

Henryk MELOCH

Piotr KABSCH

Franciszek KNOP

Krzysztof KACZMARSKI

Institu t Inżynierii Ochrony Środowiska
Politechniki Wrocławskiej

Wiesław OSTROPOLSKI

Institu t Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów
Politechniki Wrocławskiej

KONDUKTOMETRYCZNA TECHNIKA POMIARÓW WYBRANYCH PARAMETRÓW PRZEPIŁYWÓW PIERŚCIENIOWO-DYSPERSYJNYCH

Streszczenie. Przedstawiono krytyczną analizę stosowanych dotychczas metod pomiarowych. Opisano opracowaną przez autorów konduktometryczną metodę badania prędkości ruchu elementów cieczy, oryginalną aparaturę oraz metodykę prowadzenia pomiarów i opracowywania wyników.

1. WPROWADZENIE

Przepływy pierścieniowo-dyspersyjne są jedną z częściej występujących form kontaktowania faz przy oczyszczaniu gazów odlotowych. Ma to również miejsce w coraz częściej stosowanych (do odpylania i absorpcji) płuczkach o wysokich prędkościach przepływu mediów. Poznanie przebiegu zjawisk przepływów wielofazowych w tych płuczkach (konieczne m.in. do przygotowania podstaw ich projektowania), a zwłaszcza ruchu elementów cieczy (prędkości i czasów przebywania kropeł oraz filmu cieczy, objętości cieczy "zawieszanej") czy wielkości powierzchni kontaktu faz wymaga jednak doboru metod pomiarowych dostosowanych do warunków działania aparatów. W większości nowoczesnych płuczek małowabarytowych, w tym szczególnie interesujących kontaktatorów iniekcyjnych, prędkości przepływu gazu mieszczą się w zakresie 20-70 m/s, choć w niektórych zwężkach Venturkiego przekraczają 100 m/s.

Jednym z ważniejszych parametrów opisujących działanie absorberów jest objętość cieczy "zawieszanej" V_c , tj. objętość cieczy, jaka w dowolnej chwili znajduje się w przestrzeni roboczej. Objętość ta jest ściśle związana zarówno z natężeniem zraszania, jak i ze stopniem rozdrobnienia cieczy, a tym samym i z powierzchnią kontaktu faz będącą w przepływach pier-

ścieniowo-dyspersyjnych sumą powierzchni kropeł F_k i jej filmu (płynącego po wewnętrznych ściankach aparatu) F_f . Odpowiednio więc całkowita objętość cieczy "zawieszona" V_c jest sumą objętości kropeł V_k i filmu V_f . Wychodząc z czasów przemieszczania się (w strefie roboczej) kropeł t_k i filmu t_f można z kolei określić te objętości ("zawieszonych" kropeł i filmu) jako:

$$V_k = L_{ck} \cdot t_k \quad \text{i} \quad V_f = L_{cf} \cdot t_f \quad (1), (2)$$

gdzie: $L_c = L_{ck} + L_{cf}$ to strumień objętości cieczy: całkowity L_c oraz przepływający w formie kropeł L_{ck} i filmu L_{cf} .

Aby więc móc określić objętość cieczy "zawieszona", konieczne jest wyznaczenie t_k , t_f , L_c oraz L_{cf} lub L_{ck} .

Można również próbować wyznaczać bezpośrednio doświadczalnie tę objętość, np. przez gwałtowne odcięcie przepływu mediów przez aparat lub pośrednio, np. mierząc powierzchnię kontaktu faz metodą chemiczną i z niej wyliczając V_c .

W poznaniu zjawisk dotyczących przepływów, ale także wymiany masy duże znaczenie ma również znajomość prędkości ruchu elementów cieczy (kropeł w_k filmu w_f) tak względem ścianek aparatu, jak i względem gazu.

2. ANALIZA METOD BADANIA OBJĘTOŚCI CIECZY ZAWIESZONEJ I RUCHU ELEMENTÓW CIECZY

Uzyskanie wiarygodnych wyników pomiarów przepływu pierścieniowo-dyspersyjnego w wysokoprędkościowych płuczkach z uwagi na:

- bardzo krótkie czasy przebywania cieczy w strefie roboczej aparatu ($10\text{-}10^2$ μs) oraz
- dużą wrażliwość takiego przepływu na niewielkie nawet zaburzenia parametrów hydrodynamicznych

wymaga, aby metoda pomiarowa spełniała następujące warunki:

- nie powinna powodować istotnych zmian w przepływie faz (np. w wyniku umieszczenia czujników),
- winna umożliwiać określanie zarówno wartości średnich (dla całej przestrzeni aparatu), jak i wartości lokalnych, np. prędkości kropeł i filmu czy objętości "zawieszona" cieczy,
- czas trwania pomiaru winien być co najmniej o 2 rzędy dłuższy od czasu reakcji układu pomiarowego, co oznacza, że bezwładność tego ostatniego nie może być większa niż $100 \mu\text{s}$.

Ponadto metoda ta powinna oczywiście charakteryzować się możliwie dużą dokładnością, jednoznacznością interpretacji wyników oraz dostępnością

materiałów i przyrządów służących do budowy układu pomiarowego oraz przetwarzania wyników.

Znakomita większość stosowanych dotąd metod, np. badania objętości cieczy "zawieszanej", tych warunków nie spełnia. I tak:

- metody izolacyjne polegają na bezpośrednim pomiarze objętości cieczy po szybkim odcięciu przepływu w strefie roboczej [1], [2], [3], [4], [5]. Wiąże się z istotnym zaburzeniem przepływu, dużą bezwładnością układu pomiarowego oraz wątpliwą dokładnością przy wysokich prędkościach przepływu faz,
- metoda pomiaru objętości cieczy "zawieszanej" poprzez izokinetyczny pobór próbki gazu [6] pozwala w rzeczywistości jedynie określać lokalne wartości gęstości strumienia, ale nie pozwala wyznaczać lokalnych wartości prędkości elementów cieczy, a co za tym idzie - w praktyce nie spełnia celu, jaki jej wyznaczali autorzy,
- metodę wagową [7], polegającą na ważeniu całego aparatu podczas pracy z cieczą i "na sucho", cechuje niska dokładność, zwłaszcza przy badaniach większych modeli płuczek.

Znacznie bardziej przydatne dla badań przy dużych prędkościach ruchu faz są metody pośrednie, w tym zwłaszcza metody znaczników. Polegają one na bezpośrednim pomiarze czasu, który upływa od wprowadzenia znacznika (do strumienia cieczy) do momentu pojawienia się progowej wartości stężenia znacznika w cieczy znajdującej się w określonym punkcie odległym o x od punktu dozowania. Jako znaczników używa się szybko dyfundujących elektrolitów lub substancji radioaktywnych.

Dotychczasowe wersje i zastosowania tych metod [7], [8], [9], służyły do badań płuczek o stosunkowo niskich prędkościach ruchu faz (np. płuczek z wypełnieniem), a dodatkowo określano nimi na ogół wyłącznie czasy przejścia znacznika przez cały aparat lub strefę roboczą.

Spśród metod oznaczania stężeń najbardziej interesująca wydaje się metoda konduktometryczna.

Można sądzić, że:

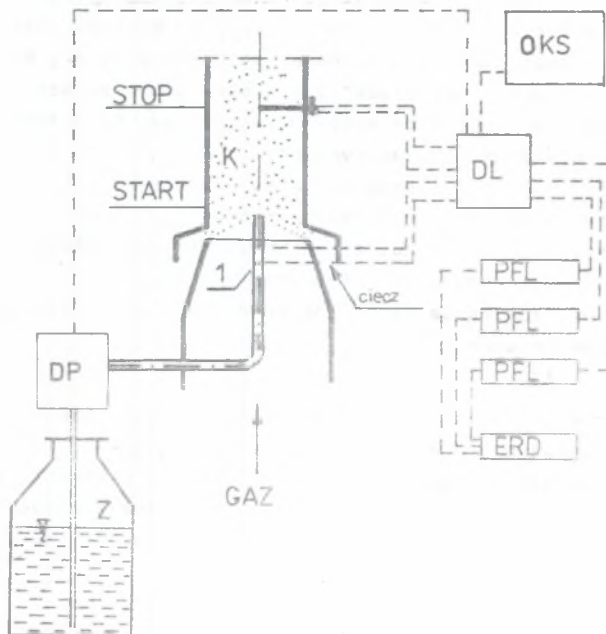
- dzięki prostocie i szybkości pomiaru konduktancji pozwala ona określać czasy międzyimpulsowe z wysoką dokładnością ($\pm 1 \mu s$),
 - daje szansę miniaturyzacji czujników, a tym samym stwarza możliwości prowadzenia badań w dowolnym fragmencie przestrzeni roboczej aparatu, co jest szczególnie ważne w odniesieniu do małogabarytowych płuczek wysokoprędkościowych,
 - pozwala na pomiar ruchu tak kropeł cieczy jak i filau
- oraz - co najważniejsze
- istnieje realna szansa zbudowania (z dostępnych w kraju mierników, elementów i materiałów) układu pomiarowego o małej bezwładności, wysokiej dokładności, w pełni bezpiecznego oraz z możliwością automatyzacji badań i łatwego przetwarzania ich wyników.

Te zalety spowodowały, że autorzy będąc zmuszeni do przygotowania narzędzi pracy w badaniach nad wymianą masy, pędu i ciepła w kontaktorach iniekcyjnych wybrali właśnie metodę konduktometryczną do badania ruchu elementów cieczy oraz opracowali odpowiednią metodykę i aparaturę.

3. METODA KONDUKTOMETRII W ZASTOSOWANIU DO POMIARÓW RUCHU ELEMENTÓW CIECZY W WYSOKOPRĘDKOŚCIOWYCH PŁUCZKACH [10], [11], [12], [13]

3.1. Ruch kropeł

Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawia rys. 1. Znacznik (powodujący istotną zmianę konduktancji cieczy) wprowadzany jest dawkami (do przestrzeni aparatu, w której poruszają się krople) mikrodyszą 1 połączoną z programowanym dozownikiem. W mikrodyszy (rys. 2) wbudowany jest czujnik konduktometryczny START uruchamiający pomiar czasu. Zaszczepione znacznikiem krople padając na przedstawiony na rys. 3 czujnik STOP (czujników takich może być wiele umieszczonych wzdłuż drogi ruchu kropeł) dają impuls kończący pomiar czasu.

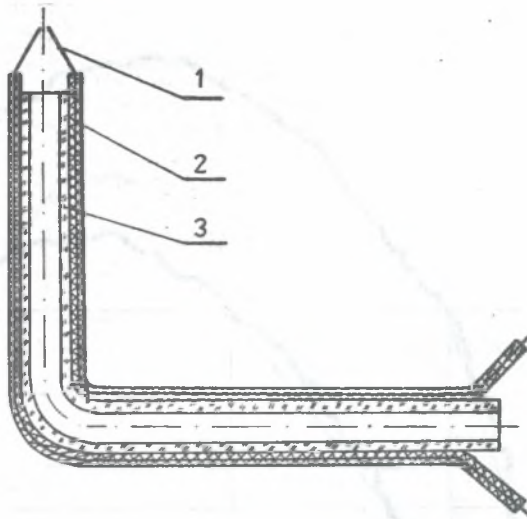


Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego

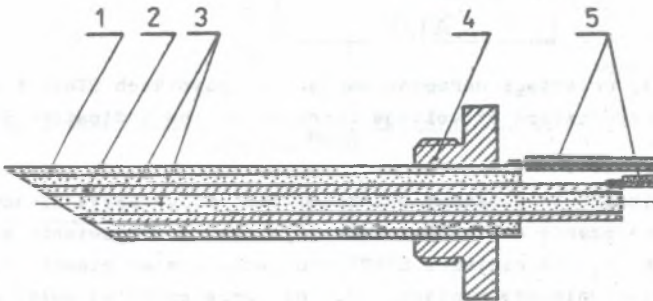
OKS - oscyloskop, DL - blok detekcyjno-logiczny, DP - dyspenser programowany, PFL - licznik czasu, ERD - drukarka, Z - zbiornik znacznika, K - gardziel iniekcyjnej płuczki

Fig. 1. Block diagram of measuring set

OKS - ascilloscope, DL - detection - logical block, DP - programmable dispenser, PFL - time meter, ERD - printer, Z - marker tank, K - throat of the injection-scrubber

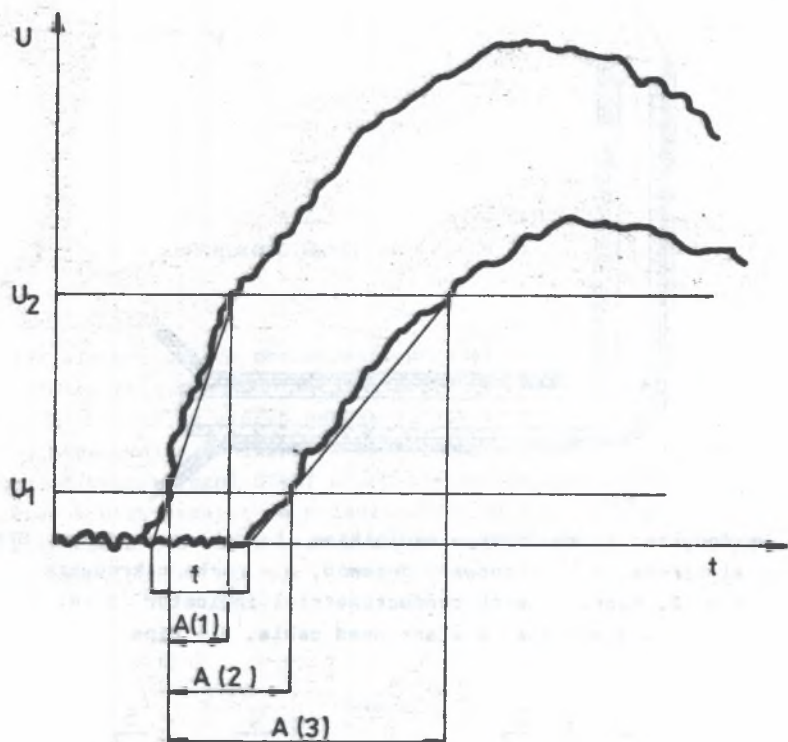


Rys. 2. Mikrodyśza z wbudowanym czujnikiem konduktometrycznym START
 1 - elektroda, 2 - ekranowany przewód, 3 - rurka mikrodyśzy
 Fig. 2. Microjet with conductometrial indicator START
 1 - electrode, 2 - screened cable, 3 - pipe



Rys. 3. Czujnik konduktometryczny STOP
 1, 2 - elektrody, 3 - izolacja elektryczna, 4 - element mocujący, 5 - ekranowany przewód
 Fig. 3. Conductometrical indicator STOP
 1,2 - electrodes, 3 - electrical isolation, 4 - fixing, 5 - screened cable

W celu uniknięcia wpływu różnic w wykonaniu czujników i zmian konduktancji cieczy wzdłuż drogi ruchu znaczonych kropeł (które podlegają koalescencji i rozpadowi) na dokładność pomiarów zdecydowano, że nie wystarcza jedynie pomiar czasu między wystąpieniem napięć progowych w czujnikach START i STOP, ale konieczny jest także pomiar czasów narastania napięcia



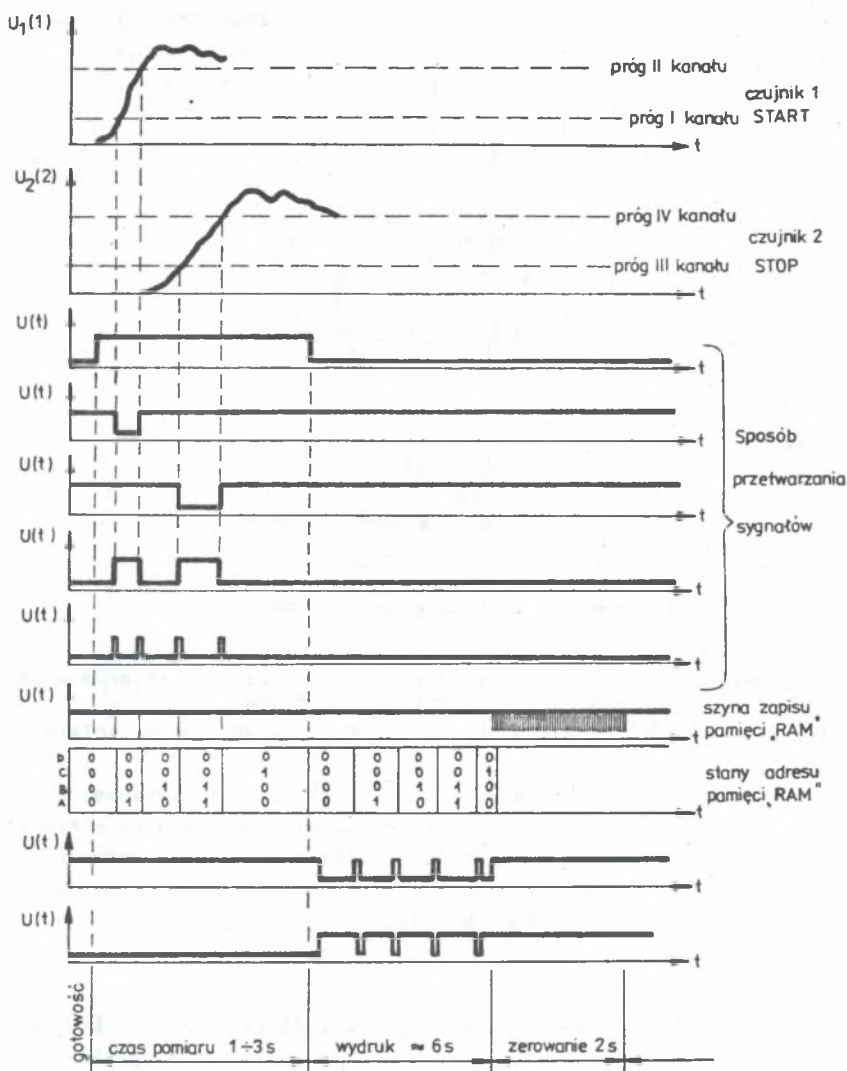
Rys. 4. Przebiegi narostów napięć na czujnikach START i STOP

Fig. 4. Characteristics of voltage increase of the indicators START and STOP

w tych czujnikach. Ideę takiej metrologicznej modyfikacji metody pomiaru czasu przemieszczania się kropeł ilustruje rys. 4. Pojawienie się napięcia progowego V_1 na czujniku START uruchamia pomiar czasów $A(1)$, $A(2)$, $A(3)$, zaś pojawienie się napięcia V_2 na tymże czujniku wyłącza pomiar czasu $A(1)$. Pojawienie się napięcia V_2 na czujniku STOP wyłączało pomiar czasu $A(2)$, zaś napięcie V_2 na tymże czujniku kończyło pomiar czasu $A(3)$. Wykorzystując prawie liniowy przebieg zmian napięcia w zakresie $0-V_2$ można określać faktyczny czas przemieszczania się kropeł między czujnikami START i STOP (a więc między odpowiadającymi im przekrojami aparatu) jako

$$t = \frac{A(1) \cdot V_1 + A(2) \cdot V_2 - A(3) \cdot V_1}{V_2 - V_1} \quad (3)$$

Zasadę działania systemu pomiarowego z przetworzeniem i gromadzeniem wyników ilustruje rys. 5.



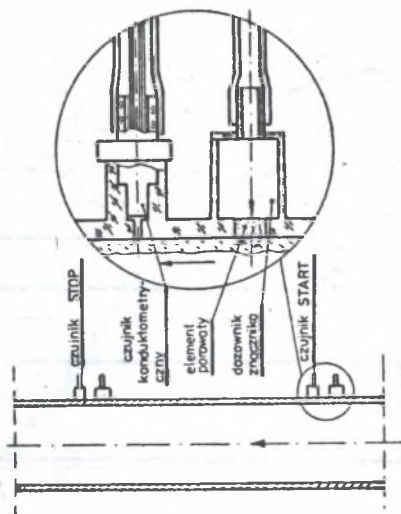
Rys. 5. Zasada działania systemu pomiarowego
 Fig. 5. Principle of measuring of set performance

3.2. Ruch filmu cieczy

W badaniach ruchu filmu cieczy można posługiwać się takim samym zestawem podstawowej aparatury i osprzętu pomiarowego jak przy badaniach ruchu kropeł, z tym że konieczne są zmiany:

- w sposobie dozowania znacznika, a także wzajemnym rozmieszczeniu czujników i króćców do dozowania oraz
- polegające na zastosowaniu innego rodzaju czujnika konduktometrycznego.

Schemat rozmieszczenia czujników konduktometrycznych oraz króćców do dozowania znacznika przedstawia rys. 6, zaś budowę czujnika rys. 7. Ilość zestawów króćciec dozujący - czujnik konduktometryczny może być dowolna.



Rys. 6. Schemat rozmieszczenia czujników konduktometrycznych oraz króćców dozowania znacznika do filmu

Fig. 6. Spacing of conductometrical indicators and marker inlets

Znacznik dozowany jest w tym wypadku poprzez porowatą ściankę, aby nie zakłócić ruchu filmu i uniknąć przedostawania się znacznika do strumienia gazu. Dozowanie znacznika w zestawie 1 umożliwia określenie czasu przemieszczania się filmu między zestawami 1 i 2 (wówczas czujnik zestawu 1 pełni rolę START, czujnik zestawu 2 rolę STOP).

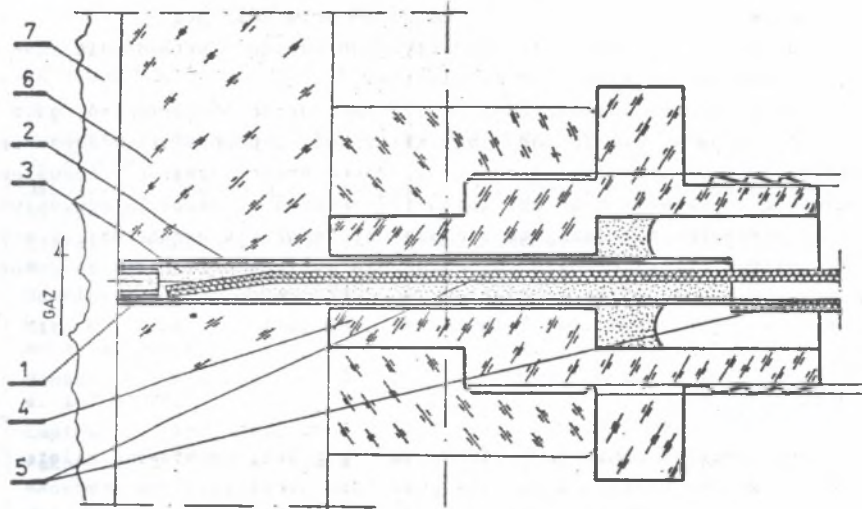
3.3. Stosowana aparatura

Układ pomiarowy zbudowano wykorzystując wyłącznie aparaturę krajowej produkcji. Do dozowania znacznika używano programowanego dyspensera typu 338B produkcji UNIPAN.

Przebiegi zmian konduktancji cieczy, których znajomość była niezbędna w celu poznania charakterystyki czujników i sprawdzenia poprawności działania bloku detekcyjno-logicznego, obserwowano za pomocą dwukanałowego oscyloskopu typu OKS-512 A produkcji Radiotechnika. Utrwalenie obserwowanego przebiegu na ekranie oscyloskopu można uzyskać poprzez sprzęgnięcie go z pamięcią typu PO-1 produkcji KAMAR.

Czasy międzyimpulsowe mierzono za pomocą częstotliwościomierzy - liczników czasu typu PFL-21 produkcji ZOPAN, a rejestrowano je za pomocą drukarki typu ERD-103 produkcji WSZ Kraków. Układ umożliwia również podłączenie

jako rejestratora dziurkarki taśmy typu DT 105S produkcji MERA-ELZAB lub pamięci kasetowej PK-1 produkcji MERAMAT. Te dwa ostatnie z wymienionych sposobów rejestracji umożliwiają prowadzenie niemalże na bieżąco komputerowej obróbki danych pomiarowych, ograniczając pracochłonność eksperymentu do minimum.



Rys. 7. Czujnik konduktancji filmu

1,2 - elektrody, 3 - izolacja elektryczna, 4 - korpus czujnika, 5 - ekranowane przewody, 6 - ścianka gardzieli, 7 - film cieczy

Fig. 7. Conductometrical indicator for the liquid film

1,2, - electrodes, 3 - electrical isolation, 4 - fixing, 5 - screened cables, 6 - wall of the throat, 7 - liquid film

Oprócz wymienionej aparatury na układ pomiarowy składały się czujniki i blok detekcyjno-logiczny. Są to nietypowe elementy zaprojektowane i zbudowane przez autorów niniejszej pracy.

3.4. Sposób prowadzenia pomiarów i opracowania uzyskanych wyników

Pomiary czasów przemieszczania się elementów fazy ciekłej w modelowej płuczce rozpoczynano od regulacji podstawowych parametrów przepływu takich jak prędkość gazu oraz natężenie zraszania. Po osiągnięciu stabilności tych parametrów oraz przygotowaniu całego układu pomiarowego dozowano elektrolityczny znacznik. Jednorazowe dozowanie znacznika umożliwiało dokonanie pomiaru czasów $A(1)$, $A(2)$ i $A(3)$ oraz obliczenie pojedynczej wartości czasu t przemieszczania się kropeł lub filmu pomiędzy przekrojami pomiarowymi.

Kolejne dozowanie znacznika wyzwalają (automatycznie) pomiary czasów międzyimpulsowych i poszerzały zbiór wartości czasu t traktowanego jako zmienna losowa. Stopień skomplikowania bowiem procesów zachodzących pomiędzy przekrojem iniekcji cieczy a przekrojami pomiarowymi (koalescencja, wtórny rozpad kropeł, migracja cieczy pomiędzy strumieniem kropeł i filmem itp.) sprawia, że każda kropla docierająca do przekroju pomiarowego (uderzająca w czujnik konduktancji) ma nieco inną "historię".

Zatem uzyskanie wartości reprezentatywnych wymagało prowadzenia statystycznej analizy uzyskiwanych rezultatów.

W każdym z wariantów pomiarowych wykonywano około 60 powtórzeń, gdyż - jak stwierdzono - taka liczność próbek losowej zapewnia stosunkowo niewielkie odchylenia standardowe czasu t . Zatem średni czas t (rozumiany jako wartość oczekiwana z próbki losowej) uznawano za zadowalający estymator tegoż parametru pochodzącego z nieznannej populacji generalnej. Statystyczną analizę rejestrowanych automatycznie wyników prowadzono za pomocą mikrokomputera.

4. PODSUMOWANIE

Opracowana metoda pomiarowa posiada szereg zalet. Podstawową zaletą jest to, że zasada pomiaru umożliwia pośrednie określanie faktycznych czasów docierania czoła "fali" znacznika do przekroju pomiarowego z wysoką dokładnością, pomimo iż rzeczywiste czasy osiągnięcia poszczególnych progów konduktancji są stosunkowo długie. Zatem sama zasada pomiaru stawa się już metodą w rzędzie nadających się do badania procesów szybko zmieniających, jakimi są procesy i zjawiska składające się na przepływy pierścieniowo-dyspersyjne. Maksymalną niedokładność, z jaką mierzony jest czas t , można szacować na 1 do 2 ms. Zastosowana aparatura reaguje natomiast jeszcze szybciej, gdyż opóźnienia w reakcji układu kształtują się poniżej 10 μ s. Wynika to z charakterystyki i funkcji jego elementów składowych.

Pewną wadą prezentowanego systemu pomiarowego jest fakt, że zarówno czujniki, jak i blok detekcyjno-logiczny są nietypowe i wymagają zbudowania, ale jest to możliwe na podstawie dostępnych materiałów. Wskazane byłoby zatem podjęcie choćby jednostkowej ich produkcji na potrzeby zainteresowanych krajowych placówek badawczych.

Opracowana metodyka pomiarowa przeznaczona jest do określania parametrów ruchu elementów fazy ciekłej oraz lokalnych i całkowitych objętości cieczy "zawieszonych", zarówno w nisko-, jak i wysokopiędkościowych wymiennikach masy (tj. w większości typów absorberów i w niektórych ekstraktorach), ciepła (np. w suszarkach rozprężowych), a także pędu (np. w strumieniach).

Stwierdzone pełną przydatność metodyki do pomiarów przy prędkościach:

- gazu w zakresie 0-50 m/s,
- cieczy w zakresie 0-30 m/s.

Opracowany układ pomiarowy umożliwia wykonanie do 300 pomiarów w ciągu godziny.

LITERATURA

- [1] Kasturi G., Stepanek J.B.: Chem. Eng. Sci. 1974, nr 8, vol. 29, s. 713-719.
- [2] Jepsen I.C., Ralph J.L.: Process. Inst. Mech. Eng. 1969-70, vol. 184, s. 154-165.
- [3] Linek V., Beneš P.: Ind. Eng. Chem. Fundam. 1978, vol. 17, nr 4, s. 298-305.
- [4] Woźniak M.: Inż. Chem., 1975, t. V, nr 4, s. 903-916.
- [5] Kito M., Tabei K.: Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 1978, vol. 17, nr 4, s. 568-571.
- [6] Winkler K., Kašanek F.: Coll. Czech. Chem. Commun., 1982, vol. 47, s. 1470-1478.
- [7] Lapidus L., Ind. Eng. Chem.: 1957, vol. 49, nr 6, s. 1000-1006.
- [8] Fukushima S., Kusaka K.: J. Chem. Eng. Jap., 1977, vol. 10, nr 6, s. 461-467.
- [9] Woźniak M.: Inż. Chem., 1975, z. vol. nr 2, s. 401-407.
- [10] Meloch H., Knop F.: Rap. Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocław. SPR nr 31/83, Wrocław 1983.
- [11] Meloch H., i in.: Rap. Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocław. SPR nr 64/84, Wrocław 1984.
- [12] Meloch H., Knop F.: Rap. Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocław. SPR nr 5/86, Wrocław 1986.
- [13] Meloch H., i in.: Rap. Inst. Inż. Środow. Pol. Wrocław. SPR nr 67/87, Wrocław 1987.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ

Р е з ю м е

Представлено критический анализ применяемых до сих пор измерительных методов. Описано разработанный авторами кондуктометрический метод исследования скорости капель и жидкой пленки. Представлено методику ведения исследований и разработки результатов.

ON MEASUREMENT METHODS OF SOME PARAMETERS OF
ANNULAR-DISPERSED FLOW

S u m m a r y

The presently used measurement methods of liquid residence time in annular - dispersed flow have been analysed. The new (adapted by the authors) conductometrical method of measuring droplet and liquid movement has been presented. The investigation method, apparatus and procedure of computations have been described.