v_m(z) = \frac{p_n Q_{pn} + p(z) Q_w}{A_p(z)} \quad (5.32)$$

Równanie różniczkowe ruchu uzyskuje się z zasady pędu dla elementu strugi o wysokości "dz" i polu podstawy "A", które w tym przypadku ma postać:

$$\dot{M}dv + Adp + R + G = 0 \quad (5.33)$$

gdzie:

R – siła tarcia mieszaniny dwufazowej o ścianki rurociągu,

G – ciężar mieszaniny dwufazowej.

Po podstawieniu do (5.33) zależności na R i G oraz uwzględnieniu zwrotów sił uzyskuje się równanie:

$$-Av(z)\rho_m(z)dv - Adp + \lambda_m \frac{v^2(z)}{2D} \rho_m(z)Adz + gA\rho_m(z)dz = 0 \quad (5.34)$$

które po przekształceniach prowadzi do następującej postaci różniczkowej ruchu mieszaniny:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{-g - \frac{\lambda_m}{2DA^2} \left(\frac{p_n Q_{pn}}{p(z)} + Q_w \right)^2}{\left(Q_{pn} \frac{p_n}{p(z)} + Q_w \right) \left(\frac{p_n Q_{pn}}{A^2} \frac{1}{p(z)^2} - \frac{1}{M} \right)} \quad (5.35)$$

Po obliczeniach matematycznych uzyskuje się równanie (5.36) ujmujące zależność wysokości podnoszenia hydromieszaniny "z" od prędkości, gęstości, objętościowego natężenia przepływu hydromieszaniny i średnicy rurociągu transportowego. Stałą całkowania C_1 wyznacza się z warunku, że znana jest wysokość wlotu powietrza do instalacji i wielkość panującego tam ciśnienia:

$$z = \frac{a}{b} \left(p + \frac{1}{b} \left(c \ln [(p + s)^2 + k^2] + \frac{2}{k} \left(\frac{u}{w} - s \right) \arctg \frac{p + s}{k} \right) \right) + C_1 \quad (5.36)$$

gdzie:

C_1 – stała całkowania

$$a = \frac{Q_w}{M}$$

$$b = - \left(\frac{\lambda_m Q_w^2}{2DA^2} + g \right)$$

$$c = \left(\frac{\lambda_m Q_w^2}{2DA^2} + g \right)^2 \frac{2DM}{Q_w \lambda_m}$$

$$k^2 = \frac{2 \left(\frac{\lambda_m Q_w^2}{2DA^2} + g \right) \frac{\lambda_m Q_{pn}^2 P_n}{DA^2} - \left(\frac{\lambda_m Q_w Q_{pn} P_n}{DA^2} \right)^2}{4 \left(\frac{\lambda_m Q_w^2}{2DA^2} + g \right)^2}$$

$$s = \frac{\lambda_m Q_w Q_{pn} P_n}{2DA \left(\frac{\lambda_m Q_w^2}{2DA^2} + g \right)}$$

$$w = \frac{\lambda_m Q_{pn} Q_w P_n}{DA^2} - \left(\frac{\lambda_m Q_w}{2DA^2} + g \right) \left[\frac{Q_{pn} P_n}{Q_w} + \frac{2DM}{Q_w \lambda_m} \left(\frac{\lambda_m Q_w^2}{2DA^2} + g \right) \right]$$

$$u = \frac{Q_{pn} P_n}{A^2} \left[\frac{\lambda_m Q_{pn}}{2D} - \left(\frac{\lambda_m Q_w^2}{2DA^2} + g \right) M \right]$$

5.3. MODEL MATEMATYCZNY PRZEPLYWU W WODZIE CZĄSTEK STAŁYCH O GĘSTOŚCI MNIJSZEJ OD GĘSTOŚCI WODY

Autor prowadzi badania laboratoryjne nad zastąpieniem w omawianych instalacjach sprężonego powietrza cząstkami stałymi o gęstości mniejszej od gęstości cieczy [40,42]. Z uwagi na stałą średnicę cząstek stałych eliminuje się w nich wzrost prędkości wzdłuż instalacji spowodowany rozprężaniem się powietrza.

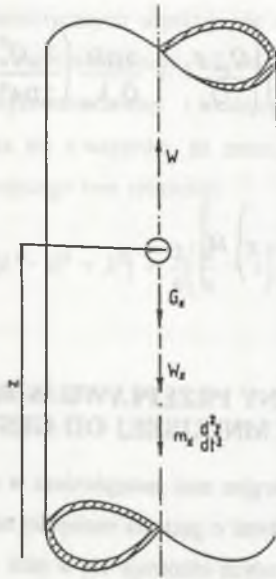
Ponadto z równań opisujących ruch pojedynczych pęcherzyków powietrza (5.17) oraz mieszaniny powietrza z wodą (5.28...5.30) wynika, że są one bardzo złożone i nie prowadzą do rozwiązań zamkniętych, lecz tylko przybliżonych.

Przepływ cząstek stałych o niezmienniej objętości i bardzo małej gęstości w wodzie jest w pewnych warunkach dobrym modelem dla pęcherzyków powietrza.

5.3.1. Model matematyczny przepływu w wodzie pojedynczych cząstek stałych o gęstości mniejszej od gęstości wody

Celem uściślenia parametrów przepływu mieszaniny woda–powietrze oraz opisu zjawisk i parametrów hydrotransportu w instalacjach, w których czynnikiem nośnym są cząstki stałe o gęstości mniejszej od gęstości cieczy, zostały wyprowadzone równania ruchu dla kulek styropianowych o gęstości właściwej $\rho = 16 \text{ kg/m}^3$ [51].

W celu wyprowadzenia równania opisującego przepływ pojedynczej cząstki w wodzie układa się równanie równowagi sił działających na cząstkę zanurzoną w wodzie – rys. 19.



Rys. 19. Rozkład sił działających na cząstkę styropianu w wodzie

Fig. 19. Disposition of forces loaded on a single particle of foamed polystyrene in water

$$-m_x \frac{d^2z}{dt^2} - G_x - W_x + W = 0 \quad (5.37)$$

gdzie:

$$m_x = \frac{\pi d_x^3}{6} \rho_x,$$

G_x – ciężar cząstki stałej,

$$G_x = \rho_x g \frac{\pi d_x^3}{6},$$

W_x – siła oporu czołowego pojedynczej cząstki stałej w wodzie,

$$W_x = c_w \rho_w \frac{v_w^2}{2} \frac{\pi d_x^2}{4},$$

W – siła wyporu,

$$W = \rho_x g \frac{\pi d_x^3}{6}.$$

Po podstawieniu tych wartości do równania (5.37) i dokonaniu przekształceń uzyskuje się równanie różniczkowe drugiego rzędu w postaci:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{3}{4} \frac{c_w \rho_w}{\rho_x d_x} \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 = g \frac{\rho_w - \rho_x}{\rho_x} \quad (5.38)$$

Po dokonaniu przekształceń matematycznych uzyskuje się równanie na prędkość przepływu cząstki:

$$v_x = \frac{dz}{dt} = \frac{\sqrt{\frac{c}{a} e^{(a+c_1) 2 \sqrt{\frac{\varepsilon}{a}} t} - 1}}{e^{(a+c_1) 2 \sqrt{\frac{\varepsilon}{a}} t} + 1} \quad (5.39)$$

i przebytą drogę:

$$z = \frac{1}{a} \ln \left| \frac{1}{e^{c_1 \sqrt{\frac{\varepsilon}{a}} t}} + e^{2a \sqrt{\frac{\varepsilon}{a}} t} \right| - \sqrt{\frac{c}{a}} t + C_2 \quad (5.40)$$

gdzie: C_1 i C_2 – stałe całkowania, $a = \frac{c_w \rho_w}{\rho_x d_x}$.

Celem wyznaczenia stałych C_1 i C_2 przyjmuje się następujące warunki początkowe:

$$\text{dla } t = 0 \quad \frac{dz}{dt} = 0 \quad \frac{d^2 z}{dt^2} = 0 \quad (5.41)$$

Po podstawieniu zależności (5.41) do równań (5.39) i (5.40) uzyskuje się:

$$C_1 = 0, \quad C_2 = -1/2 \ln 2 \quad (5.42)$$

Wykorzystując uzyskane wartości (5.42) w równaniach (5.39) i (5.40), uzyskuje się końcową postać matematyczną opisującą prędkość cząstek stałych w wodzie:

$$v_x = \sqrt{\frac{4}{3} g d_x \frac{\rho_w - \rho_x}{c_w \rho_w} \frac{e^{\left(3g \frac{c_w(\rho_w - \rho_x) \rho_w}{\rho_x^2 d_x}\right)^{\frac{1}{2}} t} - 1}{e^{\left(3g \frac{c_w(\rho_w - \rho_x) \rho_w}{\rho_x^2 d_x}\right)^{\frac{1}{2}} t} + 1}} \quad (5.43)$$

lub

$$v_x = \sqrt{\frac{4}{3} g d_x \frac{\rho_w - \rho_x}{c_w \rho_w} \frac{1 - e^{\left(3g \frac{c_w(\rho_w - \rho_x) \rho_w}{\rho_x^2 d_x}\right)^{-\frac{1}{2}} t^{-1}}}{1 + e^{\left(3g \frac{c_w(\rho_w - \rho_x) \rho_w}{\rho_x^2 d_x}\right)^{-\frac{1}{2}} t^{-1}}}}$$

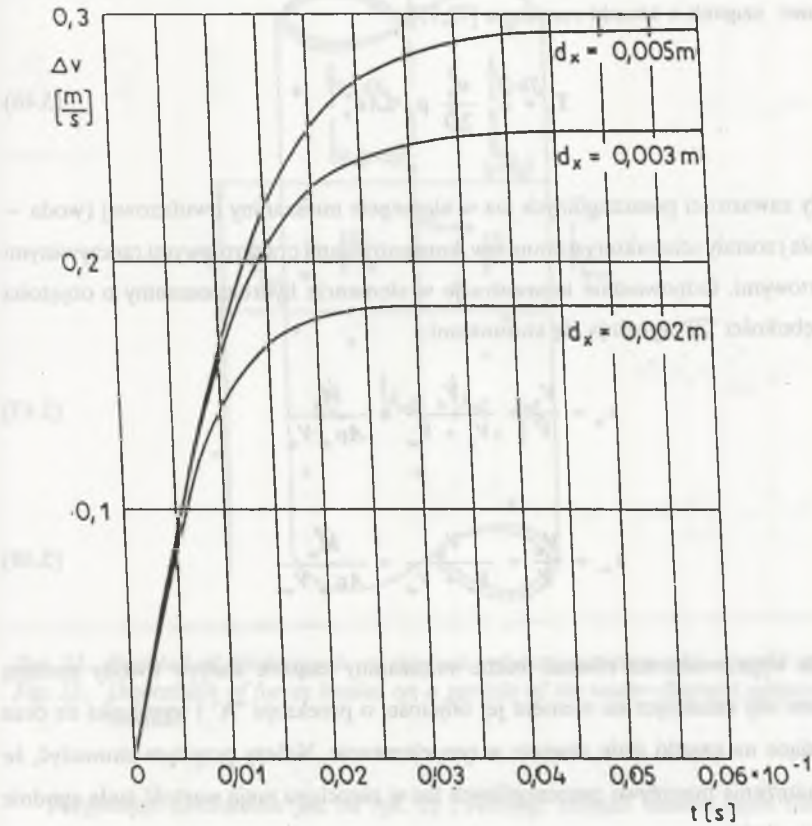
oraz przebytą drogę:

$$Z = \frac{4}{3} \frac{\rho_x d_x}{c_w \rho_w} \ln \left| e^{\left(3g \frac{c_w(\rho_w - \rho_x) \rho_w}{\rho_x^2 d_x}\right)^{\frac{1}{2}} t} + 1 \right| - \sqrt{\frac{4}{3} g d_x \frac{\rho_w - \rho_x}{c_w \rho_w} t} + \frac{4}{3} \frac{\rho_x d_x}{c_w \rho_w} \ln 2 \quad (5.45)$$

Równanie (5.44) lepiej uwidacznia asymptotyczną zbieżność prędkości chwilowej do wartości

$$\sqrt{\frac{4}{3} g d_x \frac{\rho_w - \rho_x}{c_w \rho_w}}$$

Na rys. 20 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń prędkości przepływu pojedynczych cząstek styropianu w wodzie stojącej, wykorzystując wyprowadzone równanie (5.44). Z przedstawionych wykresów wynika, że kuleczki styropianowe w bardzo krótkim czasie wynoszącym od 0.0025 [s] dla średnicy $d_x = 0.002$ [m] do 0.004 [s] dla średnicy $d_x = 0.005$ m osiągają maksymalne prędkości i dalej poruszają się ruchem ustalonym.



Rys. 20. Zależność prędkości przepływu cząstek styropianu w wodzie stojącej dla różnych średnic d_x

Fig. 20. Dependence of velocity of flow of foamed polystyrene particles in standing water for different diameters d_x

5.3.2. Model matematyczny przepływu mieszaniny woda – cząstki stałe

Do dalszych rozważań zostały przyjęte pewne założenia pozwalające opracować teoretyczny model ruchu mieszaniny woda – cząstki stałe.

Przepływ traktowany jest jako quasi-ustalony. W rozważaniach nie uwzględnia się zjawisk rozdzielania się fazy stałej na skutek różnego ciężaru, kształtu i wymiarów poszczególnych cząstek. Materiał charakteryzuje się stałą średnicą i współczynnikiem oporu.

Siłę tarcia cząstek stałych o ścianki rurociągu określa się zależnością na tarcie uderzeniowe cząstek o ścianki rurociągu [72,73]:

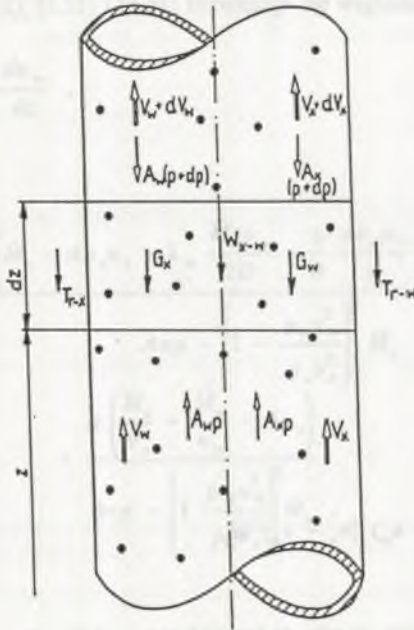
$$T_x = \lambda_x \frac{v_x^2}{2D} \rho_x LA \varepsilon_x \quad (5.46)$$

Udziały zawartości poszczególnych faz w elemencie mieszaniny dwufazowej (woda – cząstki stałe) zostały scharakteryzowane tzw. koncentracjami przekrojowymi rzeczywistymi i transportowymi. Odpowiednie koncentracje w elemencie hydromieszaniny o objętości "V" na głębokości "Z" wyrażają się stosunkami:

$$\varepsilon_x = \frac{V_x}{V} = \frac{V_x}{V_x + V_w} = \frac{\dot{M}_x}{A \rho_x V_x} \quad (5.47)$$

$$\varepsilon_w = \frac{V_w}{V} = \frac{V_w}{V_x + V_w} = \frac{\dot{M}_w}{A \rho_w V_w} \quad (5.48)$$

W celu wyprowadzenia równań ruchu mieszaniny cząstek stałych i wody zostaną rozpatrzone siły działające na element jej objętości o przekroju "A" i wysokości dz oraz siły działające na cząstki stałe zawarte w tym elemencie. Należy przy tym zauważyć, że masowe natężenia przepływu poszczególnych faz w rurociągu mają wartość stałą zgodnie z zasadą ciągłości.



Rys. 21. Rozkład sił działających na element hydromieszaniny woda–cząstki styropianu
 Fig. 21. Disposition of forces loaded on a particle of the water–foamed polystyrene grains mixture

Przyjmując oznaczenia jak na rys. 21 i stosując kolejno zasadę pędu dla elementu hydromieszaniny oraz zasadę d'Alemberta dla cząstek stałych, otrzymuje się następujące równania:

$$\dot{M}_x dv_x + \dot{M}_w dv_w + G_w + G_x + A dp + T_{r-x} + T_{r-w} = 0 \quad (5.49)$$

$$\varepsilon_x A dp + G_x + \dot{M}_x \frac{dv_x}{dt} + T_{r-x} + W_{x-w} = 0 \quad (5.50)$$

Dodatkowe równanie uzyskuje się, wykorzystując zasadę ciągłości w postaci różniczkowej:

$$\frac{\varepsilon_x}{v_x} \frac{dv_x}{dz} + \frac{\varepsilon_w}{v_w} \frac{dv_w}{dt} = 0 \quad (5.51)$$

gdzie:

$$G_x = A \varepsilon_x \rho_x g dz$$

$$G_w = A \varepsilon_w \rho_w g dz$$

$$T_{r-x} = \lambda_x \frac{v_x^2}{2D} \rho_x \varepsilon_x dz$$

$$T_{r-w} = \lambda_w \frac{v_w^2}{2D} \rho_w \varepsilon_w dz$$

$$W_{x-w} = \frac{3}{4} c_w \frac{\rho_w}{d_x \rho_x} (v_x - v_w) |v_x - v_w| \dot{M}_x$$

Po uwzględnieniu w równaniach (5.49), (5.50) i (5.51) znaków sił oraz wykorzystaniu założeń z punktu 5.22 i dokonaniu przekształceń matematycznych uzyskuje się następujący układ równań:

$$\dot{M}_x \frac{dv_x}{dz} + \dot{M}_w \frac{dv_w}{dz} + A \frac{dp}{dz} + g \left(\frac{\dot{M}_x}{v_x} + \frac{\dot{M}_w}{v_w} \right) + \lambda_w \frac{\dot{M}_w v_w}{2D} + \lambda_x \frac{\dot{M}_x v_x}{2D} = 0 \quad (5.52)$$

$$\frac{1}{v_x \rho_x} \frac{dp}{dz} + \frac{dv_x}{dz} + \frac{g}{v_x} + \lambda_x \frac{v_x}{2D} + \frac{3}{4} \frac{c_w \rho_w}{\rho_x v_x d_x} (v_x - v_w)^2 = C \quad (5.53)$$

$$\frac{\dot{M}_x}{\rho_x v_x^2} \frac{dv_x}{dz} + \frac{\dot{M}_w}{\rho_w v_w^2} \frac{dv_w}{dz} = 0 \quad (5.54)$$

Układ równań (5.52), (5.53) i (5.54) rozwiązuje się względem

$$\frac{dp}{dz} = \frac{dv_x}{dz} + \frac{dv_w}{dz},$$

uzyskując:

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dz} = \lambda_x \frac{v_x}{2D} & \frac{\left(\dot{M}_x - A\rho_x v_x + \lambda_w \frac{\dot{M}_w v_w}{2D} - \frac{3}{4} \frac{Ac_w \rho_w}{d_x} (v_x - v_w)^2 \right)}{Av\rho - \left(1 - \frac{\rho_w v_w^2}{\rho_x v_x^2} \right)^2 \dot{M}_x} \\ & + \frac{g \left(\frac{\dot{M}_x}{v_x} + \frac{\dot{M}_w}{v_w} - A\rho_x \right)}{Av\rho - \left(1 - \frac{\rho_w v_w^2}{\rho_x v_x^2} \right)^2 \dot{M}_x} \end{aligned} \quad (5.55)$$

$$\frac{dp}{dz} = - \left[v_x \rho_x \frac{dv_x}{dz} + g\rho_x + \lambda_x \rho_x \frac{v_x^2}{2D} + \frac{3}{4} \frac{Ac_w \rho_w}{d_x} (v_w - v_x)^2 \right] \quad (5.56)$$

$$\frac{dv_w}{dz} = - \frac{\dot{M}_x}{\dot{M}_w} \frac{\rho_w v_w^2 dv_x}{\rho_x v_x^2 dz} \quad (5.57)$$

5.3.3. Uproszczony model matematyczny przepływu mieszaniny woda – cząstki stałe

Szczegółowa analiza wyników obliczeń (równanie (5.43) i rys. 20) pozwala stwierdzić, że po etapie rozruchu i przebyciu bardzo małej drogi w rurociągu pionowym pochodne

$$\frac{dv_w}{dz} \text{ i } \frac{dv_x}{dz} \text{ można pominąć przy analizowaniu spadku ciśnienia } \frac{dp}{dz}$$

Uproszczony model matematyczny dla przepływu mieszaniny (woda – cząstki stałe) zostanie wyznaczony z równań (5.49), (5.50) i (5.51) po założeniu:

$$\frac{dv_w}{dz} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{dv_x}{dz} = 0.$$

Po przyjęciu tych założeń równania opisujące ruch mieszaniny mają postać:

$$\varepsilon_x A dp + G_x + T_{r-x} + W_{x-w} = 0 \quad (5.58)$$

$$A dp + G_w + G_x + T_{r-w} + T_{r-x} = 0 \quad (5.59)$$

$$\varepsilon_x + \varepsilon_w = 1$$

Wstawiając zależności i wykonując odpowiednie przekształcenia matematyczne, uzyskuje się następujący układ równań:

$$A \frac{dp}{dz} + g \left(\frac{\dot{M}_x}{v_x} + \frac{\dot{M}_w}{v_w} \right) + \lambda_w \frac{\dot{M}_w v_w}{2D} + \lambda_x \frac{\dot{M}_x v_x}{2D} = 0 \quad (5.60)$$

$$\frac{1}{v_x \rho_x} \frac{dp}{dz} + \frac{g}{v_x} + \lambda_x \frac{v_x}{2D} + \frac{3}{4} \frac{c_w \rho_w}{\rho_x v_x d_p} (v_x - v_w)^2 = 0 \quad (5.61)$$

Do dalszych rozważań korzystniej jest równania (5.60) i (5.61) przedstawić w postaci:

$$\frac{dp}{dz} = - \frac{g}{A} \left(\frac{\dot{M}_x}{v_x} + \frac{\dot{M}_w}{v_w} \right) - \frac{\lambda_w}{2DA} \dot{M}_w v_w - \frac{\lambda_x}{2DA} \dot{M}_x v_x \quad (5.62)$$

$$\frac{dp}{dz} = - g \rho_x - \frac{\lambda_x v_x^2 \rho_x}{2D} - \frac{3}{4} \frac{c_w \rho_w}{dx} (v_x - v_w)^2 \quad (5.63)$$

W celu wyznaczenia interesujących wielkości takich jak V_w , V_x , $\frac{dp}{dz}$, należy

wprowadzić zależności łączące ϵ_x oraz C_t :

$$C_t = \frac{Q_x}{Q_x + Q_w} = \frac{1}{1 + \frac{1 - \epsilon_x v_w}{\epsilon_x v_x}} \quad (5.64)$$

które to do dalszej analizy przekształca się do postaci:

$$v_w = \frac{1 - C_t \dot{M}_x v_x}{C_t A \rho_x v_x - \dot{M}_x} \quad (5.65)$$

Porównując równania (5.62) i (5.63) oraz odpowiednio je przekształcając, otrzymuje się równanie końcowe ze względu na niewiadomą prędkość przepływu v_x :

$$\begin{aligned} & A^3 \rho_x^2 \left(\frac{\rho_x \lambda_x}{D} - \frac{3}{2} \frac{\rho_w c_w}{d_x} \right) v_x^5 + \frac{A^2 \rho_x \dot{M}_x}{2} \left(\frac{3 \rho_w c_w}{d_x C_t} - \frac{\rho_w \lambda_w}{D} \right) v_x^4 + A \rho_x \dot{M}_x^2 \times \\ & \times \left(\frac{3}{4} \frac{c_w \rho_w}{d_x \rho_x} - \frac{\lambda_x}{2D} + \frac{A^2 \rho_x^2 g}{\dot{M}_x^2} \left(\frac{\dot{M}_w C_t}{\dot{M}_x (1 - C_t)} - 1 \right) + \frac{\lambda_w \dot{M}_w}{2D \dot{M}_x C_t} (1 - C_t) + \frac{(1 - C_t)^2}{D_x C_t} \right) v_x^3 + \\ & + \dot{M}_x \left(\frac{\lambda_x \dot{M}_x^2}{2D} + 3A^2 \rho_x^2 g \left(1 - \frac{\dot{M}_w C_t}{\dot{M}_x (1 - C_t)} \right) + \lambda_w \frac{\dot{M}_x \dot{M}_w}{2D C_t} \right) v_x^2 + \\ & + 3A \rho_x g \dot{M}_x \left(\dot{M}_w \frac{C_t}{1 - C_t} - \dot{M}_x \right) v_x + \dot{M}_x^2 g \left(\dot{M}_x - \dot{M}_w \frac{C_t}{1 - C_t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5.66)$$

Przy praktycznym wyznaczaniu pierwiastków równania (5.66) można zastosować np. metodę połowienia, która dla funkcji ciągłych i przyjmujących wartości różnych znaków jest metodą zawsze zbieżną.

5.4. PODSUMOWANIE

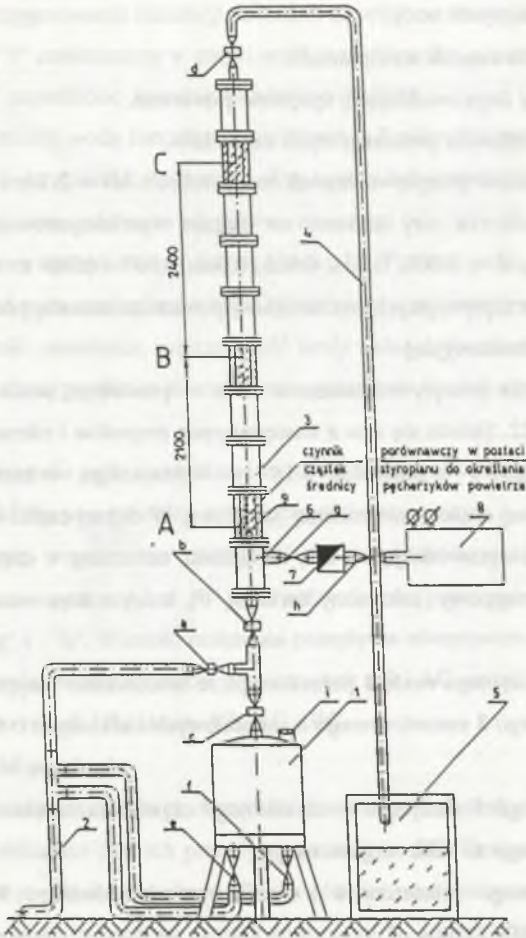
Reasumując, należy stwierdzić, że w wyniku przyjętych założeń podstawowe modele teoretyczne przepływu cząstek powietrza i styropianu w wodzie opisują przepływ quasi – ustalony, określając uśrednione parametry przepływu hydromieszaniny. Zaproponowane podejście analogowe uniemożliwia dokładniejszy opis ruchu poszczególnych cząstek mieszaniny z uwzględnieniem np. dowolności dróg, średnic itp. Dlatego też na podstawie doświadczeń laboratoryjnych, modeli teoretycznych i symulacji komputerowej należy szukać takiej metody, która umożliwiłaby analizę ruchu mieszanin wielofazowych z założoną dokładnością do przebiegu rzeczywistego.

5.5. BADANIA LABORATORYJNE PRZEPLYWU POJEDYNCZYCH CZĄSTEK POWIETRZA I STYROPIANU W WODZIE

Z przedstawionego w poprzednich punktach przeglądu literaturowego dotyczącego przepływu mieszaniny powietrzno–wodnej wynika, że jest on jeszcze mało rozpoznany mimo istniejących i pracujących instalacji.

Celem lepszego rozpoznania zjawisk przepływu pojedynczych cząstek w wodzie zbudowano instalację umożliwiającą na wydzielonym odcinku rurociągów obserwację przepływu pojedynczych pęcherzyków powietrza. W wyniku prowadzonych obserwacji stwierdzono różnice względnej prędkości przepływu pęcherzyków powietrza w wodzie w zależności od prędkości przepływu wody.

Na podstawie zdobytych doświadczeń zaprojektowano nową instalację (rys. 22), która umożliwiła obserwację pęcherzyków powietrza na dwóch odcinkach celem uwzględnienia wpływu powiększenia średnicy związanego ze zmianą ciśnienia. Instalacja umożliwiła pomiar i obserwacje parametrów przepływu kuleczek styropianowych, które stanowią dobry model pęcherzyków powietrza.



Rys. 22. Schemat instalacji laboratoryjnej do badania przepływu pojedynczych cząstek powietrza i styropianu w wodzie:

1 – zbiornik zasypowy, 2 – nurociąg wodny, 3 – nurociąg pomiarowy, 4 – nurociąg sphywowy, 5 – zbiornik odmiarowy, 6 – dysza powietrzna, 7 – rotametr, 8 – układ sprężonego powietrza, 9 – wymienne końcówki dyszy powietrznej, a...d – zawory przelotowe, e...h – zawory grzybkowe, i – korek

Fig. 22. Scheme of laboratory installation for research of flow of single air and foamed polystyrene particles in water:

1 – filling tank, 2 – water pipeline, 3 – measurement pipeline, 4 – down flowing pipeline, 5 – measurement tank, 6 air jet, 7 – rotameter, 8 – compressed air installation, 9 – exchangeable air jet endings, a...d – straight-run valves, e...h – poppet valves, i – cork

Ponadto instalacja zapewniała:

- zmianę prędkości przepływu wody,
- przepływ pojedynczych cząstek styropianu,
- zmiany średnicy dyszy doprowadzającej sprężone powietrze,
- płynną regulację przepływów poszczególnych czynników,
- obserwację i pomiar czasu przepływu cząstek na odcinkach $AB = 2.1$ m i $AC = 4.5$ m,
- zainstalowanie we wnętrzu rury szklanej na cięgnię wyselekcjonowanych cząstek styropianu o średnicy $d = 0.003, 0.004, 0.005, 0.006, 0.007$ i 0.008 m służących do określania średnicy przepływających pęcherzyków powietrza metodą porównawczą.

5.5.1. Opis instalacji laboratoryjnej

Instalację do pomiarów przepływu mieszanin woda – powietrze, woda – styropian przedstawiono na rys. 22. Składa się ona z następujących zespołów i elementów:

- zbiornika zasypowego **1** o objętości 0.14 m wykonanego w kształcie walca zakończonego w górnej części powierzchnią stożkową. W dolnej części wmontowano dwa zawory "e" i "f" doprowadzające wodę do układu, natomiast w części stożkowej umieszczono otwór zasypowy (zakręcony korkiem "i"), którym doprowadzany jest do zbiornika styropian,
- rurociągu doprowadzającego wodę **2** połączonego ze zbiornikiem zasypowym,
- rurociągu pomiarowego **3** zmontowanego z rur stalowych i szklanych o średnicy $D = 0.1$ m,
- rurociągu odmiarowego **5** służącego do dokładnego określania natężenia przepływu mieszaniny wykonanego ze szkła organicznego,
- dyszy wlotu sprężonego powietrza **6** z wymiennymi końcówkami **9** o otworach $d_1 = 0.001, 0.0015, 0.002$ i 0.004 m,
- rotametri **7** służącego do pomiaru objętościowego natężenia przepływu powietrza,
- układu sprężonego powietrza **8** składającego się ze sprężarki tłokowej typu 8JW60 o wydajności 16 m³/h przy ciśnieniu 0.6 MPa,
- dwóch manometrów zabudowanych w układzie sprężonego powietrza i zespołu zaworów regulujących, zapewniających otrzymanie zadanego natężenia przepływu wody i powietrza.

5.5.2. Zasada prowadzenia pomiarów

Celem przygotowania instalacji do badań napełniono zbiornik zasypowy 1 styropianem przez otwór "i" umieszczony w części stożkowej zbiornika, a następnie otwierając zawory "a", "b" i "d" napełniono rurociągi pomiarowy 3 wodą.

Po napełnieniu wodą rurociągu pomiarowego 3 odkręcano zawory "c", "e" i "f" tak, aby woda uzupełniła zbiornik zasypowy 1. Aby można było prowadzić pomiary przy prędkości wody równej zero, odcinano jej dopływ zaworami "a", "e" i "f", a następnie regulowano dopływ cząstek styropianu za pomocą zaworu "c". Podczas prób, gdy prędkość wody miała być różna od zera, zmieniano objętościowe natężenie przepływu zaworami "a", "e" i "f", a jego wartość określono, mierząc ilość wody nalanej do zbiornika odmiarowego 5. Po ustaleniu zadanej prędkości mierzono czas przepływu cząstek styropianu na odcinkach AB i AC.

Po zakończeniu prób z cząstkami styropianu przeprowadzono próby dla pęcherzyków powietrza. Miały one przebieg jak w przypadku styropianu.

Identycznie regulowano przepływ wody w rurociągu pomiarowym. Powietrze doprowadzono przez dysze 6, jego objętościowe natężenie przepływu regulowano zaworami "g" i "h". Wartość natężenia przepływu odczytywano za pomocą rotametu 7.

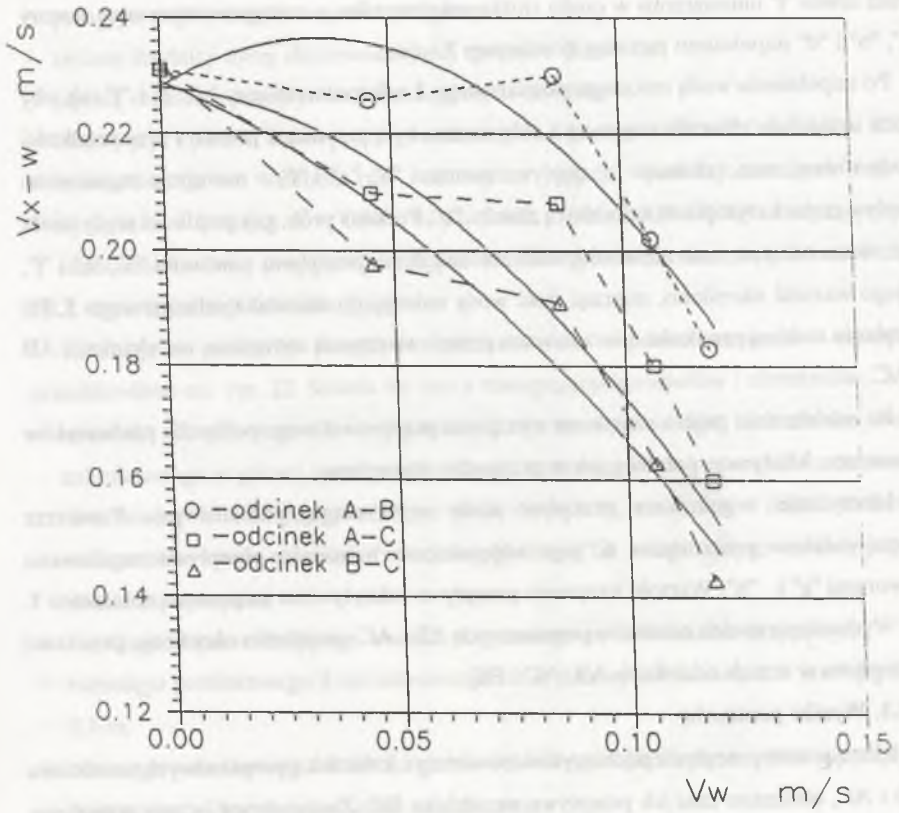
Wydzielenie dwóch odcinków pomiarowych AB i AC umożliwiło określenie prędkości przepływu w trzech odcinkach AB, AC i BC.

5.5.3. Wyniki pomiarów

Mierząc czas przepływu pęcherzyków powietrza i kuleczek styropianowych na odcinku AB i AC, obliczano czas ich przepływu na odcinku BC. Znając drogę i czasy przepływu, wyznaczono prędkości przepływu. Znając również prędkość przepływu wody, wyznaczono różnice prędkości przepływu cząstek styropianu v_{x-w} i powietrza v_{p-w} w wodzie.

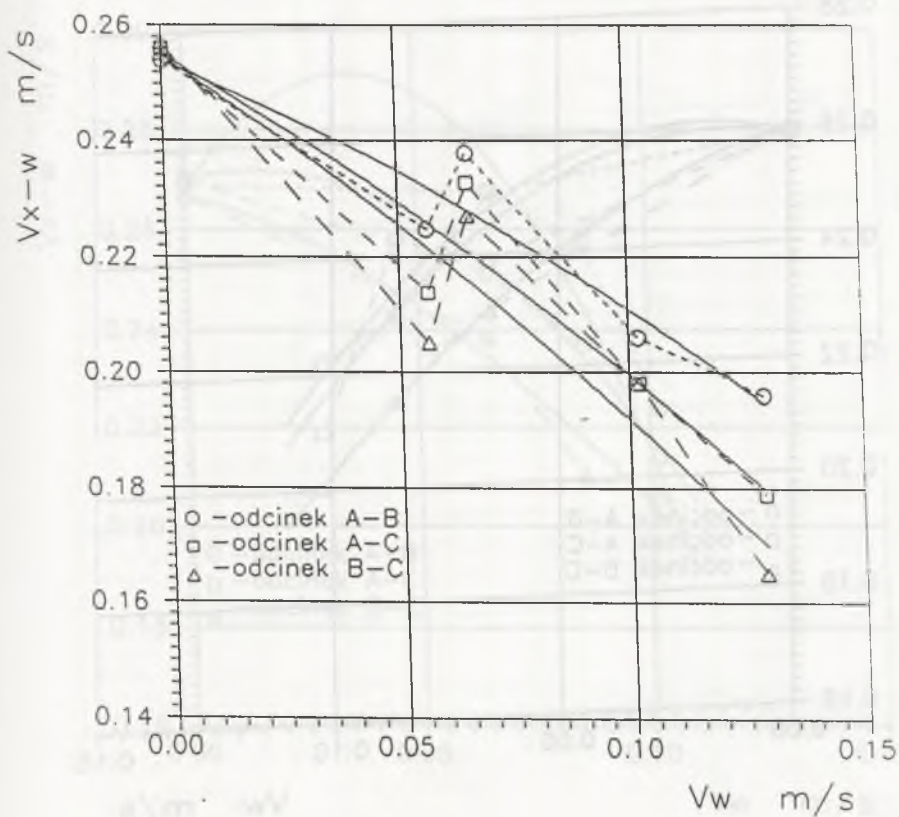
Uzyskane wyniki zobrazowano graficznie na rys. 23...28, na których naniesiono odpowiadające im krzywe regresji krzywoliniowej o postaci:

$$v_{x-w} = v_{p-w} = a_0 + \frac{a_1}{v_w} + \frac{a_2}{\sqrt{v_w}} \quad (5.67)$$



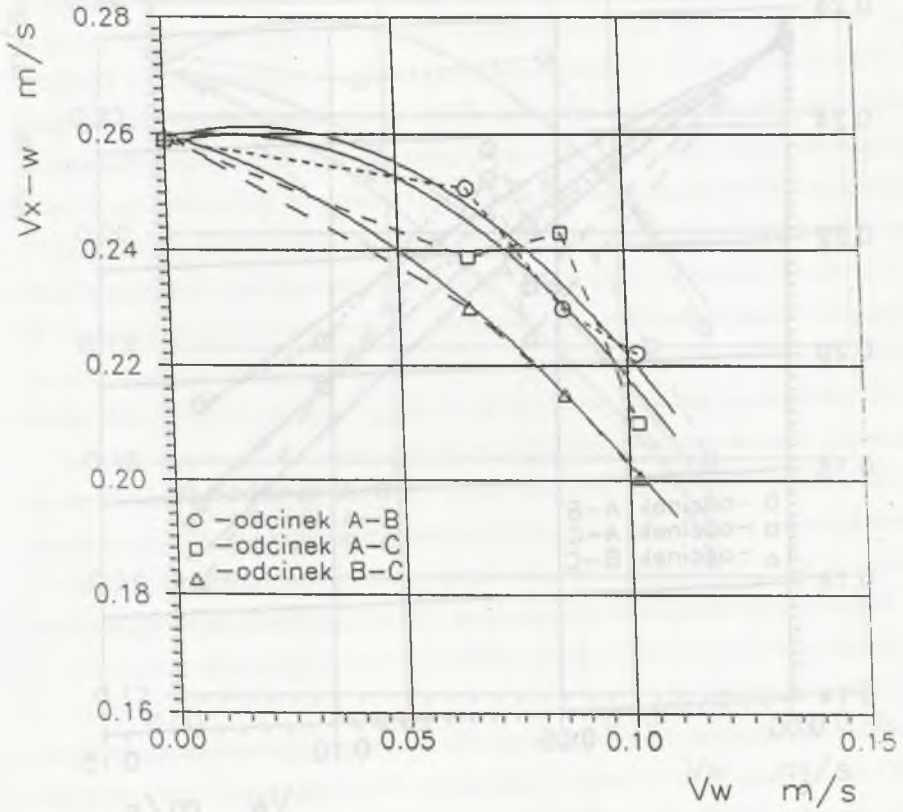
Rys. 23. Zależność różnicy prędkości przepływu cząstek styropianu o średnicy $d_x = 2...3$ mm w wodzie

Fig. 23. Dependence of difference of flow velocity of foamed polystyrene particles with diameter $d_x = 2...3$ mm in water



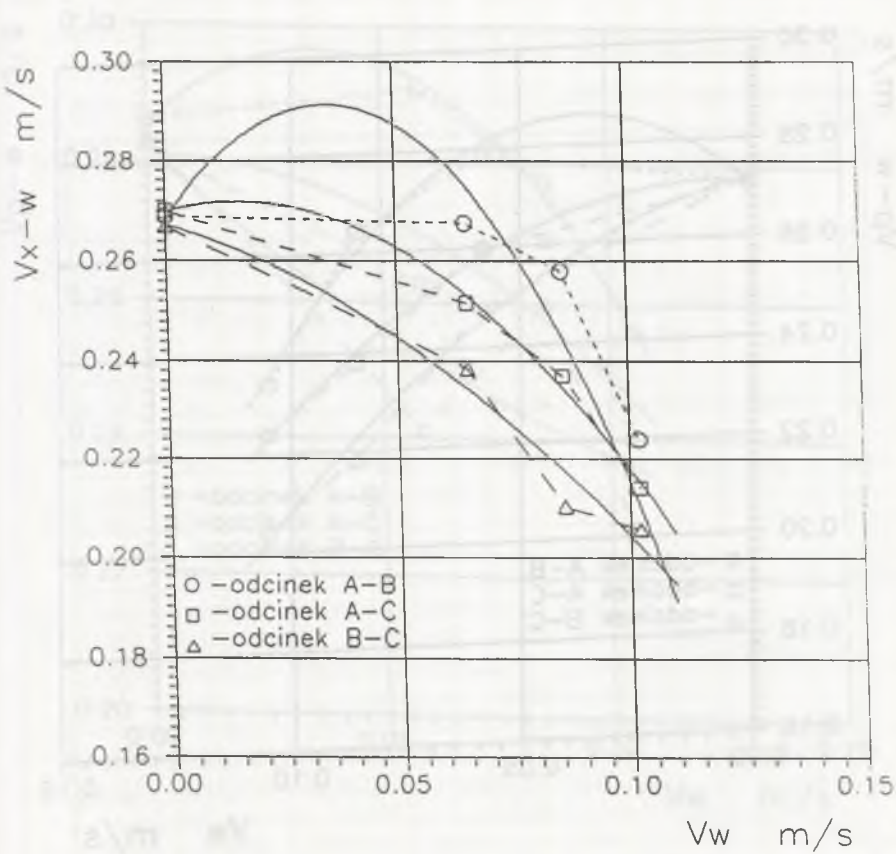
Rys. 24. Zależność różnicy prędkości przepływu cząstek styropianu o średnicy $d_x=3...4\text{mm}$ w wodzie

Fig. 24. Dependence of difference of flow velocity of foamed polystyrene particles with diameter $d_x=3...4\text{ mm}$ in water



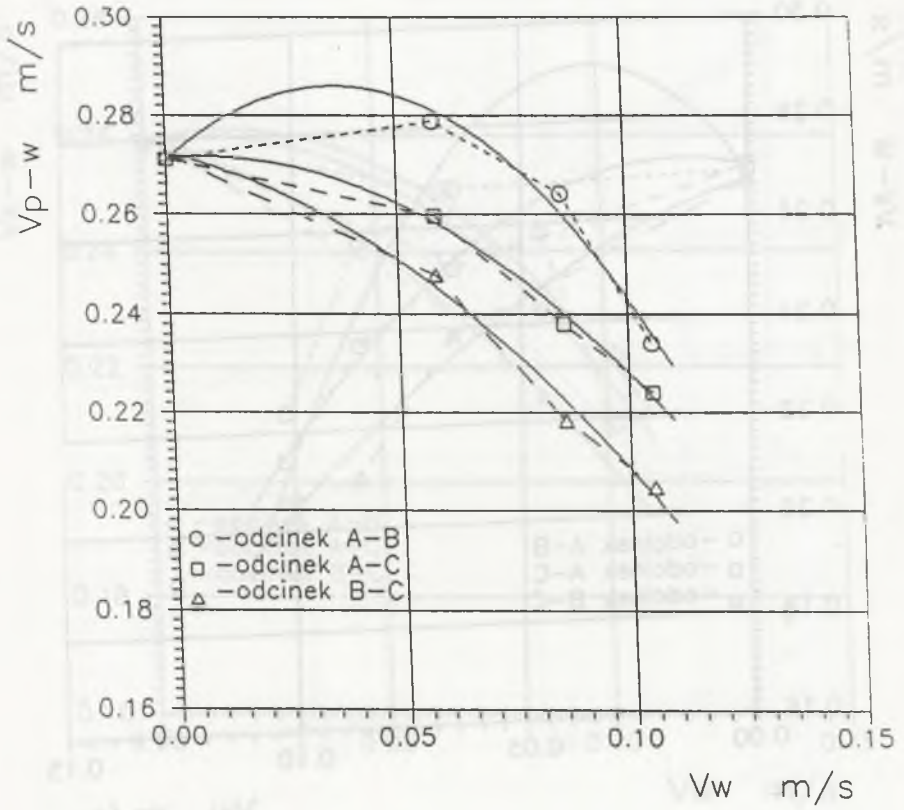
Rys. 25. Zależność różnicy prędkości przepływu cząstek styropianu o średnicy $d_x=4...5\text{mm}$ w wodzie

Fig. 25. Dependence of difference of flow velocity of foamed polystyrene particles with diameter $d_x=4...5\text{mm}$ in water

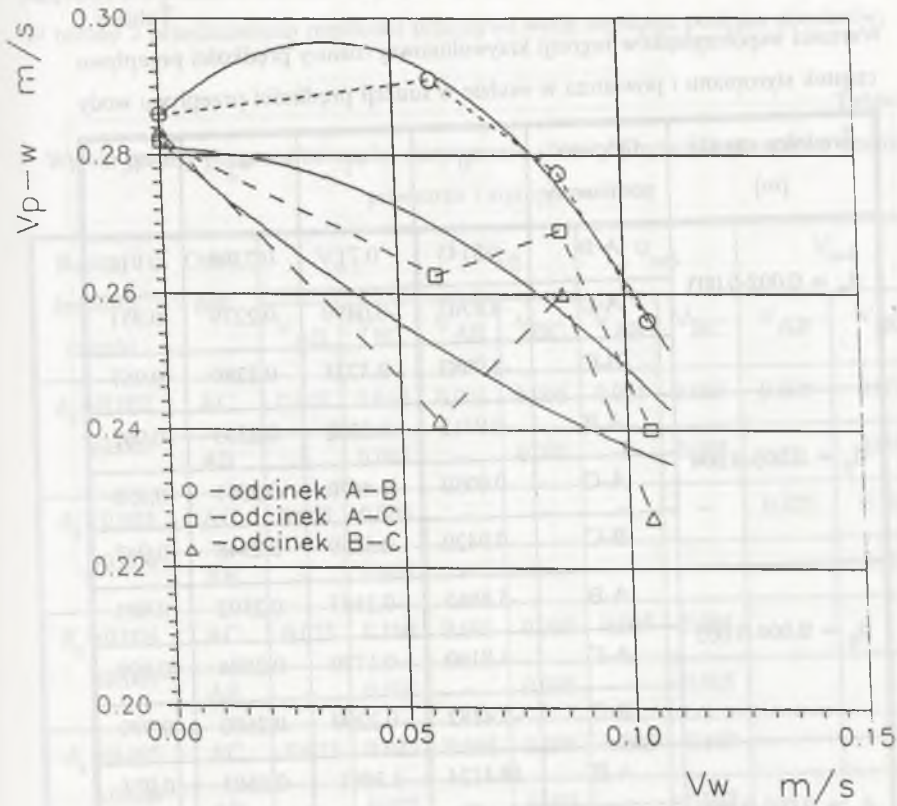


Rys. 26. Zależność różnicy prędkości przepływu cząstek styropianu o średnicy $d_x = 5...6$ mm w wodzie

Fig. 26. Dependence of difference of flow velocity of foamed polystyrene particles with diameter $d_x = 5...6$ mm in water



Rys. 27. Zależność różnicy prędkości przepływu pęcherzyków powietrza o średnicy $d_p = 5...6\text{mm}$ w wodzie
 Fig. 27. Dependence of difference of flow velocity of air bubbles with diameter $d_p = 5...6\text{mm}$ in water



Rys. 28. Zależność różnicy prędkości przepływu pęcherzyków powietrza o średnicy $d_p = 6...7\text{mm}$ w wodzie
 Fig. 28. Dependence of difference of flow velocity of air bubbles with diameter $d_p = 6...7\text{mm}$ in water

Wartości współczynników regresji i współczynnika korelacji zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Wartości współczynników regresji krzywoliniowej różnicy prędkości przepływu cząstek styropianu i powietrza w wodzie w funkcji prędkości przepływu wody

Średnica cząstki [m]	Odcinek pomiarowy	a_0	a_1	a_2	R
$d_x = 0.002-0.003$	A-B	-9.9145	0.71	0.2269	0.912
	A-C	-4.8707	-0.0499	0.2279	0.951
	B-C	-2.9983	-0.3225	0.2289	0.967
$d_x = 0.003-0.004$	A-B	-0.9713	-0.3332	0.2539	0.962
	A-C	-0.9059	-0.4670	0.2551	0.958
	B-C	-0.9420	-0.5359	0.2548	0.947
$d_x = 0.004-0.005$	A-B	-5.8863	-0.2147	0.2592	0.983
	A-C	-5.8180	-0.1770	0.2584	0.899
	B-C	-3.4182	-0.2290	0.2600	0.999
$d_x = 0.005-0.006$	A-B	18.4124	1.3091	0.2683	0.951
	A-C	7.6423	0.2442	0.2699	0.997
	B-C	3.6017	0.2716	0.2674	0.983
$d_p = 0.005-0.006$	A-B	-10.8907	0.8134	0.2707	0.989
	A-C	-5.1475	0.0815	0.2712	0.997
	B-C	-4.3295	-0.2076	0.2722	0.995
$d_p = 0.006-0.007$	A-B	-8.2344	0.5885	0.2558	0.996
	A-C	-3.1040	-0.0091	0.2810	0.867
	B-C	1.6056	-0.6059	0.2820	0.840

Istotność różnicy uzyskanych wartości pomiarowych prędkości przepływu w odcinkach AB, AC i BC poddano analizie statystycznej i uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2. W tabeli 3 przedstawiono prędkości przepływu wody uzyskane podczas pomiarów.

Tabela 2

Wyniki analizy poziomu istotności statystycznej różnicy prędkości przepływu cząstek powietrza i styropianu

Rodzaj i średnica cząstki	Odcinek	V_{w1}		V_{w2}		V_{w3}		V_{w4}	
		V_{AB}	V_{BC}	V_{AB}	V_{BC}	V_{AB}	V_{BC}	V_{AB}	V_{BC}
$d_x=0.002$ $\div 0.003$	AC	0.005	0.010	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
	AB	–	0.005	–	0.005	–	0.005	–	0.005
$d_x=0.003$ $\div 0.004$	AC	0.005	0.005	–	–	–	–	0.025	0.100
	AB	–	0.005	–	–	–	–	–	0.005
$d_x=0.004$ $\div 0.005$	AC	0.025	0.100	0.005	0.005	0.005	0.005		
	AB	–	0.005	–	0.005	–	0.005		
$d_x=0.005$ $\div 0.006$	AC	0.025	0.025	0.005	0.005	0.005	0.100		
	AB	–	0.005	–	0.005	–	0.025		
$d_p=0.005$ $\div 0.006$	AC	0.005	0.005	0.005	0.005	0.100	0.005		
	AB	–	0.005	–	0.005	–	0.005		
$d_p=0.006$ $\div 0.007$	AC	0.050	0.005	0.005	0.005	0.005	0.010		
	AB	–	0.100	–	0.005	–	0.005		

Wartości prędkości wody przy pomiarze prędkości przepływu kuleczek styropianowych i powietrza

d [mm]	V_{w1} [m/s]	V_{w2} [m/s]	V_{w3} [m/s]	V_{w4} [m/s]
$d_x = 2 \div 3$	0.0453	0.0860	0.1060	0.1180
$d_x = 3 \div 4$	0.0563	0.0653	0.1020	0.1290
$d_x = 4 \div 5$	0.0653	0.0860	0.1020	
$d_x = 5 \div 6$	0.0653	0.0860	0.1020	
$d_p = 5 \div 6$	0.0583	0.8590	0.1050	
$d_p = 6 \div 7$	0.0583	0.8590	0.1050	

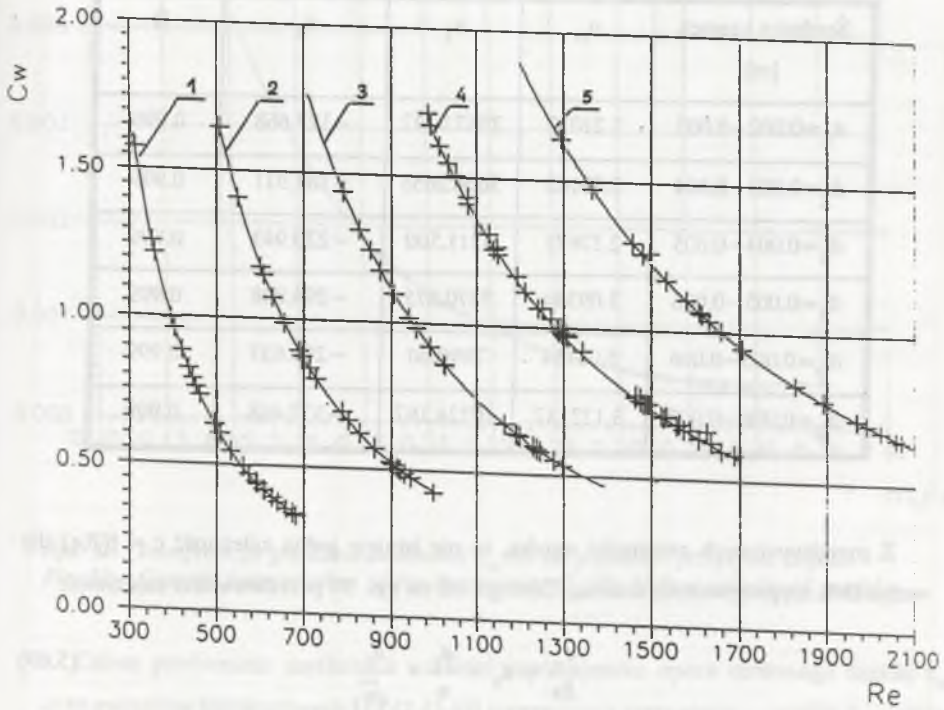
Z analizy uzyskanych danych wynika, że prędkość względna przepływu kuleczek styropianowych i pęcherzyków powietrza w poszczególnych odcinkach rurociągu jest istotnie różna i zmniejsza się z wysokością i prędkością przepływu wody.

Celem lepszego opisu zjawiska przepływu wyznaczono liczbę Reynoldsa Re oraz współczynnik oporu czołowego c_w z ogólnie znanej zależności na prędkość opadania cząstki stałej w wodzie.

Uzyskane wartości poddano analizie regresji, uzyskując zależności w postaci funkcji:

$$c_w = a_0 + \frac{a_1}{Re} + \frac{a_2}{\sqrt{Re}} \quad (5.68)$$

i przedstawiono graficznie na rys. 29.



1 - $d_x = 0.002 - 0.003$ [m]

2 - $d_x = 0.003 - 0.004$ [m]

3 - $d_x = 0.004 - 0.005$ [m]

4 - $d_x = 0.005 - 0.006$ [m]

5 - $d_x = 0.006 - 0.007$ [m]

Rys. 29. Zależność współczynnika oporu czołowego cząstek c_w od liczby Reynoldsa Re
 Fig. 29. Coefficient of head resistance as a function of Reynold's number Re

Wartości współczynników regresji zestawiono w tabelicy 4.

Tablica 4

Wartości współczynników regresji krzywoliniowej dla zależności oporu czołowego cząstki c_w od liczby Reynoldsa Re .

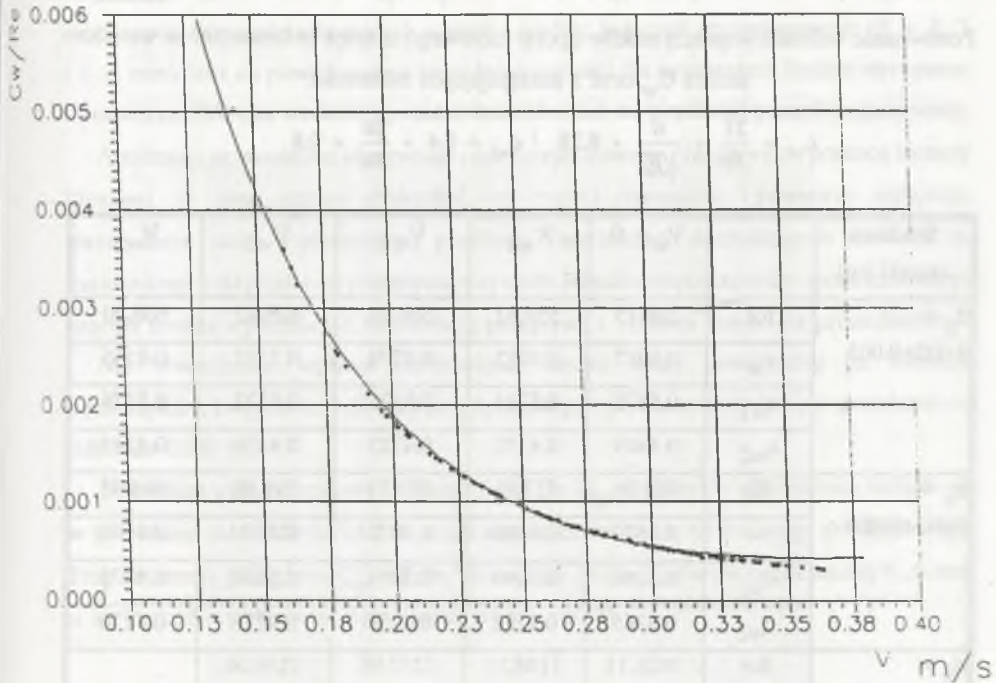
Średnica cząstek [m]	a_0	a_1	a_2	R
$d_x=0.002-0.003$	2.21012	2057.0137	-127.668	0.999
$d_x=0.003-0.004$	2.58103	3664.2656	-183.911	0.999
$d_x=0.004-0.005$	2.57675	5311.500	-220.943	0.999
$d_x=0.005-0.006$	3.09384	7870.875	-294.808	0.999
$d_p=0.005-0.006$	3.06134	7890.00	-293.637	0.999
$d_p=0.006-0.007$	3.122137	10224.187	-337.468	0.999

Z przedstawionych zależności wynika, że nie istnieje jedna zależność $c = f(Re)$ dla wszystkich rozpatrywanych średnic. Dlatego też na rys. 30 przedstawiono zależność:

$$\frac{c_w}{Re} = a_0 + \frac{a_1}{v} + \frac{a_2}{\sqrt{v}} \quad (5.69)$$

która jest niezależna od średnicy rozpatrywanej cząstki.

Interpretację graficzną zgodności przedstawionej funkcji z wynikami doświadczeń przedstawia rys. 30.



Rys. 30. Interpretacja graficzna zależności c_w/Re od prędkości przepływu cząstek
 Fig. 30. Graphic interpretation of the dependence C_w/Re of flow velocity of particles

Celem porównania uzyskanych wartości współczynnika oporu czołowego cząstki c_w oraz związków literaturowych [15,42,43,45] sporządzono zestawienie – tablica 5 – gdzie:

c_w – współczynnik wyznaczony przez autora,

$$c_{w1} = \frac{21}{Re} + \frac{6}{\sqrt{Re}} + 0,28 \quad \text{wg Kùrtnera dla } 0,1 \leq Re \leq 4 \times 10^3 \quad (5.70)$$

$$c_{w2} = 0,4 + \frac{26}{Re} \times 0,8 \quad \text{dla } 1 < Re < 10^4 \quad (5.71)$$

Porównanie wartości współczynników oporu czotowego cząstek obliczonych ze wzorów autora C_w oraz z następujących zależności:

$$c_{w1} = \frac{21}{Re} + \frac{6}{\sqrt{Re}} + 0.28 \quad \text{i} \quad c_{w2} = 0.4 + \frac{26}{Re} \times 0.8$$

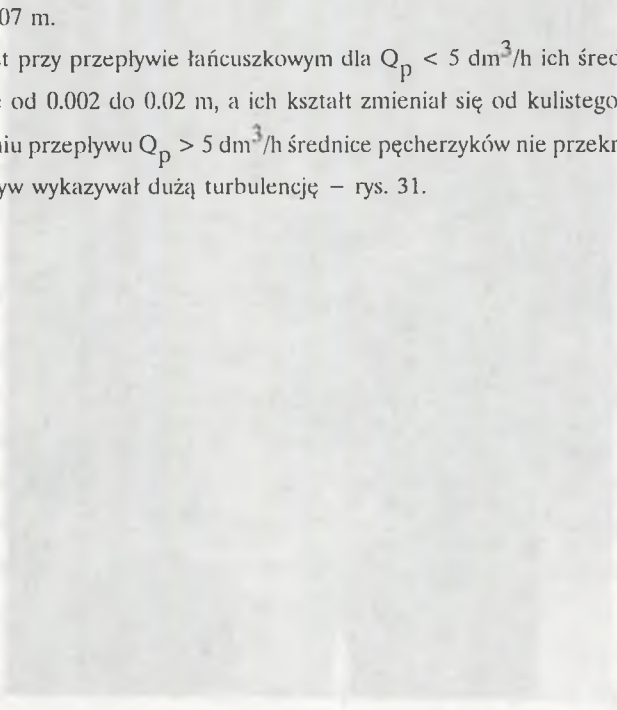
Srednica cząstki [m]		$V_w = 0$	V_{w1}	V_{w2}	V_{w3}	V_{w4}
$d_x = 0.002 \div 0.003$	Re	508.15	558.52	639.56	626.42	608.90
	c_w	0.6037	0.4952	0.3770	0.3392	0.4165
	c_{w1}	0.5875	0.5714	0.5501	0.5532	0.5576
	c_{w2}	0.4409	0.4370	0.4325	0.4330	0.4341
$d_x = 0.003 \div 0.004$	Re	785.06	827.93	913.79	919.92	944.45
	c_w	0.6870	0.6180	0.5070	0.5000	0.4750
	c_{w1}	0.5240	0.5140	0.5014	0.5007	0.4975
	c_{w2}	0.4265	0.4252	0.4227	0.4226	0.4220
$d_x = 0.004 \div 0.005$	Re	1021.11	1198.52	1237.95	1230.06	
	c_w	0.8630	0.6270	0.5870	0.5950	
	c_{w1}	0.4883	0.4708	0.4673	0.4681	
	c_{w2}	0.4204	0.4173	0.4168	0.4169	
$d_x = 0.005 \div 0.006$	Re	1301.03	1527.51	1556.00	1522.00	
	c_w	0.9720	0.7100	0.6840	0.6645	
	c_{w1}	0.4624	0.4473	0.4456	0.4475	
	c_{w2}	0.4160	0.4136	0.4134	0.4136	
$d_p = 0.005 \div 0.006$	Re	1305.85	1532.33	1561.24	1585.33	
	c_w	0.9782	0.7104	0.6844	0.6638	
	c_{w1}	0.4621	0.4470	0.4453	0.4439	
	c_{w2}	0.4159	0.4136	0.4133	0.4131	
$d_p = 0.006 \div 0.007$	Re	1605.92	1828.01	2021.64	1964.69	
	c_w	1.0677	0.8240	0.6737	0.7134	
	c_{w1}	0.4428	0.4318	0.4238	0.4260	
	c_{w2}	0.4129	0.4114	0.4103	0.4106	

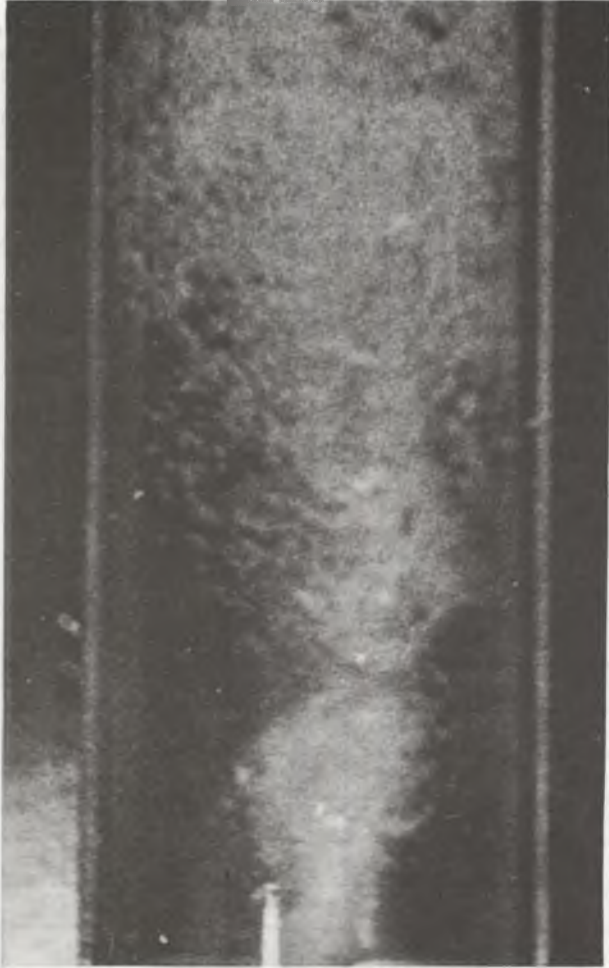
Przedstawione wartości współczynników wskazują na pewne obszary zgodności uzyskanych zależności dla małych wartości średnic kuleczek styropianowych ($d = 2...3$ i $3...4$ mm) oraz na powiększające się różnice wartości dla pozostałych średnic styropianu i powietrza. Różnice wartości są uzależnione również od prędkości przepływającej wody.

Analizując prowadzone obserwacje oraz zarejestrowane przepływy za pomocą kamery filmowej 16 mm, można stwierdzić, że cząstki styropianu i powietrza wykonują nieregularne ruchy w płaszczyźnie poziomej o wartościach dochodzących do 0.015 m, uzależnionych od prędkości przepływającej wody. Różnice współczynnika oporu czołowego cząstek można wytłumaczyć turbulencją przepływu i ruchem innym niż prostoliniowy.

Nie stwierdzono wpływu zmienionych średnic dyszy powietrznej na średnice pęcherzyków, których wartość przy pojedynczym przepływie zmieniała się w przedziale od 0.005 do 0.007 m.

Natomiast przy przepływie łańcuszkowym dla $Q_p < 5 \text{ dm}^3/\text{h}$ ich średnica wahała się w przedziale od 0.002 do 0.02 m, a ich kształt zmieniał się od kulistego do dyskowego. Przy natężeniu przepływu $Q_p > 5 \text{ dm}^3/\text{h}$ średnice pęcherzyków nie przekraczały 5...6 mm, a ich przepływ wykazywał dużą turbulencję – rys. 31.





Rys. 31. Widok przepływu pęcherzyków powietrza w wodzie dla $Q_p > 5 \text{ dm}^3/\text{h}$
 Fig. 31. View of the flow of air bubbles in water for $Q > 5 \text{ dm}^3/\text{hour}$

6. BADANIA PARAMETRÓW PRZEPLYWU MIESZANIN WIELOFAZOWYCH W INSTALACJI LABORATORYJNEJ

Celem przeprowadzenia obserwacji zjawisk występujących w przepływach mieszanin wielofazowych zbudowano nową instalację laboratoryjną (rys. 32), która umożliwiła badanie i rejestrowanie interesujących zjawisk oraz porównywanie efektywności działania trzech sposobów transportu cząstek stałych:

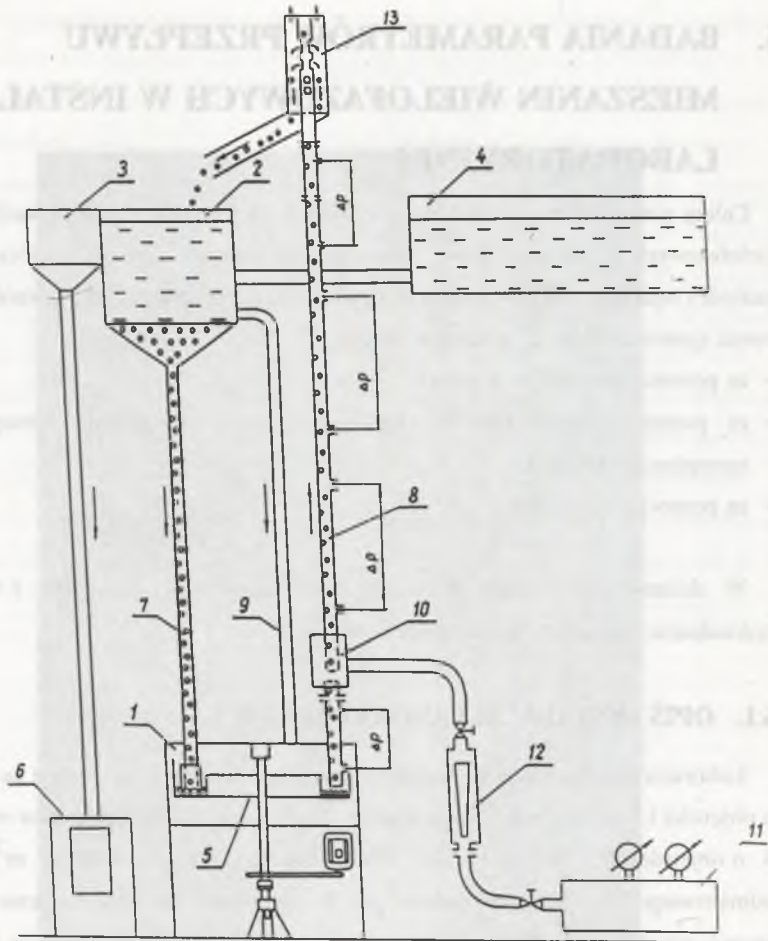
- za pomocą sprężonego powietrza,
- za pomocą cząstek stałych o gęstości mniejszej od gęstości cieczy (kuleczki styropianowe [40,42]),
- za pomocą strumienicy.

W dalszej części pracy omawiane będą zagadnienia związane z transportem hydrauliczno-pneumatycznym cząstek stałych.

6.1. OPIS INSTALACJI LABORATORYJNEJ

Laboratoryjna instalacja do badań trójfazowego przepływu składa się ze zbiornika 1 o objętości 1.5 m^3 , zbiornika przelewowego 2 o objętości 0.75 m^3 , zbiornika odmiarowego 3 o objętości 0.5 m^3 , zbiornika wyrównawczego 4 o objętości 2 m^3 , zbiornika odmiarowego 6, talerza obrotowego 5 służącego do przenoszenia materiału transportowanego z rurociągu opadowego 7 do rurociągu transportowego 8, rurociągu wyrównawczego 9, mieszalnika 10, oddzielnicy powietrza 13, rotametri 12 i układu sprężonego powietrza (sprężarka + zbiornik wyrównawczy) 11.

Jednym z ciekawszych rozwiązań instalacji jest zbiornik główny (rys. 33), którego konstrukcja umożliwiła wszechstronne badania i rejestrację parametrów zasysania cząstek stałych.

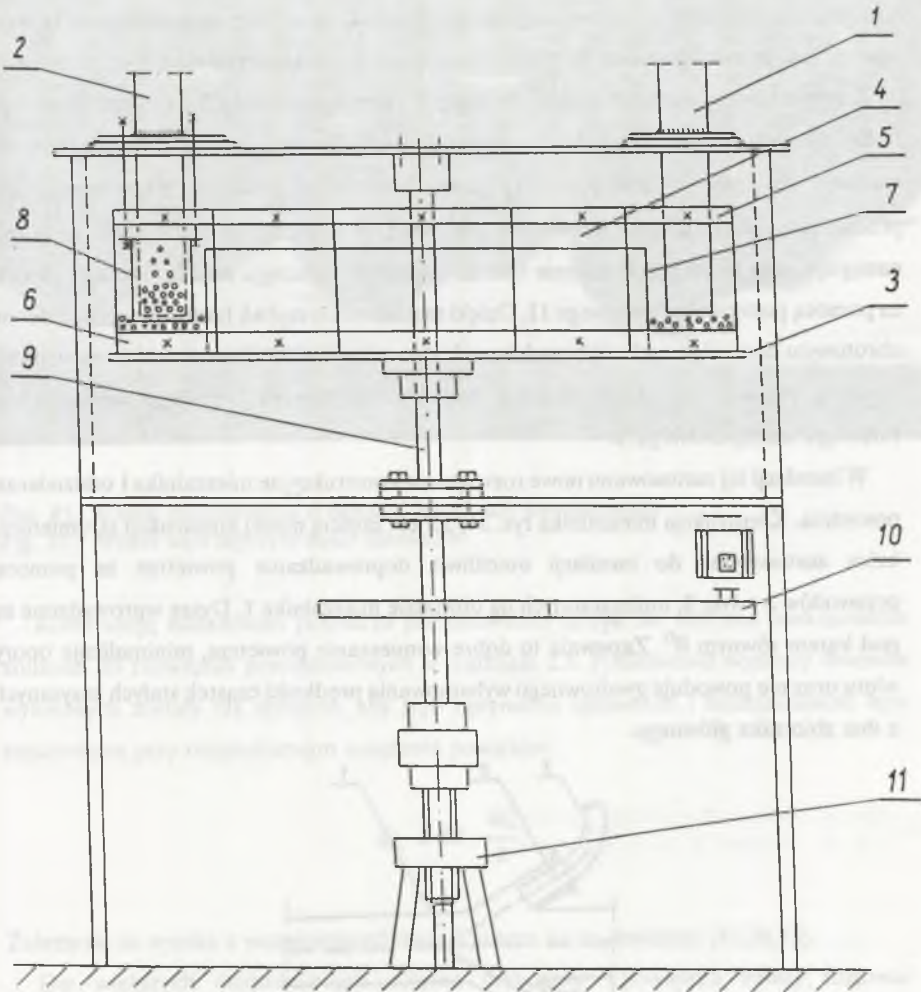


Rys. 32. Schemat instalacji laboratoryjnej do transportu hydrauliczno-pneumatycznego cząstek stałych:

1 - zbiornik główny, 2 - zbiornik przelewowy, 3 - zbiornik odmiarowy, 4 - zbiornik wyrównawczy, 5 - rurociąg transportowy, 6 - zbiornik odmiarowy, 7 - rurociąg opadowy, 8 - rurociąg wyrównawczy, 9 - mieszalnik, 10 - oddzielacz powietrza, 11 - rura szklana, 12 - rotametr, 13 - układ sprężonego powietrza

Fig. 32. Scheme of laboratory installation for research of hydraulic-pneumatic transportation of solid particles:

1 - main tank, 2 - overflow tank, 3 - measurement tank, 4 - compensation tank, 5 - transportation pipeline, 6 - measurement tank, 7 - gravitational pipeline, 8 - compensation pipeline, 9 - mixer, 10 - air separator, 11 - glass pipe, 12 - rotameter, 13 - compressed air installation



Rys. 33. Schemat zbiornika głównego instalacji:

1 – rurociąg transportowy, 2 – rurociąg opadowy, 3 – talerz obrotowy, 4 – szyby hartowane

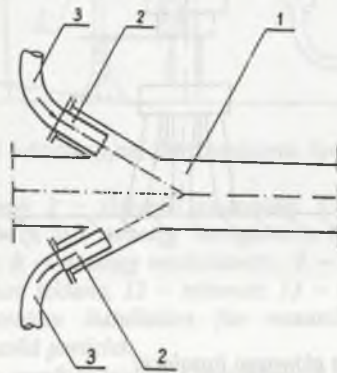
Fig. 33. Scheme of the main tank of the installation:

1 – transportation pipeline, 2 – gravitational pipeline, 3 – rotated dish, 4 – hardening panes

Podstawowym elementem zbiornika jest talerz obrotowy 3, na obwodzie którego przymocowano szyby hartowane 4 za pomocą kątowników 5 i 6. Utworzona powierzchnia w kształcie wieloboku stanowi zewnętrzne ograniczenie transportowanego materiału, który dostaje się na talerz obrotowy rurociągiem opadowym 2. Natomiast ograniczenie od strony wewnętrznej stanowi pierścień 7 z blachy i przyspawany punktowo do talerza obrotowego.

Transportowany materiał dostaje się poprzez rurociąg opadowy 2 na talerz obrotowy 3. Dzięki zastosowaniu regulatora wysokości usypu 8 ustala się określoną wysokość warstwy materiału ziarnistego, który przez zastosowanie układu napędowego 10 przenoszony jest ruchem obrotowym pod wlot rurociągu transportowego 1, gdzie następuje jego zasysanie. Położenie talerza względem rurociągu można ustalać również za pomocą podnośnika śrubowego 11. Dzięki zastosowaniu szybek hartowanych na talerzu obrotowym oraz większych szyb na ścianach zbiornika można obserwować i rejestrować przebieg procesu usypywania warstwy materiału na talerzu oraz jego zasysania do rurociągu transportowego 1.

W instalacji tej zastosowano nowe rozwiązania konstrukcyjne mieszalnika i oddzielnicy powietrza. Konstrukcja mieszalnika rys. 34, 35 jest częścią nowej konstrukcji strumienicy, która zastosowana do instalacji umożliwia doprowadzanie powietrza za pomocą przewodów 3 i dysz 2, umieszczonych na obwodzie mieszalnika 1. Dysze wprowadzone są pod kątem równym 80° . Zapewnia to dobre wymieszanie powietrza, minimalizuje opory wlotu oraz nie powoduje gwałtownego wyhamowania prędkości cząstek stałych zasysanych z dna zbiornika głównego.



Rys. 34. Schemat mieszalnika powietrza:
1 – korpus, 2 – dysze, 3 – przewody powietrzne

Fig. 34. Scheme of the air mixer:
1 – the body of the mixer, 2 – jets, 3 – air pipes



Rys. 35. Widok mieszalników o różnych średnicach wewnętrznych
 Fig. 35. Mixers with different inner diameters

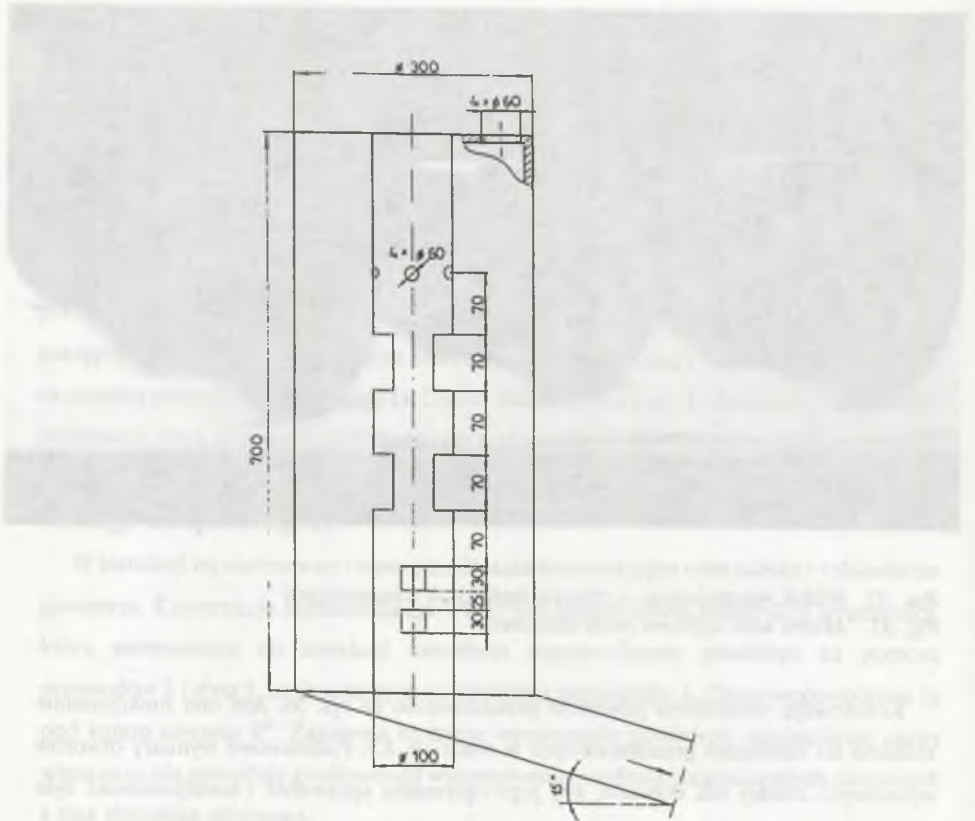
Konstrukcję oddzielnika powietrza przedstawiono na rys. 36. Jest ona funkcjonalnie zbliżona do rozwiązań przedstawionych w rozdziale 2.3. Podstawowe wymiary otworów wylotowych zostały tak dobrane, aby jego optymalna sprawność i funkcjonalność była zapewniona przy objętościowym natężeniu powietrza

$$Q_p \leq 60 \frac{m^3}{h}$$

Zależność ta wynika z wcześniejszych badań autora na tej instalacji [41,50,52].

Dla większych objętościowych natężeń przepływu powietrza należy stosować oddzielnik o innych wymiarach otworów, które umożliwią wypływ hydromieszanki z możliwie małymi stratami.

Oddzielnik powietrza został tak skonstruowany, aby w jego górnej części powietrze tworzyło rodzaj poduszki (amortyzatora) dla cząstek stałych i wody. (Przebieg pracy oddzielnika powietrza dla określonych parametrów przepływu powietrza został zarejestrowany na kasecie VHS i jest dostępny dla zainteresowanych.)



Rys. 36. Schemat oddzielnicy powietrza
 Fig. 36. Scheme of an air separator

Na tak przygotowanej instalacji przeprowadzono następujące badania:

- objętościowego natężenia przepływu wody Q_W w zależności od objętościowego natężenia przepływu powietrza Q_P ,
- objętościowego natężenia przepływu cząstek stałych Q_S o średnicy $d_s = 0.008$ m w funkcji objętościowego natężenia przepływu powietrza Q_P ,
- prędkości unoszenia (zawisania) i prędkości transportowej cząstek stałych o kształtach kulistych, sześciennych i prostopadłościennych o różnej wielkości i gęstości średniej
- prędkości unoszenia i prędkości transportowej wybranych materiałów naturalnych.

6.2. BADANIE PRĘDKOŚCI UNOSZENIA I PRĘDKOŚCI TRANSPORTOWEJ CZĄSTEK STAŁYCH W INSTALACJACH TRANSPORTU HYDRAULICZNO – PNEUMATYCZNEGO

6.2.1. Rozpoznanie literaturowe

W literaturze naukowej znane są teorie i wyniki badań dotyczące prędkości unoszenia i prędkości transportowej cząstek stałych w hydrotransportie i pneumatycznym transportie. Brakuje ich jednak w przypadku instalacji z mieszaniną wodno – powietrzną. Jedyną znaną autorowi publikacją dotyczącą tego zagadnienia jest praca [22], w której autorzy podają wzory teoretyczne na wyznaczenie prędkości unoszenia:

$$v_w = 0.82 \sqrt{\frac{gR}{c_w} \left[\rho_s \frac{(1+q)}{\rho_m} - 1 \right]} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (6.1)$$

gdzie:

$$q = \frac{Q_p P_a}{Q_w \left(P_a + \frac{\rho_w gh}{2} \right)} \quad \left| \frac{\frac{m^3}{s} \text{ powietrza}}{\frac{m^3}{s} \text{ wody}} \right|$$

R – promień hydrauliczny badanego ciała;

oraz zależność na minimalną prędkość transportową:

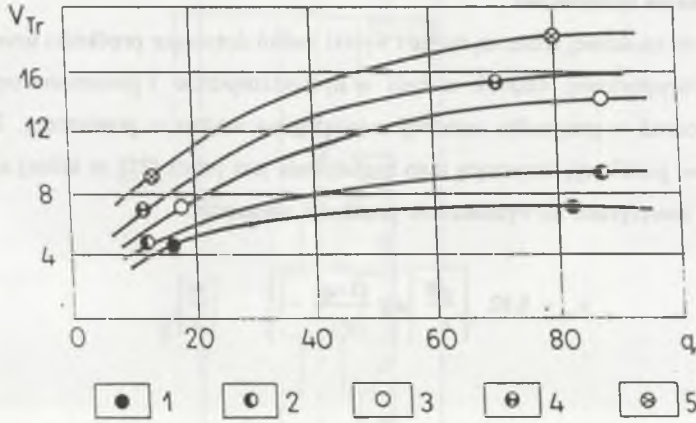
$$v_{tr} = \frac{4Q_w}{\pi D^2} (1 + q) \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (6.2)$$

Z zależności tych proponują wyznaczać współczynnik oporu czołowego cząstek:

$$c_w = 0.667 \frac{gR}{v_{tr}^2} \left[\frac{\rho_s (1 + q)}{\rho_w} - 1 \right] \quad (6.3)$$

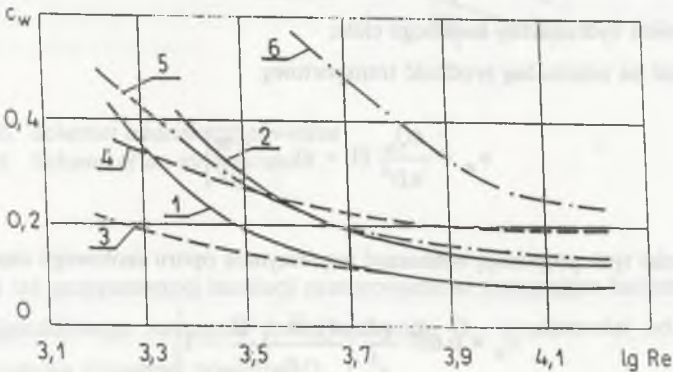
W pracy [22] przedstawiono wyniki badań na instalacji laboratoryjnej o wysokości $H = 4.95$ m i średnicy $D = 0.14$ m. Do badań stosowano ciała stałe w postaci kul, sześcianów i prostopadłościanów o objętości 26.4×10^{-6} i 137×10^{-6} m³ oraz gęstości 1300, 1800, 2500, 4500, 6450 i 7800 kg/m³.

Uzyskane wyniki badań prędkości transportowej v_{Tr} przedstawiono na rys. 37, a współczynnika oporu czołowego c_w na rys. 38.



Rys. 37. Zależność prędkości transportowej od stosunku objętościowego natężenia przepływu powietrza do objętościowego natężenia przepływu wody $q(Q)$

Fig. 37. Transportation velocity as a function of an ratio of air volumetric flow rate to volumetric flow rate of water $q(Q)$



Rys. 38. Zależność współczynnika oporu czołowego c_w od liczby Re

Fig. 38. Head resistance coefficient c_w as a function of the Reynold's number Re

Trudno się ustosunkować do przedstawionych wyników badań, ponieważ w ciągu kilkunastoletnich doświadczeń autor nie zbliżył się do stosunku $Q_p/Q_w = 10$, natomiast autorzy radzieccy przedstawili swoje wyniki dla stosunku $Q_p/Q_w = 10 \dots 100$ (rys. 37). Taką ilość powietrza w stosunku do wydajności Q_w przy wysokości instalacji $H = 4.95$ m można uzyskać tylko przy stosowaniu wysokiego ciśnienia zasilania, co zmienia charakter instalacji z hydrauliczno – pneumatycznej na strumienicowo – powietrzną.

Dlatego też autor postanowił przeprowadzić własne badania laboratoryjne prędkości unoszenia (zawisania) i prędkości transportowej modeli ciał o kształtach regularnych oraz wybranych ciał naturalnych.

6.2.2. Badanie prędkości unoszenia i prędkości transportowej cząstek stałych w instalacjach transportu hydrauliczno – pneumatycznego

Prędkości unoszenia (zasysania) i prędkości transportowe zależą od kształtu ciała, rozmiarów i gęstości [16,31,35,67,68,74]. Dlatego też na opisanej instalacji laboratoryjnej przeprowadzono badania prędkości transportowej dla dwóch rodzajów ciał:

- zamodelowanych ciał o kształtach regularnych różniących się kształtem, wymiarami i gęstością,
- ciał naturalnych.

Badania ciał o kształtach regularnych

Modele cząstek stałych podwieszano na żyłce umieszczonej w osi rurociągu transportowego tak, aby znajdowały się na wysokości rury szklanej, celem prowadzenia obserwacji i rejestracji kamerą VHS. Drugi koniec żyłki był przymocowany do urządzenia rejestrującego wielkość siły ciężkości.

Właściwy pomiar polegał na stopniowym dozowaniu objętościowego natężenia przepływu powietrza do takiej wartości, przy której badane ciało zawisało w rurociągu transportowym, wykonując niewielkie ruchy wznosząco – opadające, a wskaźnik siły ciężkości znajdował się w pozycji "0". Doświadczenie powtarzano co najmniej czterokrotnie.

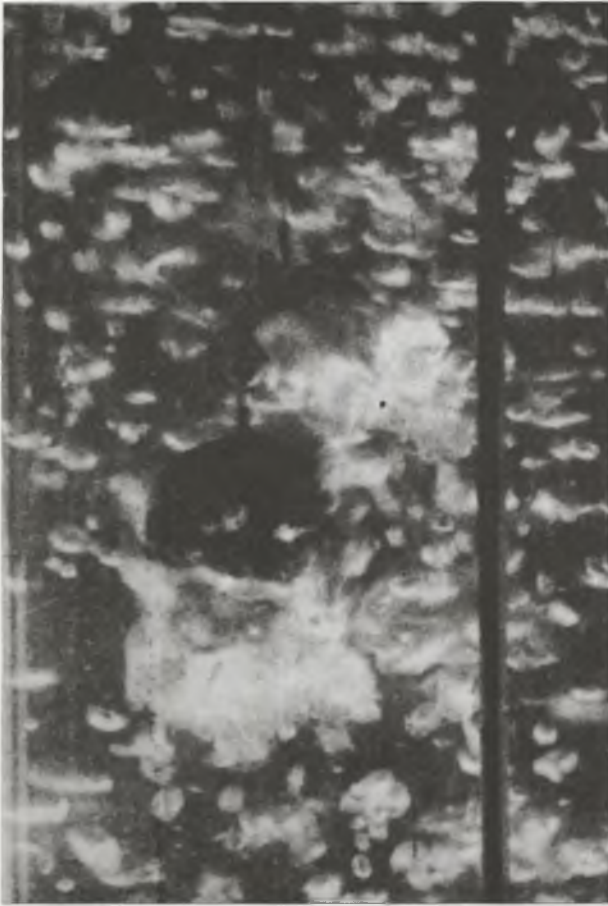
Następnie w przypadku prostopadłościanu zmieniano ustawienie płaszczyzny czołowej względem osi rurociągu i prowadzono nową serię badań.

Przykłady usytuowania ciał oraz oddziaływania na nie pęcherzyków powietrza w początkowych fazach przepływu przedstawiają rys. 39...43 dla kuli, rys. 44...46 dla prostopadłościanu oraz rys. 47 dla sześcienu.

Na przedstawionych zdjęciach można zaobserwować różnicę w charakterze opływu pęcherzyków powietrza dla kuli, prostopadłościanu i sześciianu.



Rys. 39. Opływ kuli przez mieszaninę wodno-powietrzną przy $Q_p < 5 \text{ dm}^3/\text{h}$
 Fig. 39. Flow around a sphere by water-air mixture with $Q_p < 5 \text{ dm}^3/\text{h}$



Rys. 40. Optyw kuli przez mieszaninę wodno-powietrzną przy $Q_p < 10 \text{ dm}^3/\text{h}$

Fig. 40. Flow around a sphere by water-air mixture with $Q_p < 10 \text{ dm}^3/\text{h}$



Rys. 41. Optyw kuli przez mieszaninę wodno-powietrzną przy $Q_p < 10 \text{ dm}^3/\text{h}$
Fig. 41. Flow around a sphere by water-air mixture with $Q_p < 10 \text{ dm}^3/\text{h}$



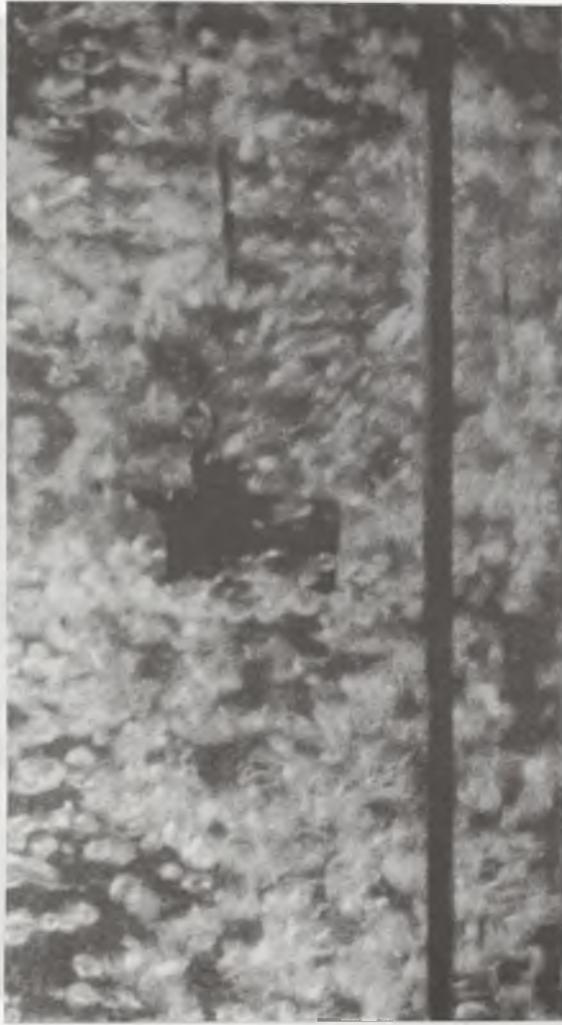
Rys. 42. Optyw kuli przez mieszaninę wodno-powietrzną przy $Q_p < 10 \text{ dm}^3/\text{h}$
Fig. 42. Flow around a sphere by water-air mixture with $Q_p < 10 \text{ dm}^3/\text{h}$



Rys. 43. Optyw kuli przez mieszaninę wodno-powietrzną przy $Q_p > 10 \text{ dm}^3/\text{h}$
Fig. 43. Flow around a sphere by water-air mixture with $Q_p > 10 \text{ dm}^3/\text{h}$



Rys. 44. *Opływ prostopadłościanu przez mieszaninę wodno-powietrzną*
Fig. 44. *Flow around a rectangular prism by water-air mixture*



Rys. 45. Optyw prostopadłościanu przez mieszaninę wodno-powietrzną
Fig. 45. Flow around a rectangular prism by water-air mixture



Rys. 46. Optyw prostopadłościanu przez mieszaninę wodno-powietrzną
 Fig. 46. Flow around a rectangular prism by water-air mixture

№	h, cm	U, cm/s	Re	Fr	Fr _{cr}	Fr _{cr} /Fr	Fr _{cr} ²	Fr _{cr} ³
1	10	10	100	0.1	1.0	10	100	1000
2	10	20	200	0.2	1.0	5	25	125
3	10	30	300	0.3	1.0	3.3	11	37
4	10	40	400	0.4	1.0	2.5	6.3	25
5	10	50	500	0.5	1.0	2.0	4.0	10
6	10	60	600	0.6	1.0	1.7	3.0	7
7	10	70	700	0.7	1.0	1.4	2.2	5
8	10	80	800	0.8	1.0	1.3	1.7	4
9	10	90	900	0.9	1.0	1.1	1.3	3
10	10	100	1000	1.0	1.0	1.0	1.0	1



Rys. 47. *Opływ sześcianu przez mieszaninę wodno-powietrzną*

Fig. 47. *Flow around a cube by water-air mixture*

Badania ciał naturalnych

Podczas badania ciał naturalnych nie stosowano podwieszania ich na żyłce, lecz umieszczano je na siatce tak, aby różniły się wielkością, kształtem, gęstością i gładkością. Tok prowadzonych badań podobny był jak dla ciał o kształtach regularnych. Z uwagi na małą gęstość badanych ciał moment zawisania i transportu rejestrowano kamerą VHS oraz obserwowano wzrokowo.

Celem porównania z badaniami literaturowymi prędkości unoszenia i transportowe wyznaczono z zależności:

$$v_{u,r} = \frac{Q_m}{\pi \times D^2} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (6.4)$$

Wyniki pomiarów i analiz przedstawiono w tablicach 6 i 7.

Tablica 6

Wyniki pomiarów prędkości unoszenia v_u i transportowej v_r
dla materiałów sztucznych

Lp.	Nazwa (kształt) modelu	Wymiary mm	ρ_s kg/m ³	Q_{pu} m ³ /h	Q_{wu} m ³ /h	δ_u m/s	Q_{pt} m ³ /h	Q_{wt} m ³ /h	δ_{tr} m/s
1	kula	d=29.95	3000	55	32.1	3.08	75	31.6	3.77
2	kula	d=29.95	2500	40	30.1	2.48	52	27.0	2.79
3	kula	d=29.95	1800	35	28.2	2.23	47	31.3	2.77
4	kula	d=29.95	1300	27	25.4	1.85	35	28.1	2.23
5	kula	d=60.05	3000	70	31.4	3.59	90	31.2	4.29
6	kula	d=60.05	2500	65	32.1	3.43	80	30.8	3.92
7	kula	d=60.05	1800	43	30.6	2.60	55	32.0	3.08
8	kula	d=60.05	1300	28	26.1	1.91	36	28.2	2.27
9	sześcian	a=26.36	7800	50	31.6	2.89	65	32.2	3.43
10	sześcian	a=25.5	2500	32	26.8	2.08	40	30.0	2.47
11	sześcian	a=26.36	1800	25	24.3	1.74	30	26.1	1.98

12	sześcian	$a=26.36$	1300	18	20.8	1.37	25	24.2	1.74
13	sześcian	$a=51.5$	3000	45	30.2	2.66	60	32.1	3.25
14	sześcian	$a=51.5$	2500	43	30.6	2.60	55	28.0	2.94
15	sześcian	$a=51.5$	1800	35	28.0	2.58	40	30.2	2.48
16	sześcian	$a=51.5$	1300	25	24.2	1.74	30	26.1	1.98
17	prostopadłościan	47x30x15.25	7800	27	26	1.87	34	28.0	2.19
18	prostopadłościan	47x30x15.25	3000	23	23.1	1.63	28	25.9	1.91
19	prostopadłościan	47x30x15.25	2500	20	22.6	1.51	27	24.0	1.80
20	prostopadłościan	47x30x15.25	1800	18	20.5	1.36	23	22.3	1.60
21	prostopadłościan	47x30x15.25	1300	15	18.2	1.17	19	21.2	1.42
22	prostopadłościan	47x15.25x30	7800	35	29	2.26	50	32.3	2.91
23	prostopadłościan	47x15.25x30	3000	28	26.5	1.93	39	29.4	2.42
24	prostopadłościan	47x15.25x30	2500	27	26	1.87	34	28.2	2.20
25	prostopadłościan	47x15.25x30	1800	25	25	1.77	29	26.5	1.96
26	prostopadłościan	47x15.25x30	1300	22	23.5	1.61	25	25	1.71
27	prostopadłościan	47x15.25x30	7800	-	-	-	-	-	-
28	prostopadłościan	47x15.25x30	3000	47	32.1	2.80	52	32.5	2.99
29	prostopadłościan	47x15.25x30	2500	42	30.4	2.56	47	31.3	2.77
30	prostopadłościan	47x15.25x30	1800	33	28.4	2.17	40	30.3	2.49
31	prostopadłościan	47x15.25x30	1300	28	26.3	1.92	36	29.0	2.29
32	prostopadłościan	56.85x49.35x30.1	7800	30	26.3	1.99	40	30.2	2.48
33	prostopadłościan	55.6x49.7x30.1	3000	25	24	1.73	33	26.4	2.10
34	prostopadłościan	55.6x49.7x30.1	2500	22	23.1	1.59	28	25.2	1.88
35	prostopadłościan	55.6x49.7x30.1	1800	18	21.2	1.39	21	22.4	1.53
36	prostopadłościan	55.6x49.7x30.1	1300	10	16.2	0.93	15	19.1	1.21
37	prostopadłościan	56.85x30.1x49.35	7800	-	-	-	-	-	-
38	prostopadłościan	56.85x30.1x49.7	3000	34	28.1	2.20	39	29.5	2.42
39	prostopadłościan	56.85x30.1x49.7	2500	28	26.4	1.92	34	28.1	2.20
40	prostopadłościan	56.85x30.1x49.7	1800	26	26.1	1.84	31	27.8	2.08
41	prostopadłościan	56.85x30.1x49.7	1300	19	21.3	1.42	22	23.3	1.60

42	prostopadłościan	30.1x49.35x56.85	7800	-	-	-	-	-	-
43	prostopadłościan	30.1x49.7x56.6	3000	37	29.3	2.34	41	30.6	2.53
44	prostopadłościan	30.1x49.7x56.6	2500	33	26.5	2.10	36	29.1	2.30
45	prostopadłościan	30.1x49.7x56.6	1800	30	27.0	2.01	32	26.8	2.08
46	prostopadłościan	30.1x49.7x56.6	1300	23	26.2	1.74	26	26.2	1.85

Tablica 7

Wyniki pomiarów prędkości unoszenia v_u i transportowej v_{tr} dla materiałów

naturalnych

Lp.	Nazwa (kształt) modelu	Wymiary mm	Objętość cm^3	Gęstość kg/m^3	Q_{pu} m^3/h	Q_{wu} m^3/h	δ_u m/s	Q_{pt} m^3/h	Q_{wt} m^3/h	δ_{tr} m/s
1	kamień ostrokrawędzisty	66x44x57	58	2.490	14	18.5	1.15	18	21.0	1.38
2	ostrokrawędzisty	57x41x30	28	2.680	10	16.5	0.94	16	19.7	1.26
3	okrągłak	58x37x25	31	2.450	15	19.4	1.22	20	22.6	1.51
4	plaski	64x35x17	22	2.440	5	11.8	0.64	10	16.5	0.94
5	cegła	47x36x37	40	2.040	7	14.0	0.74	10	16.5	0.94
6	konkreja	40x36x28x	16	1.670	7	14.0	0.74	10	16.5	0.94
7	konkreja	36x32x26x	12	1.730	7	14.0	0.74	10	16.5	0.94
8	konkreja	28x27x22	9	1.870	7	14.0	0.74	10	16.5	0.94

ANALIZA POMIARÓW PRĘDKOŚCI UNOSZENIA I PRĘDKOŚCI TRANSPORTOWEJ W RUROCIĄGACH PIONOWYCH

Ciała o kształtach regularnych

Przeprowadzone pomiary prędkości unoszenia i prędkości transportowej ciał o kształtach regularnych (kula, sześcian, prostopadłościan) wykazały ich zależność od gęstości i wymiarów badanych ciał.

Dla wszystkich badanych kształtów prędkości te rosną ze wzrostem gęstości. Z analizy wyznaczonych prędkości dla prostopadłościanów widać wyraźnie wpływ ustawienia ciała, tzn. ustawienia jego powierzchni do kierunku prędkości przepływającego strumienia hydromieszanki; i tak np. prostopadłościan wykonany ze stali o wymiarach $56.85 \times 49.35 \times 30.1$ był bez problemów unoszony przy ustawieniu największą powierzchnią do ruchu strumienia hydromieszanki. W przypadku innego ustawienia, tzn. gdy powierzchnia największa była ustawiona równolegle do przepływającego strumienia, ciało było rzucane i dociskane do ścianki rurociągu

Przy analizie prędkości unoszenia dla ciał wykonanych ze stali widać wyraźnie wpływ kształtu ciała na prędkość unoszenia. Najtrudniej są unoszone kule, potem sześciiany, a następnie prostopadłościany.

Prędkości transportowe są wyższe od prędkości unoszenia o około 10...30% i zależy to od gęstości, kształtu i rozmiarów ciała.

Ciała naturalne

Generalnie trzeba stwierdzić wpływ gęstości, wymiarów, kształtu, w szczególności to, czy kształt jest opływowy – gładki, czy ostro krawędzisty. Widać to szczególnie na przykładzie ciał 2 i 3 (tablica 7) oraz na zarejestrowanym przebiegu, gdzie tzw. okrągłak o mniejszej objętości, prawie takich samych wymiarach i gęstości ma o 30% większą prędkość unoszenia i o 15% prędkość transportową.

Badane konkracje żelazo–magnezowe miały kształt elipsoid oraz chropowatą powierzchnię istotnie różną od innych ciał. Prędkość transportowa badanych ciał jest 20...47% wyższa od prędkości unoszenia (zawisania).

Należy stwierdzić, że przeprowadzone badania – z uwagi na ich zakres – mają charakter jakościowy, pozwalający na zorientowanie się w możliwościach transportowych ciał stałych w tego typu instalacjach.

7. MODELOWANIE PRZEPŁYWU WIELOFAZOWEGO (WODA – GAZ – CIAŁA STAŁE)

7.1. ZAŁOŻENIA DO MODELU TEORETYCZNEGO

Ruch mieszaniny wodno-gazowej oraz ruch takiej mieszaniny z udziałem ciała stałego przedstawia się w postaci sumy niezależnych ruchów środków mas pęcherzy gazu, cząstek reprezentujących wodę oraz cząstek ciał stałych. Uwzględnia się także ruchy kolektywne składające się z układów tych cząstek, a będących efektem wzajemnego łączenia (zlepiania) się poszczególnych faz układu.

W odniesieniu do niezależnych ruchów cząstek poszczególnych faz przyjmuje się, że cząstki te poruszają się w polu siły ciężkości i siły wyporu wynikającej z usytuowania cząstki w ośrodku zastępczym o gęstości:

$$\rho_m = \frac{M_s + M_w + M_g}{V} \quad (7.1)$$

gdzie:

- ρ_m – gęstość ośrodka zastępczego,
- M_s – masa ciał stałych,
- M_w – masa wody,
- M_g – masa gazu,
- V – objętość instalacji,

oraz siły oporu działającej przeciwnie do różnicy prędkości cząstki i prędkości ośrodka.

Oznaczając przez

- m – masę cząstki,
- g – przyspieszenie ziemskie,
- r – promień cząstki,
- ν – lepkość ośrodka,
- $x = \vartheta - w$ i $s = \text{sign}(x)$,

składową pionową przyspieszenia cząstki opisuje się wyrażeniem:

$$v = av^2 + bv + c \quad (7.2)$$

gdzie:

$$a = -\frac{9}{4} A \rho_m \pi \frac{r^2}{m} \quad (7.3)$$

$$b = -6\pi A v \rho_m \frac{r}{m} \quad (7.4)$$

$$c = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_m \frac{g}{m} - g \quad (7.5)$$

W przedstawionym modelu przyjęto założenie, że ruchy poziome są jednostajne. Uwzględnia się odbicia cząstek o ścianki rurociągu oraz tarcie, zakładając, że jeśli cząstka weszła w obszar przyścienny, to jej pionowa składowa prędkości ulega określonemu zmniejszeniu (współczynnik "k").

Pionową składową prędkości cząstki po czasie Δt otrzymuje się, rozwiązując równanie różniczkowe (7.2) z uwzględnieniem warunku początkowego:

$$\begin{aligned} x(t = t_0) = x = v - w \\ \frac{dv}{av^2 + bv + c} = dt \end{aligned} \quad (7.6)$$

Postać funkcji $x(t)$ zależy od znaku wyróżnika:

$$\Delta = b^2 - 4ac$$

Przy małych wartościach x można odrzucić wyraz kwadratowy tego równania.

Kolektywne ruchy cząstek są bardzo trudne do uwzględnienia. Przyjmuje się, że w wyniku działania sił wewnętrznych cząstki znajdujące się we wnętrzu kuli o pewnym promieniu r_g (parametr modelu) ulegają zlepieniu i w przedziale czasu Δt poruszają się jako całość, a następnie rozpadają się na poszczególne składowe. Proces powstawania

takiego konglomeratu (supercząstki) podlega prawom zderzenia idealnie niesprężystego. Pęd takiej cząstki P jest równy sumie pędów jej składników przed zderzeniem:

$$\bar{p} = \sum_{i=1}^k \bar{v}_i m_i \quad (7.7)$$

gdzie:

k – liczba cząstek zawartych w obszarze kulistym o promieniu r_g .

Wektor prędkości i energię kinetyczną wyznacza się z zależności:

$$\bar{v} = \frac{\bar{p}}{M} \quad (7.8)$$

$$M = \sum_{i=1}^k m_i \quad (7.9)$$

$$E = 0.5 M v^2 \quad (7.10)$$

Energia wiązania konglomeratu (supercząstki):

$$\varepsilon = 0.5 m_i v_i^2 - E \geq 0 \quad (7.11)$$

po czasie Δt staje się jej energią rozpadu.

Na rozpatrywaną supercząstkę działają:

– siła ciężkości zaczepiona w jej środku masy

$$\bar{r}_{sm} = \sum_{i=1}^k \frac{\bar{r}_i m_i}{M} \quad (7.12)$$

– siła wyporu zaczepiona w środku wyporu

$$\bar{r}_w = \sum_{i=1}^k \bar{r}_i Q_i \quad (7.13)$$

gdzie Q_i – objętość i-tej supercząstki.

Pod działaniem tego układu sił supercząstka zachowuje się jak ciało sztywne wirujące z prędkością kątową Ω i przemieszczające się z prędkością środka masy \bar{v} .

Po czasie Δt oblicza się nowe położenia i prędkości cząstek składowych supercząstki i dokonuje się jej rozpadu.

W układzie środka masy cząstki wylatującej m_i oraz pozostałości po supercząstce $M_i = M - m_i$ pęd układu musi być zerem.

$$m_i \bar{v}_i = M \bar{v} \quad (7.14)$$

Natomiast suma energii kinetycznych:

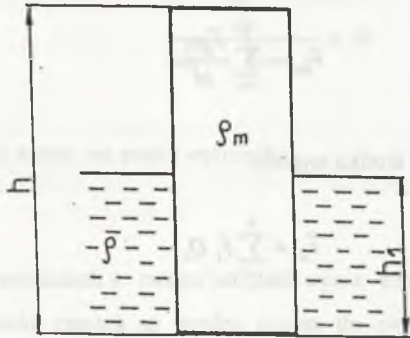
$$\frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} M \bar{v}^2 = \varepsilon \quad (7.15)$$

musi być równa energii wiązania.

Wzory te umożliwiają obliczanie modułów prędkości $\bar{v}_i = \bar{v}_i$ oraz $\bar{v} = \bar{v}$, natomiast ich zwrot jest dowolny.

W istocie o kierunku prędkości wylatującej cząstki nie można niczego powiedzieć z uwagi na zupełną nieznaną lokalnych sił powodujących jej rozpad. Z tego względu wektor prędkości określa się, losując przypadkowy kierunek w przestrzeni. Proces rozpadu supercząstki kontynuowany jest do momentu rozbicia jej na wszystkie składniki.

Opisane rodzaje ruchów zmieniają wewnętrzną strukturę układu, ale nie uwzględniają działania zewnętrznej siły hydrostatycznej wywołanej obecnością zewnętrznego płaszczka wody. Jej oddziaływanie może być uwzględnione poprzez dodatkowy kolektywny ruch ośrodka. Rozważa się ruch ośrodka o gęstości ρ_s poruszającego się z prędkością \bar{v}_s wewnątrz rury o polu przekroju A , zanurzonej w cieczy nieskończonej o gęstości ρ .



Rys. 48. Schemat instalacji transportu hydrauliczno-pneumatycznego do modelu teoretycznego

Fig. 48. The infrastructure of an hydraulic-pneumatic transport for the theoretical model

Dla rozpatrywanego układu słuszna jest zasada zachowania energii w postaci:

$$\rho g h_1 = \rho_m g h + \frac{1}{2} \rho_m v_m^2 \quad (7.16)$$

Jeżeli słup cieczy o wysokości h wychyli się z położenia równowagi na odległość " x ", wówczas zadziała na nią siła harmoniczna:

$$F = - A \rho_m g x \quad (7.17)$$

dążąca do przywrócenia równowagi układu.

Ponieważ ruchy cząstek umożliwiają wyznaczenie poziomu h' mieszaniny, natomiast ze wzoru (7.16) można wyznaczać położenie równowagowe h , więc wzór (7.17) pozwala na skorygowanie prędkości i położenia cząstek.

7.1.1. Rozpady cząstek

Cząstki gazu i cieczy mogą się rozpadać i łączyć (zlepiać). Zdarzenia rozpadu bądź syntezy cząstek poszczególnych faz są niezależne od siebie. Zakłada się, że prawdopodobieństwo p_r wystąpienia n takich zdarzeń w przedziale czasu Δt opisuje rozkład Poissona:

$$p_r(n, \Delta t) = \frac{(\lambda \Delta t)^n}{n!} \exp(-\lambda \Delta t) \quad (7.18)$$

natomiast parametr rozkładu λ jest jednym z parametrów modelu i wynosi:

$$\lambda = \frac{1}{T}$$

gdzie:

T – średni czas rozpadu.

Jeśli układ liczy (zawiera) N cząstek, to:

$$\lambda = \frac{N}{T}$$

Losowaniu podlega liczba zdarzeń n zgodnie z rozkładem (7.18) oraz numery cząstek, które ulegają rozpadowi bądź też stają się cząstkami pochtaniającymi inne. Jeżeli rozpatruje się proces rozpadu, wówczas wylosowaną cząstkę dzieli się na dwie, nadając

im masy o przypadkowych wartościach, ale takich, że ich suma jest równa masie cząstki wyjściowej. Prędkości cząstek ustala się w taki sposób, jak przy opisanym rozpadzie supercząstki, przyjmując, że energia wiązania cząstki ma przypadkową wartość nie większą od jej energii kinetycznej. Syntezie podlegają zaś te cząstki, które położone są najbliżej cząstki o wylosowanym numerze do syntezy. Proces ten rozpatruje się jako zderzenia niesprężyste.

7.1.2. Symulacja pracy instalacji [47,48]

W stanie wyjściowym instalacja jest napełniona wodą do poziomu h_1 , co reprezentuje N_w cząstek wody o identycznych masach i objętościach równomiernie rozłożonych w przestrzeni. Powietrze jest dostarczane do instalacji poprzez dysze znajdujące się na poziomie h_d . Jeśli liczba dysz wynosi L_d , natomiast średnia objętość pęcherza gazu wynosi V_g , gęstość ρ_g , to w czasie Δt jest dostarczana do układu następująca masa gazu:

$$M_g = Q_g \rho_g \Delta t \quad (7.19)$$

$$N_g V_g \rho_g = M_g \quad (7.20)$$

Na każdą dyszę przypada więc średnio N_g/L_d pęcherzyków powietrza.

Minimalna prędkość wlotu pęcherzy musi być równa promieniowi kuli o objętości

$$\frac{N_g V_g}{L_d} \text{ podzielonemu przez czas } \Delta t.$$

Kierunek tej prędkości określa kąt wlotu powietrza. W praktyce prędkość wlotu powietrza zależy od ciśnienia zasilania konstrukcji i ukierunkowania dysz. Objętości włączanych pęcherzy losowane są zgodnie z rozkładem Gaussa o wariancji δ i średniej V_g .

Zasysanie nowych porcji wody następuje wówczas, gdy estymowana wysokość słupa mieszaniny h jest taka, że objętość $h\pi R^2$ zajmowana przez mieszaninę jest większa od sumy objętości wszystkich cząstek. Woda jest zasysana porcjami o minimalnej objętości V_{mh} w ilości koniecznej do uzyskania wymaganej zgodności geometrycznej. Jeśli w przepływie uczestniczą cząstki stałe, wówczas porwanie ich następuje z prawdopodobieństwem p_f (parametr modelu), przy czym zawsze zasysana jest pewna wielokrotność k (parametr modelu) objętości słupa wody znajdującego się między cząstką ciała stałego a dnem instalacji. Ciała stałe zasysane są z obszaru znajdującego się pod dnem instalacji na głębokości h_c i widzianego pod kątem φ (parametr modelu) przy

spełnieniu warunku, że prędkość cieczy w tym miejscu jest większa od prędkości unoszenia cząstek. Każdy z aktów pochłonięcia cząstki powoduje zmniejszenie prędkości mieszaniny, gdyż jest to efekt niesprężystego zderzenia pochłanianej cząstki z ruchomą mieszaniną. Początkowe prędkości zasysanych cząstek stają się równe średniej prędkości mieszaniny, przy czym współrzędna pionowa ma wartość zero, a współrzędne poziome są liczbami przypadkowymi o takich wartościach, by cząstki te mieściły się wewnątrz instalacji.

W ogólności na początku odcinka czasu Δt jest N_w cząstek wody, N_g cząstek gazu i N_s cząstek stałych o znanych masach, prędkościach i objętościach. Przyjmuje się, że w czasie Δt powstanie K supercząstek, nastąpi wtrysk N_g/L_d pęcherzy gazu w każdej z dysz oraz że każdy wtrysk powietrza prowadzi do powstania supercząstki. Dopóki liczba aktów wtrysku jest mniejsza od K , przyjmuje się, że w centrum supercząstki umieszczony jest pęcherz wtrysniętego powietrza. Później centrum to losuje się wewnątrz objętości zajmowanej przez mieszaninę. Następnie badane są ruchy supercząstek poprzez określanie nowych współrzędnych i składowych prędkości po czasie Δt .

Cząstki, które nie utworzyły konglomeratów, wykazują ruchy indywidualne. W dalszej części losowana jest liczba syntez wody i gazu oraz dokonywanie się tych syntez, po czym losowana jest liczba rozpadów wraz z ich dokonywaniem. Określając poziom mieszaniny h na podstawie wzoru (7.17) wykonywana jest korekta prędkości i położenia wszystkich cząstek.

W zależności od warunków uzupełniana jest ilość wody i cząstek stałych bądź też odrzucany nadmiar tych cząstek znajdujących się najbliżej dna instalacji.

Jeśli cząstka znalazła się ponad powierzchnią mieszaniny, to masę opuszczającego układ gazu zwiększa się o masę tej cząstki. Jeżeli zaś cząstka wody lub ciała stałego znalazła się ponad zadaną wysokością H instalacji, to masę opuszczającej układ wody M_w , ciała stałego M_s zwiększa się o masę tej cząstki. Tak uzyskane masy M_w i M_s określają czasowe wydatki wody i ciała stałego.

Po wykonaniu tych obliczeń proces rozpoczyna się od początku i może trwać dowolnie długo.

7.2. PARAMETRY MODELU TEORETYCZNEGO

Działanie modelu teoretycznego oparte jest na następujących parametrach:

Parametry techniczne instalacji:

Średnica instalacji D	[m]
Głębokość zalania H_1	[m]
Wysokość instalacji H	[m]
Poziom dysz powietrza h	[m]
Kąt wlotu powietrza	[°]
Wydajność powietrza Q_p	[m ³ /h]
Temperatura T	[K]
Średnica cząstek stałych d_s	[m]
Wariancja średnicy d_s	[m]

Stałe materiałowe:

Gęstość właściwa wody	[kg/m ³]
Gęstość właściwa powietrza	[kg/m ³]
Gęstość właściwa cząstek stałych	[kg/m ³]

Parametry symulacji cząstek:

Promień	[m]
Współczynnik tarcia	[-]
Ilość powstałych cząstek w czasie dt	
Krok czasowy	
Wariancja objętości gazu	
Obszar przyścienny	[m]
Spowolnienie	[-]
Czas rozpadu wody	[s]
Czas rozpadu gazu	[s]
Czas syntezy wody	[s]
Czas syntezy gazu	[s]
Tarcie woda–ośrodek	[-]
Tarcie cząstki stałe–ośrodek	[-]

Tarcie gaz–ośrodek	[-]
Prędkość unoszenia cząstek stałych	[m/s].

7.3. WYNIKI I ANALIZA SYMULACJI KOMPUTEROWEJ PRZEPLYWÓW WIELOFAZOWYCH

W zależności od natężenia przepływu powietrza ruchy transportowanej hydro-mieszaniny można scharakteryzować jako:

- przepływ dwufazowy (woda – powietrze) dla $Q_p < Q_p \text{ opt}$,
- przepływ trójfazowy (woda – cząstki stałe – powietrze) dla $Q_p \text{ opt}$,
- przepływ nieustalony dla $Q_p \text{ opt} < Q_p < Q_p \text{ max}$.

Podczas symulacji komputerowej przepływów analizowano i rejestrowano:

- objętościowy przepływ powietrza i wody,
- prędkość przepływu powietrza i wody,
- rozkład cząstek powietrza i wody
- objętościowy przepływ powietrza, wody i cząstek stałych,
- prędkość przepływu powietrza, wody i cząstek stałych,
- rozkład średnic pęcherzyków powietrza.

7.3.1. Przepływ dwufazowy

Charakteryzuje się natężeniem przepływu powietrza rosnącym asymptotycznie do wartości zadanej, przy czym obserwuje się chwilowe wahania wartości natężenia przepływu, zanikające (malejące) z upływem czasu. Natężenie przepływu wody w początkowym okresie (rozruch instalacji) gwałtownie rośnie, osiągając maksymalną wartość w chwili przekroczenia poziomu wylotu instalacji przez wodę. Ze względu na wysokość zalania wlotu powietrza w pierwszej fazie przepływu słup ruchomy składa się z warstwy wody oraz mieszaniny wodno – powietrznej. Ponieważ powietrze porusza się w wodzie z niewielką prędkością (zależną od średnicy pęcherzyków powietrza) wynoszącą ok. 30 cm/s, wymagany jest określony czas dla osiągnięcia czoła powierzchni wody. A więc mogą zaistnieć określone przypadki:

1. powietrze nie osiąga czoła powierzchni wody,
2. powietrze osiąga czoło powierzchni wody.

W pierwszym przypadku obserwuje się gwałtowny wzrost wydajności wody na wyptywie z instalacji, jednocześnie z uwagi na duży ubytek masowy przepływ nabiera nieustalonego charakteru.

Przykładowy przebieg zmian natężenia przepływu powietrza i wody dla mieszaniny dwufazowej przedstawiono na rys. 49 i 50.

Rozkład prędkości przepływu powietrza i wody charakteryzuje się nieznacznymi wahaniami wzdłuż promienia, osiągając wartość maksymalną w osi przekroju i wartość zero na ścianie rury. Profil prędkości powietrza jest zbliżony do parabolicznego, a wody zawiera się między parabolicznym a prostokątnym. Przy ustalonym przepływie prędkość przepływu powietrza jest większa od prędkości przepływu wody. Różnica prędkości zależy od parametrów instalacji i przepływu.

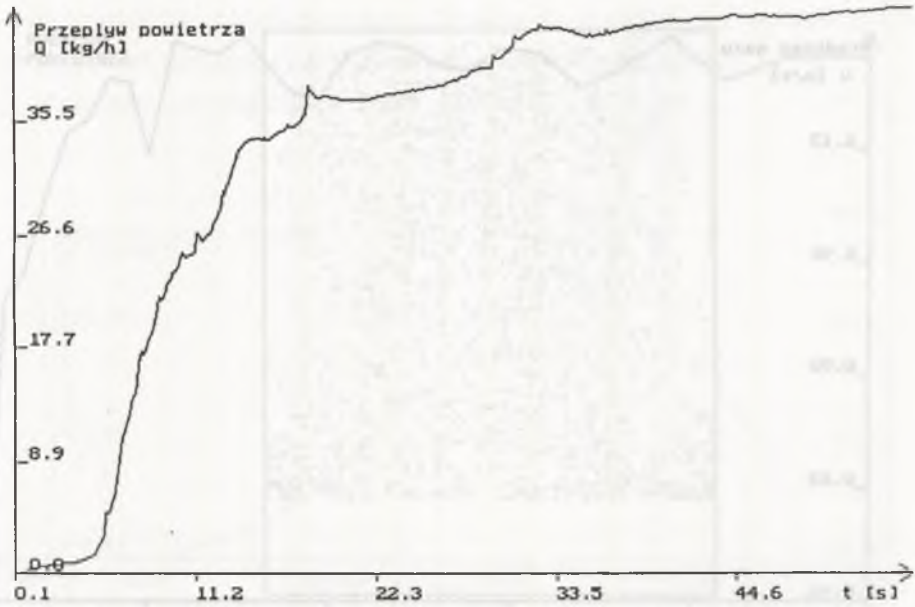
Przykładowe przebiegi prędkości powietrza i wody dla przepływu dwufazowego przedstawiono na rys. 51 i 52.

Rozkłady cząstek powietrza i wody wzdłuż rurociągu transportowego charakteryzują się nierównomiernym rozmieszczeniem cząstek w rurociągu. W przypadku powietrza obserwuje się skupiska cząstek o zwiększonej koncentracji w pobliżu osi rurociągu i występujące zawirowania. Największe zagęszczenia cząstek powietrza obserwuje się na poziomie dysz powietrznych.

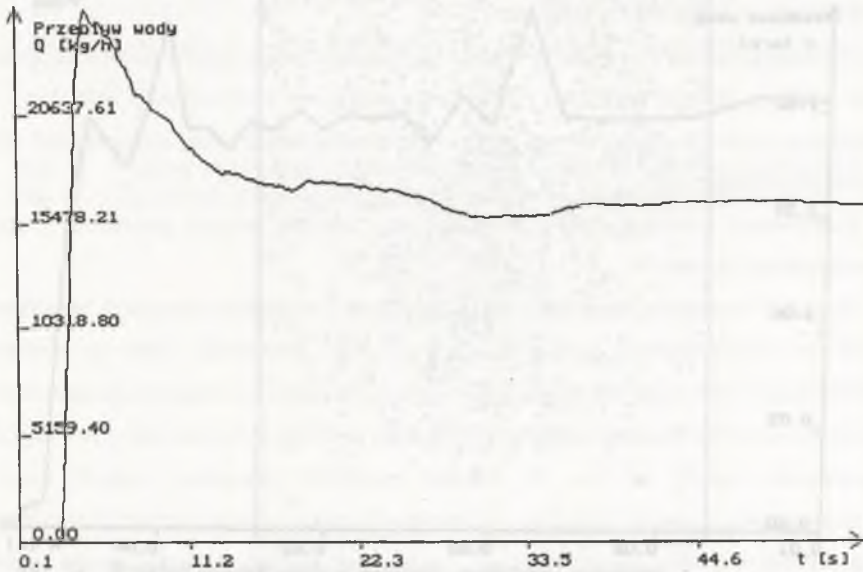
Rozkład cząstek wody wzdłuż rurociągu charakteryzuje się dużą zmiennością. Większą koncentrację cząstek obserwuje się w osi rurociągu.

Przykładowe rozkłady cząstek powietrza i wody przedstawiają rys. 53 i 54.

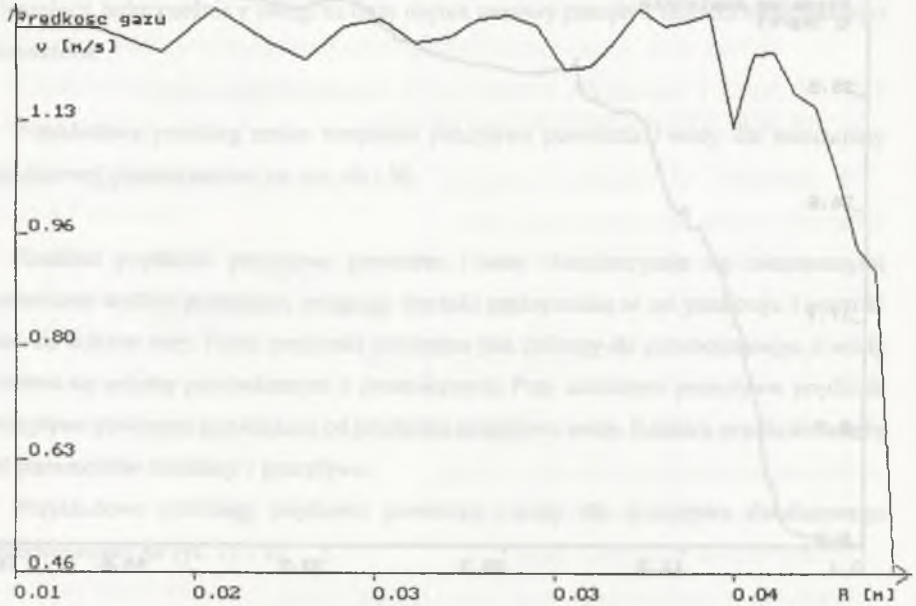
Przykładowy rozkład średnic pęcherzyków powietrza w mieszaninie dwufazowej obrazuje wykres na rys. 55.



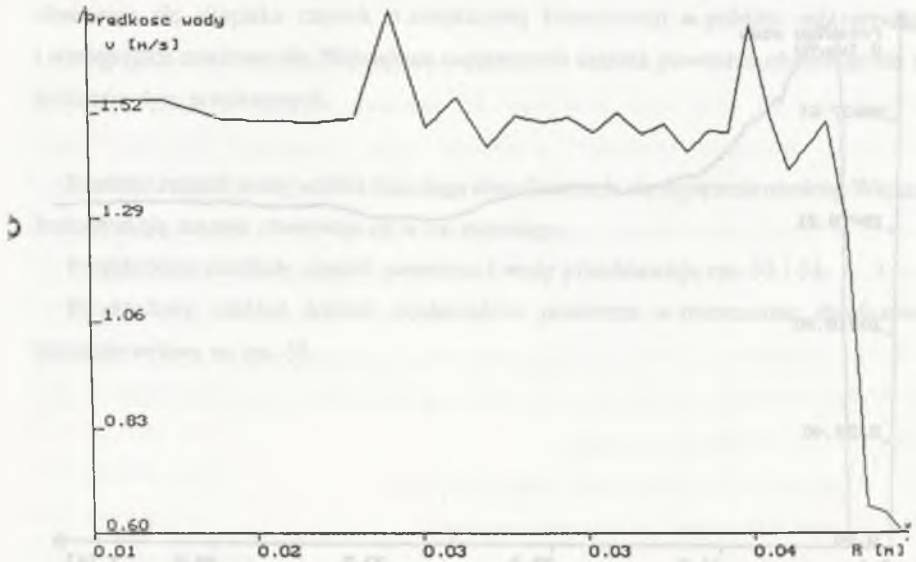
Rys. 49. Przebieg objętościowego natężenia przepływu powietrza w funkcji czasu
 Fig. 49. The course of air volumetric flow rate in the function of time



Rys. 50. Przebieg objętościowego natężenia przepływu wody w funkcji czasu
 Fig. 50. The course of water volumetric flow rate as a function of time

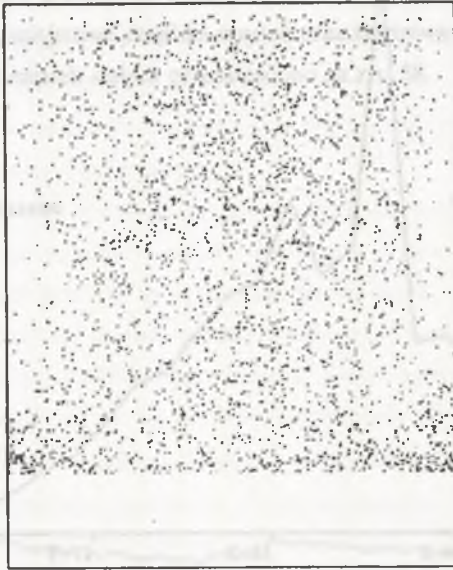


Rys. 51. Rozkład prędkości przepływu cząstek powietrza w przekroju poprzecznym rurociągu
 Fig. 51. Flow velocity distribution of air particles in a cross section of the pipeline



Rys. 52. Rozkład prędkości przepływu cząstek wody w przekroju poprzecznym rurociągu
 Fig. 52. Flow velocity distribution of water particles in a cross section of the pipeline

ROZKŁAD
POWIETRZA

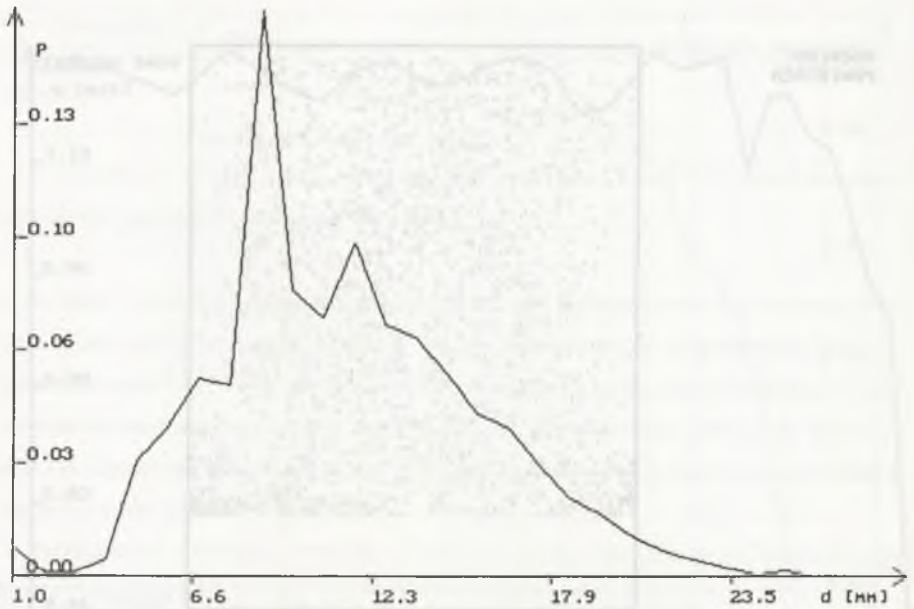


Rys. 53. Rozkład cząstek powietrza w przekroju podłużnym rurociągu
Fig. 53. Flow velocity distribution of air particles in an oblong section of the pipeline

ROZKŁAD
WODY



Rys. 54. Rozkład cząstek wody w przekroju podłużnym rurociągu
Fig. 54. Distribution of water particles in an oblong section of the pipeline



Rys. 55. Rozkład średnic pęcherzyków powietrza w hydromieszaniu
 Fig. 55. Distribution of air bubbles diameters in the mixture

7.3.2. Przepływ trójfazowy – ustalony

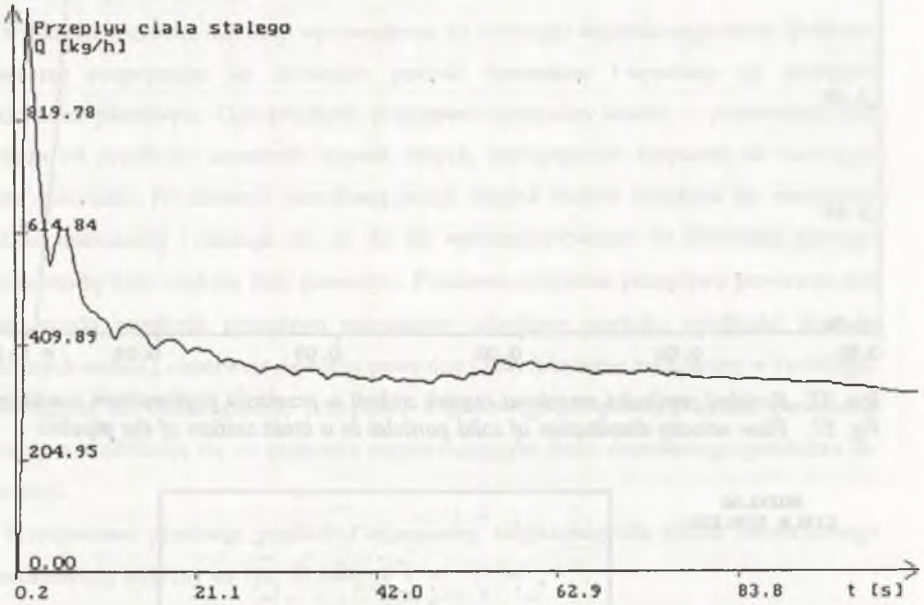
Przebiegi natężenia przepływu powietrza i wody, prędkości przepływu powietrza i wody oraz rozkłady cząstek powietrza i wody przy przepływie trójfazowym (ustalonym – optymalne natężenia przepływu powietrza) nie odbiegają charakterem od przebiegów dla mieszaniny dwufazowej.

Przykładowe przebiegi natężenia przepływu, rozkłady cząstek powietrza i wody przedstawiają rys. 49...54.

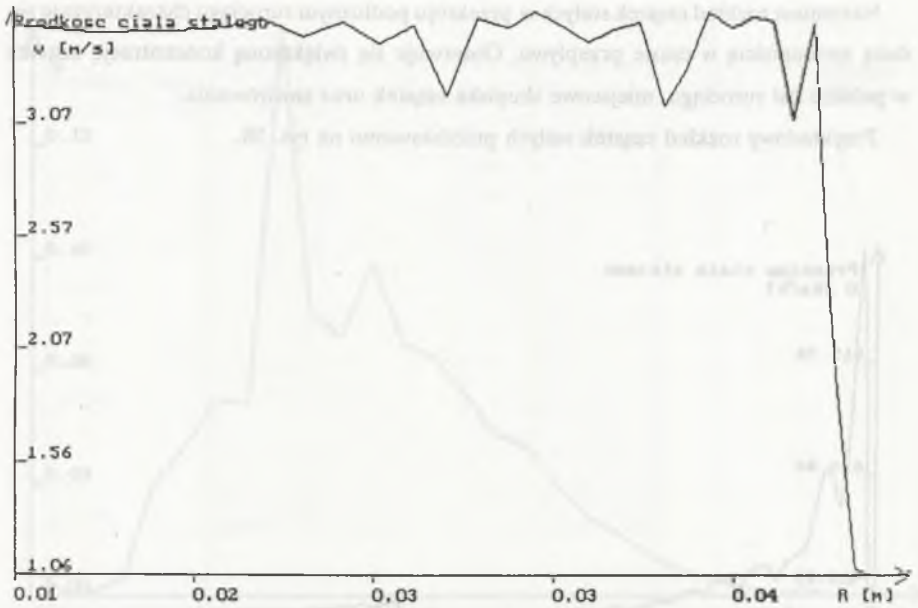
Natężenie przepływu cząstek stałych jest zbliżone do przebiegu natężenia przepływu wody tzn. w początkowym okresie (rozruch instalacji) gwałtownie rośnie do wartości maksymalnej, która zależy od natężenia przepływu powietrza, a następnie asymptotycznie maleje do stałej (optymalnej) wartości. Przykładowy przebieg natężenia przepływu cząstek przedstawia wykres na rys. 56. Rozkład prędkości przepływu cząstek stałych w poprzecznym przekroju rurociągu jest zbliżony do rozkładu prostokątnego z wyraźnymi fluktuacjami w pobliżu ścianek rurociągu. Przykładowy rozkład prędkości cząstek stałych przy przepływie ustalonym mieszaniny trójfazowej przedstawia wykres na rys. 57.

Natomiast rozkład cząstek stałych w przekroju podłużnym rurociągu charakteryzuje się dużą zmiennością w czasie przepływu. Obserwuje się zwiększoną koncentrację cząstek w pobliżu osi rurociągu, miejscowe skupiska cząstek oraz zawirowania.

Przykładowy rozkład cząstek stałych przedstawiono na rys. 58.

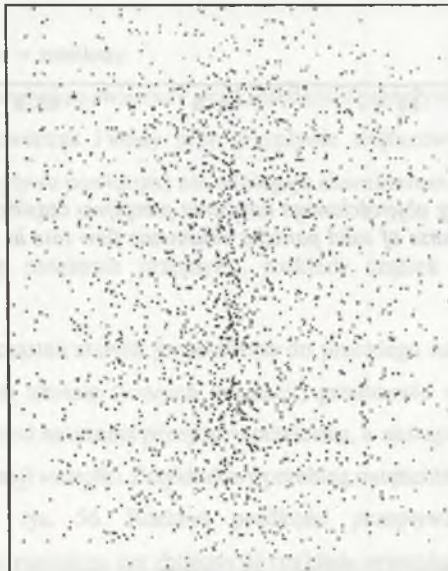


Rys. 56. Przebieg objętościowego natężenia przepływu cząstek stałych w funkcji czasu
 Fig. 56. The course of solid particles volumetric flow rate in the function of time



Rys. 57. Rozkład prędkości przepływu cząstek stałych w przekroju poprzecznym rurociągu
Fig. 57. Flow velocity distribution of solid particles in a cross section of the pipeline

ROZKŁAD
CIAŁA STAŁEGO



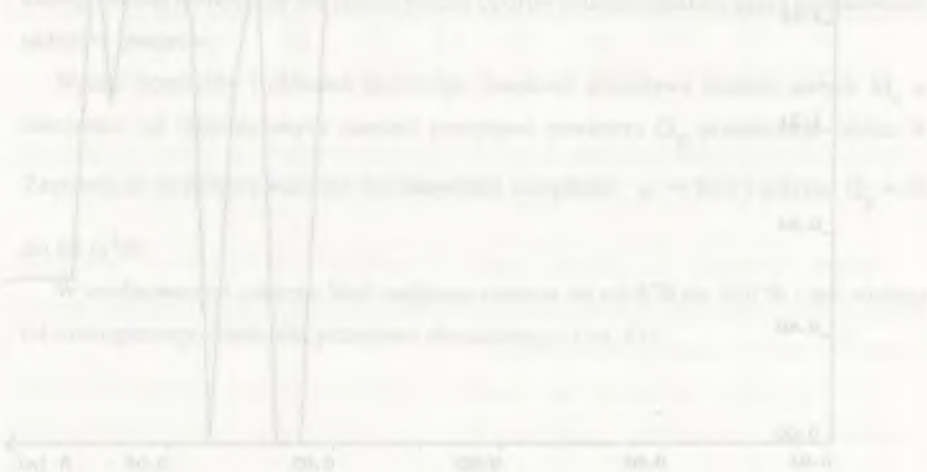
Rys. 58. Rozkład cząstek ciała stałego w przekroju podłużnym rurociągu
Fig. 58. Distribution of solid particles in an oblong section of the pipeline

7.3.3. Przepływ trójfazowy – nieustalony

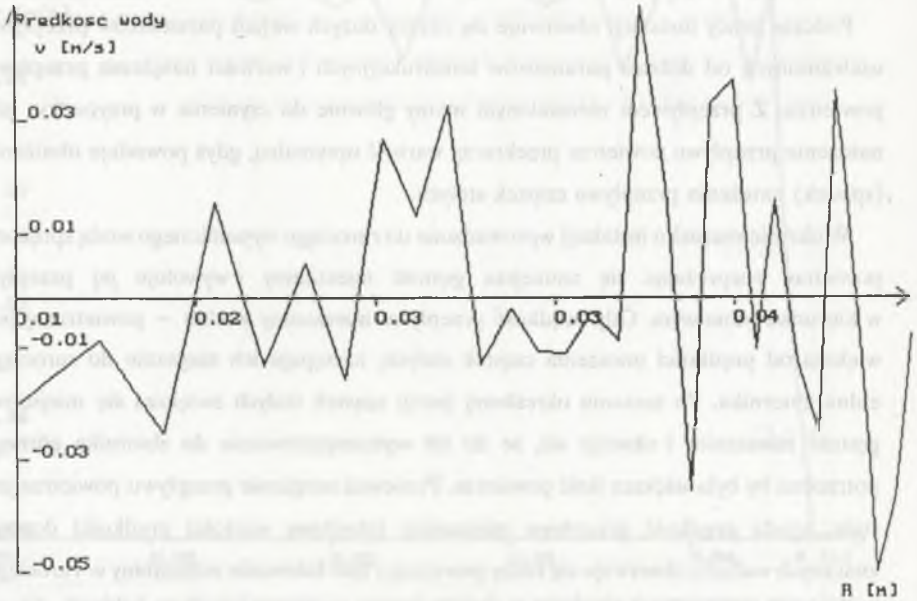
Podczas pracy instalacji obserwuje się okresy dużych wahań parametrów przepływu uzależnionych od doboru parametrów konstrukcyjnych i wartości natężenia przepływu powietrza. Z przepływem nieustalonym mamy głównie do czynienia w przypadku, gdy natężenie przepływu powietrza przekracza wartość optymalną, gdyż powoduje obniżenie (spadek) natężenia przepływu cząstek stałych.

W okresie rozruchu instalacji wprowadzone do rurociągu wypełnionego wodą sprężone powietrze rozprężając się zmniejsza gęstość mieszaniny i wywołuje jej przepływ w kierunku pionowym. Gdy prędkość przepływu mieszaniny wodno – powietrznej jest większa od prędkości unoszenia cząstek stałych, następuje ich zasysanie do rurociągu z dna zbiornika. Po zasysaniu określonej porcji cząstek stałych zwiększa się miejscowa gęstość mieszaniny i okazuje się, że do ich wytransportowania do zbiornika górnego potrzebna by była większa ilość powietrza. Ponieważ natężenie przepływu powietrza jest stałe, spada prędkość przepływu mieszaniny (chwilowe wartości prędkości doznają znacznych wahań), obserwuje się ruchy powrotne i tzw. falowanie mieszaniny w rurociągu. Ze względu na samoregulację przepływu trójfazowego po pewnym czasie parametry przepływu stabilizują się na poziomie odpowiadającym ilości dozowanego powietrza do instalacji.

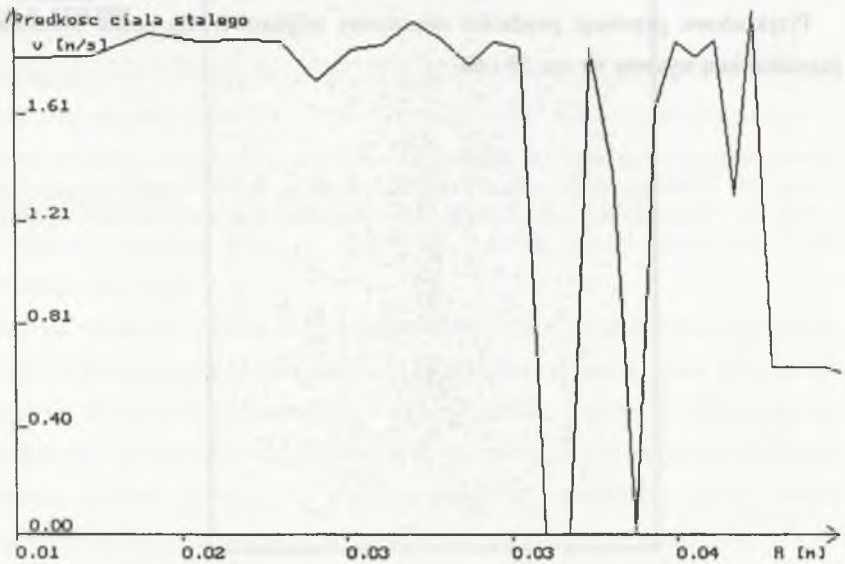
Przykładowe przebiegi prędkości mieszaniny trójfazowej dla ruchu nieustalonego przedstawiają wykresy na rys. 59 i 60.



Rys. 59. Przebieg natężenia przepływu mieszaniny trójfazowej dla ruchu nieustalonego



Rys. 59. Przebieg nieustalony dla prędkości przepływu wody
 Fig. 59. Transient course for velocity of water flow



Rys. 60. Przebieg nieustalony dla prędkości przepływu cząstek stałych
 Fig. 60. Transient course for velocity of solid particles

7.4. WERYFIKACJA MODELU TEORETYCZNEGO

Weryfikacji modelu teoretycznego autor dokonał poprzez porównanie wartości wybranych parametrów pracy instalacji laboratoryjnych z wartościami obliczonymi teoretycznie, tzn. objętościowego natężenia przepływu Q_w przy przepływie dwufazowym i objętościowego natężenia przepływu cząstek stałych Q_s przy przepływie trójfazowym dla zadanych objętościowych natężeń przepływu powietrza Q_p .

Jako fazę stałą stosowano kulki agalitowe o średnicy 0,008 m i gęstości $\rho_s = 2300 \text{ kg/m}^3$.

W tablicy 8 przedstawiono wyniki pomiarów i wyniki obliczeń komputerowych przy przepływie dwufazowym dla trzech wartości współczynników zatopienia instalacji

$$\alpha = 0,67, 0,57 \text{ i } 0,50.$$

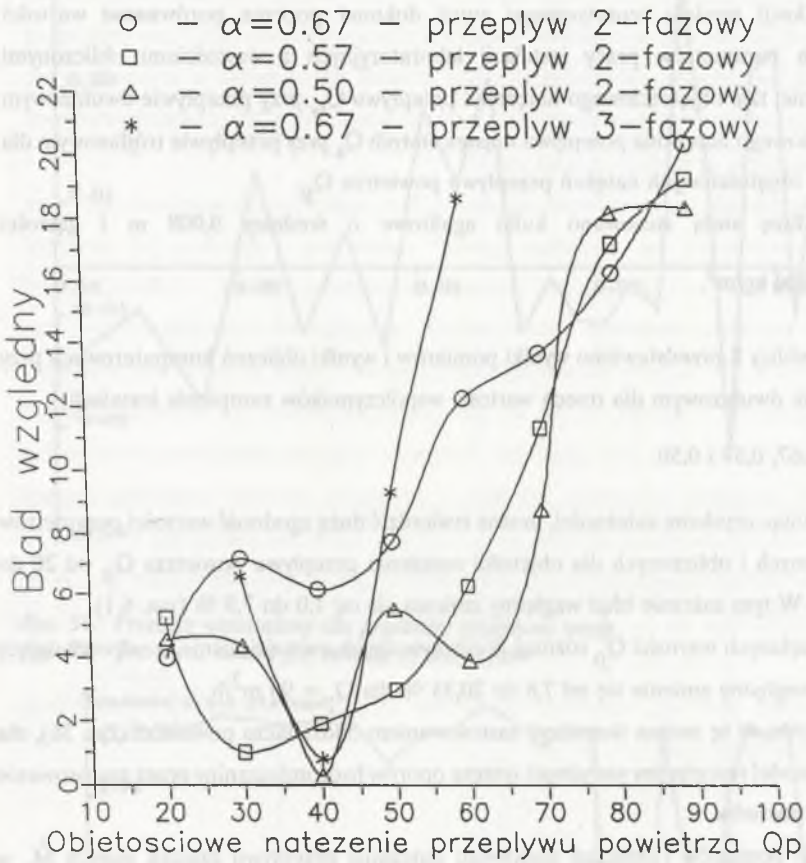
Analizując uzyskane zależności, można stwierdzić dużą zgodność wartości parametrów pomierzonych i obliczonych dla objętości natężenia przepływu powietrza Q_p od 20 do $50 \text{ m}^3/\text{h}$. W tym zakresie błąd względny zmienia się od 1,0 do 7,8 % (rys. 6.1).

Dla większych wartości Q_p różnica porównywalnych wartości rośnie, a odpowiadający im błąd względny zmienia się od 7,8 do 20,35 % dla $Q_p = 90 \text{ m}^3/\text{h}$.

Niezgodność tę można tłumaczyć zastosowaniem oddzielnika powietrza (rys. 36), dla którego model teoretyczny nie ujmuje jeszcze oporów hydromieszaniny przez zastosowanie układów otworów.

Wyniki pomiarów i obliczeń masowego natężenia przepływu cząstek stałych \dot{M}_s w zależności od objętościowych natężeń przepływu powietrza Q_p przedstawia tablica 9. Zestawienie to dotyczy wartości współczynnika zatopienia $\alpha = 0,67$ i zakresu $Q_p = 30$ do $60 \text{ m}^3/\text{h}$.

W analizowanym zakresie błąd względny zmienia się od 0,78 do 18,6 % i jest większy od analogicznego błędu dla przepływu dwufazowego (rys. 61).



Rys. 61. Zależność błędu względnego δ od objętościowego natężenia przepływu powietrza Q_p
 Fig. 61. Correlation between relative error δ and volumetric flow intensity of air Q_p

Należy stwierdzić, że uzyskana zgodność wartości pomierzonych i obliczonych potwierdza adekwatność zaproponowanego modelu teoretycznego do opisu parametrów przepływowych w instalacjach pionowych.

Równie ważną własnością tego modelu, oprócz zgodności wartości liczbowych analizowanych parametrów przepływowych, jest podobieństwo torów ruchu cząstek obserwowanych w instalacji z ruchami wyznaczonymi teoretycznie (wykreślonymi przez komputer).

Szczególnie interesujące są przemieszczenia o torach krzywoliniowych oraz ruchy powrotne w stanach pracy niustalanej, a także występowanie skupisk poszczególnych cząstek upodabniających zawirowania, rozpady cząstek powietrza i konglomeratów wielofazowych.

Reasumując, należy stwierdzić, że przedstawiony model teoretyczny dla przepływów wielofazowych wykazuje zgodność z wynikami pomiarów i może być stosowany przy projektowaniu nowych lub optymalizacji istniejących instalacji.

Tablica 8

Zestawienie wyników pomiarów i wyników obliczeń objętościowego natężenia przepływu wody Q_w [m^3/h] w zależności od objętościowego natężenia przepływu powietrza Q_p [m^3/h]

α	Q_w \ Q_p	Q_p	20	30	40	50	60	70	80	90
		0,67	pomierzone	22.60	26.40	30.20	32.60	32.30	31.80	31.20
	obliczone	23.50	28.30	32.06	36.43	36.43	35.70	36.28	34.42	
0,57	pomierzone	15.30	22.40	25.30	29.10	29.10	29.20	28.50	25.50	
	obliczone	14.50	22.62	25.78	27.27	27.27	32.50	33.40	30.40	
0,50	pomierzone	13.40	18.40	21.40	25.20	25.20	25.60	24.80	24.60	
	obliczone	12.79	19.20	23.60	26.18	27.84	27.84	29.30	29.10	

Tablica 9

Zestawienie wyników pomiarów i wyników obliczeń masowego natężenia przepływu cząstek stałych \dot{M}_s [kg/h] w zależności od objętościowego natężenia przepływu powietrza Q_p [m^3/h] dla materiału kulistego o gęstości $2300 kg/m^3$

Q_p \ M_s	Q_p	30	40	50	60
\dot{M}_s pomierzone		434	998	1287	1622
\dot{M}_s obliczone		405	990.2	1167	1320

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Dotychczasowe modele przepływów wody, powietrza i ciał stałych traktowały przepływ wielofazowy jako mieszaninę quasi-jednorodną lub w przypadku rozdziału faz przyjmowano stałą średnicę pęcherzyków powietrza i cząstek stałych oraz jednokierunkowość i prostoliniowość torów.

Założenia te, oprócz dużego uproszczenia opisu parametrów przepływowych, uniemożliwiały także prowadzenie analizy stanów nieustalonych pracy instalacji, do których zaliczyć należy okres rozruchu, doprowadzenie niewłaściwej ilości sprężonego powietrza czy zassanie nadmiernej ilości cząstek stałych.

Opracowany dyskretny model trójfazowego przepływu oparto na następujących elementach:

- analizie i pomiarach ruchu pojedynczych cząstek stałych i pęcherzyków powietrza w wodzie stojącej i przepływającej,
- obserwacji i analizie zjawisk związanych z przepływem powietrza w ośrodku wodnym z uwzględnieniem zmiany średnic pęcherzyków powietrza, wielokierunkowości ruchów (poprzeczne, wznoszące, opadające i zawirowania lokalne),
- modelach przepływów wielofazowych: woda–powietrze, woda–styropian, woda–cząstki stałe.

1. W celu rozpoznania zjawisk występujących w przepływach mieszanin wielofazowych przeprowadzono na specjalnym stanowisku laboratoryjnym pomiary prędkości unoszenia pojedynczych pęcherzyków i kuleczek styropianowych w wodzie stojącej i przepływającej. Wykorzystując wyniki pomiarów prędkości unoszenia, obliczono wartości współczynników oporu czołowego c_w , które porównano z wartościami obliczonymi ze wzorów zalecanych w literaturze dla ciał stałych. Przeprowadzona analiza wykazała, że:

- wartości wyznaczanych na podstawie pomiarów współczynników oporu są większe od wartości określonych teoretycznie,
- im większa prędkość przepływu wody, tym różnice badanych współczynników są większe,

- wraz ze wzrostem średnicy badanych cząstek, błąd względny pomiędzy wartościami wyznaczonymi przez autora a literaturowymi intensywnie rośnie.
2. Zastosowane w instalacji laboratoryjnej nowe rozwiązania konstrukcyjnych podajnika cząstek stałych, mieszalnika i oddzielnika powietrza pozwalają na dokładne modelowanie warunków (parametrów) przepływu.
 3. Opracowany model matematyczny pozwala na analizę przepływu mieszaniny wielofazowej przy założonym rozkładzie pęcherzyków powietrza, dowolnych kierunkach chwilowych przemieszczeń pęcherzyków powietrza, wody i cząstek stałych, łącznie z ruchami powrotnymi i lokalnymi zawirowaniami (konglomeraty cząstek) w rurociągu. W szczególności pozwala on na wyznaczanie rozkładów:
 - cząstek powietrza, wody i cząstek stałych,
 - objętościowego natężenia przepływu powietrza wody i cząstek stałych,
 - prędkości powietrza, wody i ciał stałych,
 - średnic pęcherzyków powietrza.
 4. Zaproponowany model matematyczny, oprócz zgodności wartości liczbowych parametrów charakteryzujących przepływ, daje podobieństwo torów ruchów poszczególnych cząstek poprzez uwzględnienie wielokierunkowości ruchów, łączenia i rozpadania cząstek wielofazowych oraz łączenia i rozpadania cząstek powietrza.
 5. Model umożliwia ponadto analizowanie zmian parametrów przepływowych w stanach nieustalonych, takich jak rozruch instalacji, zmiany natężeń przepływów powietrza czy zassanie nadmiernej ilości cząstek stałych.
 6. Weryfikacji opracowanego modelu teoretycznego dokonano poprzez porównanie mierzonych i obliczonych objętościowych natężeń przepływu wody Q_w dla przepływu dwufazowego i masowego natężenia przepływu ciał stałych \dot{M}_s dla przepływu trójfazowego przy zadanych objętościowych natężeniach przepływu powietrza Q_p . Dla przepływu dwufazowego i objętościowego natężenia przepływu powietrza $Q_p = 20$ do $50 \text{ m}^3/\text{h}$ błąd względny zmienił się od 1 do 7.8%. Przy natężeniu przepływu powietrza od 50 do $90 \text{ m}^3/\text{h}$ błąd ten kształtował się w przedziale od 7.8 do 20.35%. Natomiast dla przepływu trójfazowego błąd względny dla $Q_p = 20$ do $60 \text{ m}^3/\text{h}$ należał do przedziału od 0.78 do 18.6%. Zależność błędu względnego od objętościowego natężenia przepływu powietrza Q_p przedstawia rys. 61.

7. Przeprowadzone pomiary prędkości unoszenia i prędkości transportowej w ośrodku wodno-powietrznym cząstek stałych naturalnych i modelowanych miały charakter poznawczy. Ich celem było określenie możliwości transportowych instalacji i wskazanie na potencjalne możliwości zastosowania tego typu instalacji w przemyśle wydobywczym. Z pomiarów tych wynika, że instalacje tego rodzaju mogą służyć do transportu ziarn kopaliny o dużej gęstości właściwej (ograniczenia dotyczą tylko uziarnienia transportowanego materiału).
8. Przedstawione w pracy badania laboratoryjne oraz model teoretyczny powinny być wykorzystane przy projektowaniu i optymalizacji instalacji transportu hydrauliczno – pneumatycznego kopaliny użytecznych i innych materiałów ziarnistych.

LITERATURA

- [1] Adamek R.: Podsadanie wyrobisk górniczych, Wydawnictwo Śląsk, 1980.
- [2] Adamow B.I.: Issledowanije i razrobotka wodnych erliftnych ustanowok dla podjoma twiordogo materiała, Tiechn. nauk. Doneck 1982.
- [3] Benedict P.C. i inni: Journal of the HYDRAULICS DIVISION, lipiec 1970.
- [4] Blank R.: Untersuchung des Schwarmverhaltens von grobstückigen Feststoffen beim vertikalen hydraulischen Transport in Rohrleitungen, Dissertation, Technischen Universität Clausthal 1981.
- [5] Boës Chr., Dürning R., Wasserroth E.: Airlift als Antreib für Einhorn – und Doppelrohr – förderanlagen, Forden und Heben 22/1972 nr 7.
- [6] Bukowski J.: Mechanika płynów, PWN, Warszawa 1976.
- [7] Chaziteodorou G. und Wienen A.: Anwendung des Air – Lift – Verfahrens für die Förderung von Manganknollen aus der Tiefsee, MT 1977 nr 1.
- [8] Chaziteodorou G.: Sheffel G. und Wienen A.: Entwurf eines Abbauschemas zur Gewinnung und Förderung von Manganknollen aus der Tiefsee, MT 1977 nr 2.
- [9] Ciborowski J.: Inżynieria chemiczna, PWT, Warszawa 1952.
- [10] Czarnyj I.A.: Nieustanowiwszijasja dwizenije rialnoj zidkosti w trubach, Gosudarstwiennoje izdatielstwo tiechniko – teorieticzeskoj literatury, Moskwa 1951 Leningrad.
- [11] Daniłow E.I.: Issledowanije i razrobotka erlifta dla gidromiechanizirowannoj oczistki wodootliwnych jemkostiej, Awtorieferat disiertacji na soisk uczenoj stiepieni, K.T.N. Doneck 1979.
- [12] Dedegil M.V.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Förderung von Schüttgütern nach dem Lufthebeverfahren, Dissertation, Universität Karlsruhe 1974.
- [13] Dedegil M.V.: Feststoff – Förderung nach dem Lufthebeverfahren, Forden und Heben 24 1974 Nr 14.
- [14] Drzwarszejszwili A.G.: Gidrotransportnyje sistiemy gornoobogatatielnych kombinatow, Izdatielstwo NIEDRA, Moskwa 1973.
- [15] Duckworth R.A.: Mechanika płynów, WNT, Warszawa 1983.

- [16] During R.: Grundlagen der hydraulisch – pneumatischen Förderung MT 1978 nr 4.
- [17] Gejer W.G. i inni: Erliftnyje ustanowki. Uczebnyje posobyje, Donieck 1982.
- [18] Gejer W.G., Timoszenko G.M.: Szachtnyje wentilatorynje i wodootliwyje ustanowki, Izdatielstwo NIEDRA, Moskwa 1987.
- [19] Gejer W.G., Kostienko A.G., Kuczera M.N.: Wysokoproizwoditielnaja gidrawliczeskaja sistemia transportirowanija, podjoma gornoj massy iz szacht bolszoj głubiny, Ugol 1971 nr 5.
- [20] Gejer W.G., Szewczenko W.F.: Wlijanije konstrukcji smiesitiela na k.p.d. erlifta, CNEI Ugol 1974.
- [21] Gejer W.G.: Charakteristiczeskaja teorija dwizenija dwuchfaznoj smiesi po wiertikalnym trubam, Nieftjanoje chozjajstwo 1950 nr 8 i 9.
- [22] Gejer W.G., Kozyriacki L.N.: Issledowanije dwizenija twiordych tieł w podjemnoj tubie erlifta, Ugol 1976 nr 5.
- [23] Gejer W.G.: Wozdusznyje podjemniki (erlifty) kak wodotliwnyje sriedstwa pri prochodkie wiertikalnych stwołow, Ugol 1953 nr 11.
- [24] German A.P.: Primienienije eksploatacyjnych kriwych k rasczotu wozdusznoego podjemnika dla zidkosti, Zapiski LGI tom 17–18 1948.
- [25] Gibert R.: Annales des Ponts et Chaussées, nr 3–4 1960.
- [26] Grabow W.: Airlift–Prinzip zur bewinnung von Manganknollen aus grossen Meerestiefen, Neue Bergbautechnik, Juni 1978.
- [27] Grabow W.: Optimierung hydraulischer Förderverfahren zur submarinen Gewinnung mineralischer Rohstoffe, Freiburger Forschungshefte 1977.
- [28] Guillon M.: Teoria i obliczanie układów hydraulicznych, WNT, Warszawa 1967.
- [29] Kampan N.G. van: Procesy stochastyczne w fizyce i chemii, PWN, Warszawa 1990.
- [30] Knissel W.: Probleme bei der pneumatischer Förderung in Blasversatzleitungen und deren Lösung durch physikalische Beziehung, Glückauf–Forschungshefte 1965 nr 6.
- [31] Kobylecki J.: Wpływ parametrów transportowanego materiału ziarnistego na przepływ mieszaniny wody i ziarn ciał stałych w rurociągach pionowych, Praca doktorska, GIG, Katowice 1975 (niepublikowana).
- [32] Kostrz J.: Górnictwo t.VI. Głębienie szybów specjalnymi metodami, Śląsk, Katowice 1964.

- [33] Kozyriackij L.N.: Opredielenije osnovnych parametrov erlifta, Ugol Ukrainy 1975 nr 12.
- [34] Kryłow A.P.: Potieri trienija i skolżenija pri dwizenii židkosti i gaza po wiertikalnym trubam, Nefťjanoje chozjajstwo 1935 nr 8.
- [35] Kuzniecowa P.M.: Primienienije erliftow dla zołotoudalenija, Tieploenergietika 1957 nr 10.
- [36] Manajew W.A. i drugije: Gidrodynamika gazo–żidkostnych smiesiej w trubach, Niedra, Moskwa 1962.
- [37] Matwiejew N.M.: Zadania z równań różniczkowych zwyczajnych, PWN, Warszawa 1975.
- [38] Mirgorodskij W.G.: Zawisimost proizwoditelnosti erlifta ot dawlenija w wychodnom uzle, Razrabotka poleznych iskopajemych, Tiechnika nr 31, Kijew 1973.
- [39] Müller L.: Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli, BNA, Warszawa 1983.
- [40] Palarski J., Plewa F.: Badanie przepływów trójfazowych w rurociągach pionowych na stanowisku laboratoryjnym, V Seminarium "Transport i sedimentacja cząstek stałych". 3–7.09.1984 Wrocław.
- [41] Palarski J., Plewa F.: Eksploatacja konkrecji manganowych z dna mórz i oceanów przy zastosowaniu transportu hydrauliczno – pneumatycznego, Przegląd Górniczy nr 2 1983.
- [42] Palarski J., Plewa F.: Untersuchungen der Stromungsvorgänge bei der Feststoff–Wasser–Styropor Gemischfrderung in vertikalen Rohren. Hydramechanization 4. DDR. Magdeburg.
- [43] Palarski J.: Hydrotransport, WNT, Warszawa 1982.
- [44] Patter D.: Metody obliczeniowe fizyki, PWN, Warszawa 1977.
- [45] Parzonka W.: Hydromechaniczne podstawy transportu rurowego mieszanin dwufazowych, Skrypt AR, Wrocław 1977.
- [46] Priwierian A.M.: K teoriji wozduszного podjemnika, Nefťjanoje chozjajstwo 1951 nr 4.
- [47] Plewa F., Wanat K.: Modelirowanije protiekanija gazo–wodianoj smiesi w wiertikalnych truboprowodach i jego rieszenije s pomoszczju ewm, Hydromechanisation VII 1991 Warna.

- [48] Plewa F., Wanat K.: Model matematyczny przepływu wielofazowego (woda–gaz–ciało stałe), Zeszyty Naukowe Pol. Śl. seria Mechanika z. 113, Gliwice 1993.
- [49] Plewa F.: Model matematyczny przepływu mieszanin dwufazowych (woda, ciała stałe) w rurociągach pionowych przy koncentracji transportowej $C_t = 10\%$, Materiały na XXII Symposion PTMTS Wisła 1983.
- [50] Plewa F.: Optimierung von Durchflu parametern der Dreiphasen–Gemische auf Grund von Laborversuchen Prittes, Internationales Kolloquium über Hydromechanization Ungarn Miskolc–Eggeternbaros 24–26 August 1983.
- [51] Plewa F.: Model matematyczny przepływu mieszaniny cieczy i cząstek stałych o gęstości mniejszej od gęstości cieczy w rurociągach pionowych, Materiały XXV sympozjum PTMTS, Gliwice – Kudowa 1986.
- [52] Plewa F.: Optymalizacja średnic rurociągu sprężonego powietrza w instalacjach transportu hydrauliczno – pneumatycznego, Materiały XXV Sympozjum PTMTS, Gliwice–Kudowa 1986.
- [53] Plewa F.: Optymalizacja parametrów przepływu trójfazowego w instalacjach hydro–pneumo–transportu, Politechnika Śląska Gliwice. Praca doktorska 1981.
- [54] Plewa F.: Teoretyczny opis transportu ciał stałych i wody w rurociągach pionowych, Przegląd Górniczy 1986 nr 7–8.
- [55] Pochorecki R., Wroński S.: Kinematyka i termodynamika procesów inżynierii, chemicznej, WNT, Warszawa 1977.
- [56] Pohlentz W.: Pumpen für Flüssigkeiten, VEB Verlag Technik, Berlin 1977.
- [57] Pokrowskaja W.N.: Putipowyszenija efektiwnosti gidrotransporta, Moskwa 1972.
- [58] Poroli L.W.: Wozduszno–gazowyje podjemniki zhidkosti (erlifgazlifty), Maszynostrojenije, Moskwa 1969.
- [59] Praca zbiorowa pod red. Szydłowskiego: Teoria pomiarów, PWN, Warszawa 1974.
- [60] Praca zbiorowa pod redakcją Z. Ziółkowskiego.: Podstawowe procesy inżynierii chemicznej, PWN, Warszawa 1982.
- [61] Praca zbiorowa: Pneumatik–Kompendium, VEB Verlag 1977.
- [62] Prantl L.: Dynamika przepływów, PWN, Warszawa 1956.
- [63] Priwierbian A.M.: K teoriii wozdusznoego podjemnika, Nieftjanoje chozjajstwo 1951 nr 4.
- [64] Ralston A.: Wstęp do analizy numerycznej, PWN, Warszawa 1975.

- [65] Razumow I.M.: Fluidyzacja i transport pneumatyczny materiałów sypkich, WNT, Warszawa 1975.
- [66] Serwiński M.: Zasady inżynierii chemicznej i procesowej, WNT, Warszawa 1982.
- [67] Smoldyriew A.E.: Hidro- i pniewtransport, "Metallurgia", Moskwa 1975.
- [68] Sobota J., Boczarska M.: Wpływ charakterystyk składu ziarnowego na spadek hydrauliczny przy przepływie mieszanin w rurociągu, Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu nr 194, 1990.
- [69] Szewczenko W.F.: Issledowanije i rozrabotka uzła prowoda pniewmaticzeskoj energii erliftow, Awtoreferat na soiskaniye st. KTN, Donieck 1974.
- [70] Troskoleński A.T.: Hydromechanika techniczna, WNT, Warszawa 1967.
- [71] Weber M., Dedegil M.V.: Transport of solids according to the air-lift principle, Hydrotransport 4 Alberta Canada 1966.
- [72] Weber M.: Stromungsfordertechnik Krausskopf, Verlag 1977.
- [73] Weber M.: Strömungsfördertechnik, Krausskopf – Verlag 1974.
- [74] Zarja A.N.: Issledowanija dwizenija twardoj frakcji w wiertikalnom truboprowodie, Trudy DPI tom 46, Donieck 1960.
- [75] Zierep J.: Kryteria podobieństwa i zasady modelowania w mechanice płynów, PWN, Warszawa 1978.

BADANIE ZJAWISK WYSTĘPUJĄCYCH W SZYBOWYM TRANSPORCIE RUROWYM SUROWCÓW MINERALNYCH ZALEGAJĄCYCH NA DUŻYCH GŁĘBOKOŚCIACH.

Streszczenie

W instalacjach hydrauliczno-pneumatycznego transportu pionowego, służących do podnoszenia materiałów ziarnistych, występuje proces zasysania i transportu cząstek stałych w strumieniu mieszaniny wodno-powietrznej. Proces ten jest bardzo skomplikowany i jednocześnie trudny do opisu matematycznego. Dotychczasowe próby teoretycznego opisu procesu oparto na bardzo uproszczonych modelach [7,18,26]. Przyjmując modele mieszanin jednorodnych lub model cząsteczkowy, zakłada się wzrost objętości pecherzyków powietrza bez uwzględnienia ich rozpadu lub łączenia w konglomeraty jedno- lub wielofazowe [5,12,16,53]. Ponadto zakłada się prostoliniowe toru ruchu cząstek.

Na podstawie dokonanego rozpoznania literaturowego zagadnienia oraz na podstawie badań własnych opracowano całkowicie odmienny sposób opisu i analizy obserwowanych zjawisk w przepływach wielofazowych.

Przy analizowaniu parametrów przepływów wielofazowych, składających się np. z wody i powietrza lub wody, powietrza i cząstek stałych, niezbędna jest znajomość ruchu pojedynczych cząstek wody, powietrza i ciał stałych oraz ich wzajemnych układów.

W pierwszej części pracy przedstawiono opracowane przez autora modele teoretyczne przepływów wielofazowych oraz wyniki badań prędkości przepływu pojedynczych pecherzyków powietrza oraz kuleczek styropianowych, które wykorzystano jako model porównawczy ruchu pojedynczych pecherzyków powietrza, a także jako odrębny czynnik nośny [40,42].

Przeprowadzone badania na instalacji laboratoryjnej oraz uzyskane wyniki pozwoliły opracować zależności różnicy prędkości i prędkości unoszenia analizowanych cząstek w wodzie stojącej i przepływającej dla trzech odcinków instalacji oraz określić jej zależność od wysokości położenia i turbulencji przepływu wody.

Dla badanych cząstek wyznaczono współczynniki oporu czołowego w funkcji średnicy i prędkości przepływu wody. Dokonano ich porównania z wartościami współczynników obliczonych dla tych samych parametrów z zależności literaturowych zalecanych dla cząstek stałych [43].

Z przeprowadzonej analizy wynika, że niemal w całym badanym zakresie średnic i liczb Reynoldsa wartość współczynnika oporu czołowego – c_w wyznaczona na podstawie przeprowadzonych badań jest większa od wartości teoretycznych. Uzyskane wyniki pozwalają na następujące stwierdzenia:

- im większa prędkość przepływu i liczba Reynoldsa, tym różnice badanych współczynników oporu czołowego c_w są mniejsze,
- ze wzrostem średnicy badanych cząstek błąd względny między wartościami wyznaczonymi przez autora i obliczonymi teoretycznie rośnie.

Uzyskane zależności do wyznaczenia współczynnika oporu czołowego stały się podstawą analizy ruchu badanych mieszanin wielofazowych.

Przy projektowaniu i analizowaniu reżimu pracy każdej instalacji niezbędna jest znajomość prędkości transportowej cząstek stałych. Znane są analizowane parametry transportu ciał stałych w wodzie lub w powietrzu. Brakowało natomiast sprawdzonych wyników dla transportu ciał stałych w strumieniu wodno–powietrznym. Autor przeprowadził badania laboratoryjne dla ciał stałych o kształtach regularnych oraz wybranych ciał naturalnych. Badania obejmowały pomiar wartości prędkości unoszenia i prędkości transportowej w zależności od objętościowego natężenia przepływu powietrza, gęstości, kształtu i rozmiarów badanych ciał. Gęstość badanych ciał zmieniała się od 1300 do 7800 kg/m³ (badane kształty to kule, sześciiany i prostopadłościany).

W wyniku kilkunastoletnich eksperymentów i doświadczeń autor zaprojektował i zbudował nową oryginalną instalację, umożliwiającą badanie i rejestrację zjawisk zasysania i transportu ciał stałych dla następujących trzech rodzajów (odmian) transportu:

- za pomocą sprężonego powietrza,
- za pomocą cząstek stałych o gęstości mniejszej od gęstości cieczy (kuleczki styropianowe),
- za pomocą strumienicy.

W instalacji zastosowano nową konstrukcję zbiornika głównego z ruchomym i oszklonym talerzem obrotowym, spełniającym rolę zasobnika i podajnika cząstek stałych. Specjalne ułożyskowanie i podparcie (usadowienie) walu talerza pozwala regulować jego odległość od czoła wlotu rurociągu ssącego, co umożliwia ponadto badanie efektu zasysania cząstek stałych.

Oryginalnym rozwiązaniem autora jest również mieszalnik powietrza z wodą i oddzielacz powietrza.

W wyniku przeprowadzonych badań i obserwacji przebiegu procesów transportu mieszanin wielofazowych autor opracował dyskretny model matematyczny przepływu mieszanin dwu- i trójfazowych w rurociągach pionowych. Model uwzględnia ruch pojedynczych cząstek powietrza, cieczy i ciał stałych oraz ich konglomeratów (zlepionych cząstek jedno- i wielofazowych).

Opisuje również proces łączenia i rozpadu konglomeratów lub cząstek przy założonym losowo rozkładzie średnic pęcherzyków powietrza. Dopuszcza wielokierunkowość przemieszczania się cząstek, łącznie z ruchami powrotnymi (wstecznymi), które występują w stanach nieustalonych pracy instalacji.

Zaproponowany model matematyczny oraz program obliczeniowy pozwala analizować i rejestrować:

- objętościowe natężenie przepływu powietrza, wody i cząstek stałych,
- rozkład w przekroju poprzecznym rurociągu prędkości przepływu powietrza, wody i cząstek stałych,
- rozkład w przekroju podłużnym rurociągu cząstek powietrza, wody i cząstek stałych,
- rozkład średnic pęcherzyków powietrza.

Weryfikacji przedstawionego modelu teoretycznego dokonano przez porównanie parametrów wydajnościowych teoretycznych i pomiarowych instalacji, tzn.:

- objętościowego natężenia przepływu wody przy zadanym objętościowym natężeniu przepływu powietrza dla przepływu dwufazowego,
- objętościowego natężenia przepływu cząstek stałych przy zadanym objętościowym natężeniu przepływu powietrza dla przepływu trójfazowego.

Z porównania wartości analizowanych parametrów wynika duża zgodność wyników dla przepływu dwufazowego w zakresie zmian objętościowego natężenia przepływu $Q_p = 20 \dots 50 \text{ m}^3/\text{h}$, błąd względny wynosi od 1.0 do 17.8 %. Dla przepływu trójfazowego błąd względny zmienia się od 0.78 do 18.6%. Przy większych wartościach Q_p błąd względny rośnie. Zależność błędu względnego od Q_p przedstawiono graficznie na rys. 61. Załączona w pracy dokumentacja obliczeń pozwala po raz pierwszy dostrzec wizualne podobieństwo ruchów cząstek analizowanych przez komputer do ruchów rzeczywistych w instalacji zarejestrowanych za pomocą kamery VHS.

Zdaniem autora zgodność ta jest nie mniej ważna niż zgodność wartości liczbowych.

Szczególnie ciekawe są ruchy powrotne cząstek stałych i wody w stanach nieustalonych pracy instalacji oraz tworzenie się skupisk cząstek odpowiadających zawirowaniom obserwowanym w trakcie pracy instalacji.

Przedstawiony w pracy model teoretyczny przepływu mieszanin wielofazowych powinien stanowić narzędzie pracy konstruktorów i projektantów na etapie projektowania oraz narzędzie analizy pracujących instalacji transportu pionowego kopalin lub innych materiałów ziarnistych.

121

INVESTIGATION ON PHENOMENA OCCURRING BY TRANSPORTATION OF MINERALS FROM DEPTH IN SHAFT PIPELINES

S u m m a r y

In hydraulic and pneumatic installations for vertical transport used for lifting granular materials, the process of suction and transport of solid particles in the stream of air-water mixture takes place. This process is very complicated and thus it is very difficult to describe it mathematically.

So far attempts at theoretical descriptions of the process have been based on very simplified models [7,18,20]. Homogenous models of mixtures or the particle model have been adopted and an increase in the volume of air bubbles without taking into account their decomposition or formation of one or multiphase conglomerates [53] has been assumed [5,12,16,53]. Moreover, rectilinear paths of particle movement have been assumed.

On the basis of an examination of the literature on the problem and the carried out research a totally different way of an analysis and description of the phenomena observed in multiphase flow is proposed.

While analysing parameters of multiphase flows consisting of e.g. water and air, or water and solid particles the knowledge of movements of individual water air and solid particles and of their mutual arrangements is indispensable.

The first part of the dissertation presents theoretical models of multiphase flows worked out by the author and also the results of research into velocities of flow of individual air bubbles and foamed polystyrene balls which were used as a comparative models for the movement of individual air bubbles and also as a separate carrying agent [40,42].

The research carried out on a laboratory installation and the obtained results enabled the author to work out dependences of the difference of velocity and velocity of convention of the analysed particles in stagnant and flowing waters for three sections of the installations (Fig.22) and to determine its dependence on the height and turbulence of the water flow.

Head resistance coefficients as the function of the diameter and velocity of the water flow are determined for the analysed particles. These coefficients are compared with coefficients computed for the same parameters from dependences recommended for solid particles in the literature [43].

It can be seen from the carried out analysis that in almost whole range of the investigated diameters and Reynolds's number, the value of the head resistance c_w determined on the basis of the research is larger than theoretical values. The obtained results lead to the following statements:

- the greater flow velocity and Reynolds's number are, the smaller differences between the investigated head resistance coefficients c_w are,
- as the diameter of the investigated particles increases, the relative error between the values determined by the author and those computed theoretically grows.

The dependences obtained for determining the head resistance coefficient are a basis for an analysis of movements of the investigated multiphase mixtures. To design and analyse the work of each transport installation it is necessary to know the transport velocity of solid particles.

Transport parameters of solid bodies in water or air are wellknown. However, there was a lack of approved results for the transport of solid bodies in an air–water stream. This is why the author conducted his own laboratory tests for solid bodies of regular shapes and for chosen natural bodies. The tests comprised measurements of values of the velocity of convection and transport velocity depending on the volumetric intensity of air flow, density shapes and dimensions of the investigated bodies. The density of the investigated bodies ranged from 1300 to 7800 kg/m³ (the bodies being spheres cubes and prisms).

As a result of several years of experience and research, the author designed and built a new original installation which makes it possible to investigate and register phenomena of suction and transport of solid bodies for the following three types of transport:

- with the help of compressed air,
- with the help of solid particles of density smaller than the liquid density (foamed polystyrene balls),
- with the help of a jet pump.

A new construction of the main tank with a mobile and glazed rotational disk is a part of the installation (the disk fulfilling the role of a bunker and feeder). Special bearings and support of the shaft of the disk make it possible to regulate its distance from the inlet of a suction pipeline, which enabled the author to investigate the effect of suction of solid particles.

An air–water mixer and air separator are also author's original solutions.

As a result of the carried out investigations and observations of the course of the process of transport of multiphase mixtures the author worked out an original discrete mathematical model of the flow of di- or triphase mixtures in vertical pipelines. The model analyses movements of single air liquid and solid particles and of their conglomerates (agglutinated one or multiphase particles). It also describes the process of formation and decomposition of conglomerates or particles when a random distribution of the diameters of air bubbles is assumed. The model also accounts for multidirectional movements of particles together with reverse movements which take place in transient states of the work of an installation.

The proposed mathematical model and computing programme analyse and register:

- volumetric intensity of the flow of air, water and solid particles,
- distribution of the flow velocity of air, water and solid particles in a cross–section of a pipeline,
- distribution of air, water and solid particles in a longitudinal section of a pipeline.

The presented theoretical model was verified by a comparison of the theoretical and measured efficiency parameters of an installation, i.e.:

- volumetric intensity of the water flow at a given volumetric intensity of the air flow for the diphasic flow,
- volumetric intensity of the flow of solids particles at a given intensity of the air flow for the triphase flow.

A large compatibility of the results for the diphasic flow for the range of volumetric changes in the flow intensity of $Q_p = 20 - 50 \text{ m}^3/\text{h}$ can be seen from a comparison of the values of the analysed parameters. The relative error ranging the from 1 to 18.6%. For the triphase flow the relative error changes from 0.78 to 18.6%. For large Q_p values the relative error grows. The dependence of the relative error on Q_p is presented in Fig.61. The attached computations make possible for the first time to see the similarity

of movements of the particles analysed by a computer to real movements in an installation registered by a VHS camera.

In the author's opinion this similarity is no less important than the compatibility of number values. Reverse movements of solid and water particles in transient states of the work of an installation and also the formation of particle clusters which are equivalent to whirls observed in an installation are especially interesting.

The presented theoretical model of the flow of multiphase mixtures should become a tool for designers and constructors at the stage of designing and also a tool for analysing working installations for vertical transport of minerals and other granular materials.

MODELLVERSUCHE DER MEHRPHASEN STRÖMUNGSVORGÄNGE IN SENKRECHTEN ROHRLEITUNGEN BEI DER ROHSTOFFGEWINNUNG

Kurzfassung

In den Anlagen für den hydraulisch-pneumatischen senkrechten Transport, die zur Förderung von körnigen Stoffen dienen, tritt das Ansaugen- und Transportverfahren fester Teilchen im Strom der Wasser-Luft-Mischung auf. Dieses Verfahren ist sehr kompliziert und gleichzeitig für eine mathematische Beschreibung sehr schwierig. Die bisherigen Proben einer theoretischen Beschreibung des Verfahrens stützten sich auf sehr vereinfachten Modellen [7,18,26]. Werden die Modelle homogener Mischungen oder das molekulare Modell angenommen, dann wird das Ansteigen des Volumens von Luftblasen vorausgesetzt ohne ihren Zerfall oder das Zusammenfügen in Ein- oder Mehrphasenkonglomerate zu berücksichtigen [5,12,16,53]. Außerdem werden geradlinige Bewegungsbahnen der Teilchen angenommen.

In Anlehnung an gemachte Literaturübersicht zu diesem Problem und aufgrund eigener Untersuchungen wurde eine ganz andere Art der Beschreibung und Analyse beobachteter Effekte in Mehrphasenströmungen bearbeitet.

Bei der Parameteranalyse von Mehrphasenströmungen, die z.B. aus Wasser und Luft oder Wasser, Luft und fester Teilchen bestehen, müssen die Bewegungen einzelner Wasser, Luft und Festkörperteilchen sowie ihre gegenseitige Anordnungen bekannt sein.

Im ersten Teil der Arbeit wurden die vom Autor bearbeiteten theoretischen Modelle der Mehrphasenströmungen sowie Untersuchungsergebnisse der Strömungsgeschwindigkeiten einzelner Luftblasen und Styroporkügelchen dargestellt, die als Vergleichsmodell der Bewegung einzelner Luftblasen wie auch als gesondertes Fördermedium [40,42] genutzt wurden.

Die an der Laboranlage durchgeführten Untersuchungen sowie die erhaltenen Ergebnisse erlaubten die Abhängigkeit der Geschwindigkeitsdifferenz und der Schwebegeschwindigkeit analysierter Teilchen im Stand- und Fließwasser für drei Anlageteile Abb. 22 zu bearbeiten wie auch ihre Abhängigkeit von der Höhe und Turbulenz der Wasserströmung zu bestimmen.

Für die untersuchten Teilchen wurden die Widerstandzahlen in der Funktion des Durchmessers und der Wasserströmungsgeschwindigkeit bestimmt. Sie wurden mit den

Werten der Koeffizienten verglichen, die für die gleichen Parameter aus in der Literatur empfohlenen Abhängigkeiten für Festteilchen berechnet wurden [43].

Aus der durchgeführten Analyse geht hervor, daß fast im ganzen untersuchten Bereich der Durchmesser und der Reynoldszahlen der aufgrund durchgeführter Untersuchungen bestimmte Wert der Widerstandszahl $-c_w$ größer ist als die theoretischen Werte. Die erhaltenen Ergebnisse erlauben folgendes festzustellen:

- je größer die Strömungsgeschwindigkeit und die Reynoldszahl ist, desto kleiner sind die Differenzen untersuchter Widerstandzahlen c_w ,
- wächst der Durchmesser untersuchter Teilchen, dann wächst der relative Fehler zwischen den vom Autor bestimmten und den theoretisch berechneten Werten.

Die zur Bestimmung der Widerstandzahl erhaltenen Abhängigkeiten wurden die Grundlage für die Bewegungsanalyse untersuchter Mehrphasengemische.

Beim Projektieren und Analysieren der Arbeitsdisziplin jeder Transportanlage muß man die Transportgeschwindigkeit fester Teilchen kennen. Die analysierten Transportparameter von Festkörpern im Wasser oder in der Luft sind bekannt. Es fehlten aber überprüfte Ergebnisse für den Transport von Festkörpern im Wasser–Luft–Strom. Aus diesem Grund führte der Autor eigene Laboruntersuchungen für Festkörper regulärer Formen sowie gewählter natürlicher Körper durch. Die Untersuchungen umfaßten die Messungen von Werten der Schwebegeschwindigkeit und Transportgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Volumenstärke der Luftströmung, der Dichte, der Form sowie der Ausmaße untersuchter Körper. Die Dichte untersuchter Körper änderte sich von 1300 bis 7800 kg/m³ (untersuchte Formen waren: Kugeln, Würfel und Quader).

Infolge einiger zehn Jahre von Untersuchungen und Erfahrungen projektierte und baute der Autor eine neue originelle Anlage, wodurch die Untersuchung und Registrierung neuer Ansaugeffekte sowie der Transport von Festkörpern für folgende drei Arten (Abarten) vom Transport möglich wurde:

- mit Hilfe der Druckluft,
- mit Hilfe fester Teilchen, deren Dichte kleiner ist als die Flüssigkeitsdichte (Styroporkugeln),
- mit Hilfe der Strahlpumpe.

In der Anlage wurde eine neue Konstruktion des Hauptbehälters mit einem beweglichen und verglastem Drehteller angewendet, der als Vorratsbehälter und

Zubringer fester Teilchen dient. Die besondere Lagerung und Unterstützung (Setzung) der Tellerwelle erlaubt ihren Abstand von der Eintrittsstirn der Saugrohrleitung zu regulieren, und das erlaubt außerdem den Ansaugeffekt fester Teilchen zu untersuchen.

Eine originelle Lösung des Autors ist auch der Mischer Luft mit Wasser und Luftabscheider.

Infolge durchgeführter Untersuchungen und Beobachtungen des Verlaufes von Transportverfahren der Mehrphasengemische machte der Autor ein originelles diskretes mathematisches Modell der Strömung Zwei- und Dreiphasengemische in senkrechten Rohrleitungen. Dieses Modell analysiert die Bewegung von Luft-, Flüssigkeits- und Festkörperteilchen sowie ihrer Konglomerate (zusammengeklebter Ein- und Mehrphasenteilchen).

Es beschreibt auch das Verfahren des Zusammenfügens und Zerfalls von Konglomeraten und Teilchen bei stochastisch vorausgesetztem Zerfall der Luftblasendurchmesser. Es läßt eine mehrseitige Verlagerung von Teilchen zu, zusammen mit den Rückbewegungen, die in nichtfestgesetzten Zuständen der Arbeit der Anlage auftreten.

Das vorgeschlagene mathematische Modell sowie das Berechnungsprogramm erlauben:

- die Volumenstärke der Strömung von Luft, Wasser und festen Teilchen,
- den Zerfall im Querschnitt der Rohrleitung der Strömungsgeschwindigkeit von Luft, Wasser und festen Teilchen,
- den Zerfall im Längsschnitt der Rohrleitung der Teilchen von Luft, Wasser und fester Teilchen,
- den Zerfall der Luftblasendurchmesser zu analysieren und registrieren.

Die Verifikation der vorgestellten theoretischen Modells wurde durch Vergleich der theoretischen Leistungsparameter und der Anlagemeßparameter durchgeführt, d.h.:

- der Volumenstärke der Wasserströmung bei gegebener Luftströmungsstärke für die Zweiphasenströmung,
- der Volumenstärke der Strömung von festen Teilchen bei gegebener Luftströmungsstärke für die Dreiphasenströmung.

Aus dem Vergleich der Werte analysierter Parameter ergibt sich eine große Übereinstimmung der Ergebnisse für die Zweiphasenströmung im Bereich der Änderungen der Strömungsvolumenstärke $Q_p = 20 - 50 \text{ m}^3/\text{h}$, der relative Fehler beträgt von 1 bis 17.8%. Für die Dreiphasenströmung ändert sich der relative Fehler von 0.78 bis

18,6%. Bei größeren Q_p Werten wächst der relative Fehler. Die Abhängigkeit des relativen Fehlers von Q_p wurde in Abb. 61 dargestellt. Durch die der Arbeit beigelegte Berechnungsdokumentation kann zum ersten Mal die visuelle Bewegungsähnlichkeit der vom Computer analysierten Teilchen den realen an der Anlage anhand der VHS-Kamera registrierten Bewegungen gesehen werden.

Nach Ansicht des Autors ist diese Ähnlichkeit nicht weniger wichtig als die Übereinstimmung der Zahlenwerte. Besonders interessant sind die Rückbewegungen von festen Teilchen und Wasser bei nichtfestgelegter Arbeit der Anlage sowie die Bildung von Teilchenanhäufungen, die der während der Arbeit der Anlage beobachteten Wirbelung entsprechen.

Das in der Arbeit dargestellte theoretische Modell der Strömung von Mehrphasengemischen sollte das Arbeitswerkzeug von Konstrukteuren und Projektanten bei der Projektierung sowie als Analysenwerkzeug arbeitender Anlagen für den senkrechten Transport von verbaulichen Rohstoffen oder anderen körnigen Stoffen sein.

23.000,-

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej

P.3351/93 / 215