

Henryk MELOCH

Piotr KABSCH

Franciszek KNOP

Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska
Politechniki Wrocławskiej

BADANIA RUCHU KROPEL I FILMU CIECZY W WYSOKOPRĘDKOŚCIOWEJ PŁUCZCE INIEKCYJNEJ

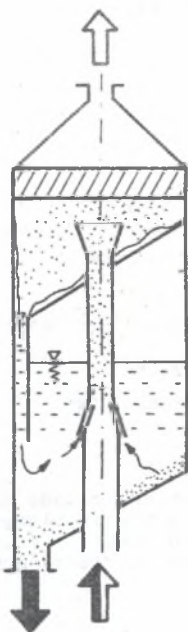
Streszczenie. Przedstawiono zasadę działania płuczki iniekcyjnej oraz zasadnicze nie rozwiązane problemy jej projektowania. Omówiono wybrane wyniki badań ruchu kropeł i filmu cieczy w gardzieli płuczki, a także zjawisko migracji cieczy pomiędzy filmem a kropkami.

1. WPROWADZENIE

Spśród aparatów służących do wymiany masy, pędu i ciepła w instalacjach oczyszczania gazów odlotowych coraz większego znaczenia nabierają wysokoprędkościowe płuczki iniekcyjne. Zasada działania tych płuczek (rys. 1) polega ogólnie na wykorzystywaniu energii strumienia oczyszczanego gazu do iniekcji cieczy, jej rozdrobnienia oraz transportu. Można dzięki temu uzyskiwać samoczynny (bez udziału pomp) zamknięty obieg cieczy z możliwością jednoczesnego odpylania i sorpcji w aparatach o relatywnie niewielkich gabarytach, prostej budowie i niekłopotliwej obsłudze.

Niestety szersze ich stosowanie jest jeszcze ciągle utrudnione z uwagi na brak dostatecznie sprawdzonych metod projektowania. M.in. zagadnieniem niezwykle istotnym jest określenie lokalnych prędkości przemieszczania się elementów cieczy (kropeł i filmu) w przepływach pierścieniowo-dy-spersyjnych, jakie występują w iniekcyjnych płuczkach. Ma to tym większe znaczenie, że zasadnicza część procesów odpylania i absorpcji zachodzi w stosunkowo niewielkiej odległości od miejsca wprowadzania cieczy. Jest to strefa niestacjonarności większości istotnych parametrów dwufazowego przepływu, a każdy z nich związany jest z prędkością ruchu kropeł lub filmu płynącego po wewnętrznych ściankach aparatu.

W Instytucie Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej realizowany jest obszerny program badań nad zjawiskami i procesami zachodzącymi w iniekcyjnych płuczkach. Znaczny udział mają w nim prace nad poznaniem tworzenia się oraz ruchu kropeł i filmu cieczy. Wybrane rezultaty eksperymentów fizycznych tej części prac przedstawiono poniżej.



Rys. 1. Schemat płuczki iniekcyjnej

Fig. 1. Scheme of injection scrubber

2. SPOSOB ROZWIĄZANIA PROBLEMU

Wstępne oszacowanie średnic kropeł cieczy i grubości filmu oraz przegląd dostępnej aparatury spowodowały, że zrezygnowano z bezpośredniego pomiaru prędkości ruchu cieczy w iniekcyjnej płuczce.

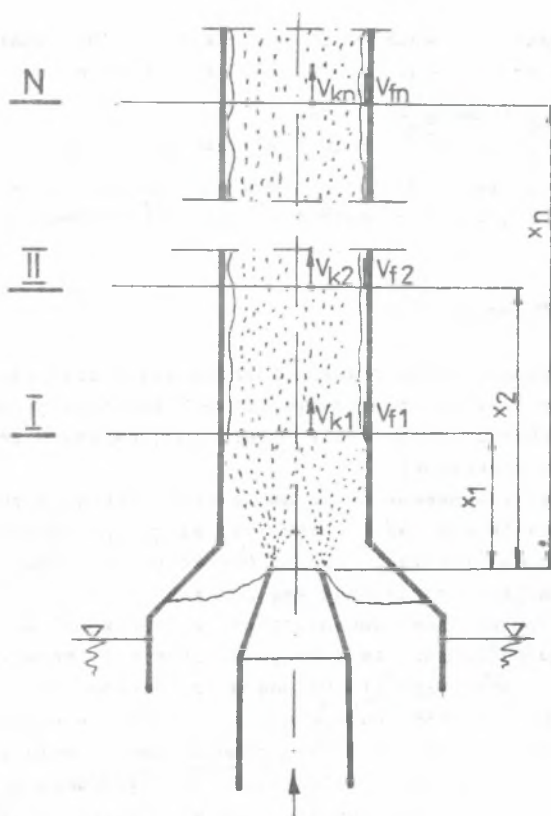
Jedyną bowiem metodą pomiaru bezpośredniego, która ewentualnie i to z koniecznością wykonania skomplikowanego dodatkowego oprzyrządowania mogłaby służyć temu celowi, jest metoda anemometrii laserowej. Niestety nie dysponowano stosowną aparaturą.

Uznano, że niemal równocennym rezultatem badań może być określenie czasów przemieszczania się kropeł i filmu cieczy pomiędzy wybranymi przekrojami aparatu. Czasy zaś można określać z wysoką dokładnością nawet w bardzo wąskich przedziałach, rzędu $10-10^2$ ns (bo z takimi czasami mamy do czynienia w przypadku ruchu kropeł), za pomocą ogólnie dostępnych częstotściomierzy - liczników czasu. Są one w stanie określać nawet nanosekundowe przedziały czasu pod warunkiem, że dostatecznie szybka będzie detekcja sygnałów uruchamiających i wyłączających licznik czasu.

Jako wielkość fizyczną, która nie podlegać zmianom i być kontrolowana przez układ pomiarowy, wybrano konduktancję cieczy, której ruch jest przedmiotem badań. Przy szczepieniu elementów cieczy elektrolitycznym znaczni-

kiem przekroczenie zadanej wartości konduktancji cieczy chwilowo otaczającej czujniki w określonych przekrojach pomiarowych powodowało włączenie, a następnie wyłączenia licznika czasu i zarejestrowanie czasu ruchu cieczy pomiędzy wspomnianymi przekrojami aparatu.

Metodykę pomiarów wg powyższej koncepcji oraz aparaturę pomiarową szczególnie opisano w pracach [1], [2], [3], [4] i [5].



Rys. 2. Ruch kropeł i filmu w gardzieli płuczki iniekcyjnej

Fig. 2. Movement of droplets and liquid film in the throat of injection scrubber

Istota badań polegała na określeniu wartości oczekiwanych ze zbioru maksymalnych prędkości ruchu elementów cieczy (kropeł V_k i filmu V_f) w gardzieli płuczki (rys. 2). Bezpośrednio mierzono metodą konduktometryczną czasy przemieszczania się czoła fali elektrolitycznego znacznika (szczegółowy techniki pomiaru przedstawiono w referacie pt. "Konduktometryczna technika pomiarów wybranych parametrów przepływów pierścieniowo-dyspersyjnych" 5). Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów określono zależności

odległości przebywanych przez elementy cieczy od czasu ruchu elementów $x = f_1(t_k)$ oraz $x = f_2(t_f)$. Pozwoliło to z kolei na oszacowanie maksymalnych prędkości kropli V_k i filmu V_f w dowolnym przekroju aparatu jako:

$$V_k = \frac{d[f_1(t_k)]}{dt_k} \quad \text{oraz} \quad V_f = \frac{d[f_2(t_f)]}{dt_f} \quad (1), (2)$$

Badania przeprowadzono w modelowych płuczkach z gardzielami o średnicach 26, 50 i 70 mm oraz długością 500, 1000 i 1200 mm w zakresach:

- prędkości gazu $w_{og} = 20-50$ m/s oraz
- natężeń zraszania $N_z = 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ m³ cieczy/m³ gazu.

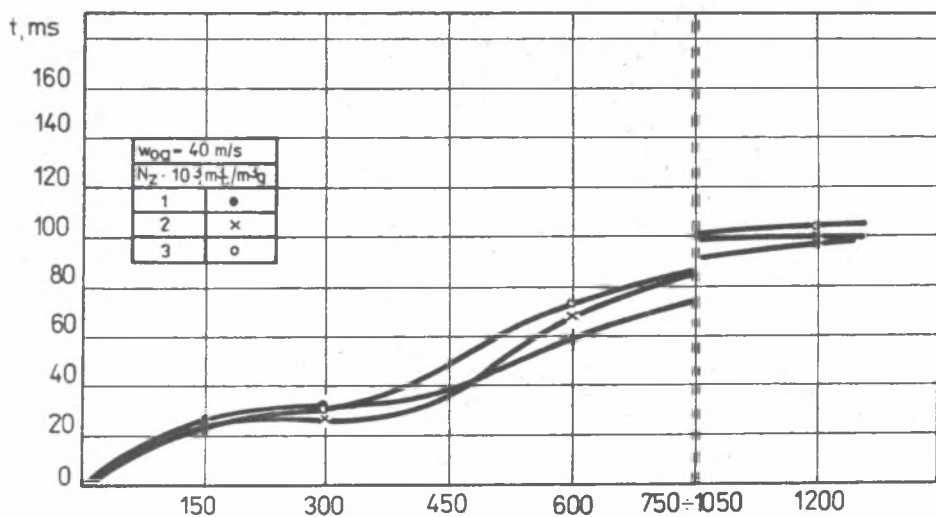
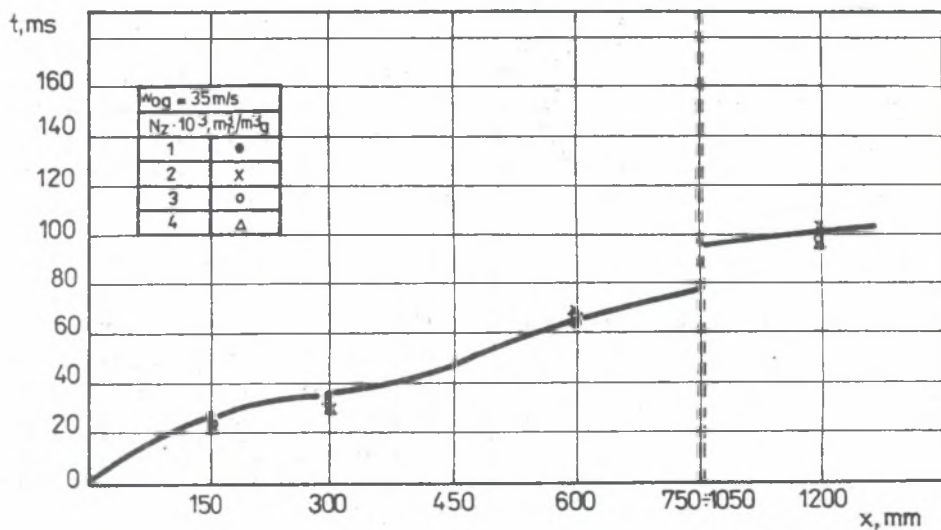
W sumie wykonano około 20000 jednostkowych pomiarów dla około 320 różnych wariantów wynikających z geometrii aparatu i hydrodynamiki przepływu.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Przykładowe przebiegi czasów przemieszczania się kropli cieczy w gardzieli doświadczalnej płuczki o średnicy 70 mm przedstawiono na rys. 3. Przebiegi analogicznych zależności dla pozostałych badanych średnic gardzieli miały podobny charakter.

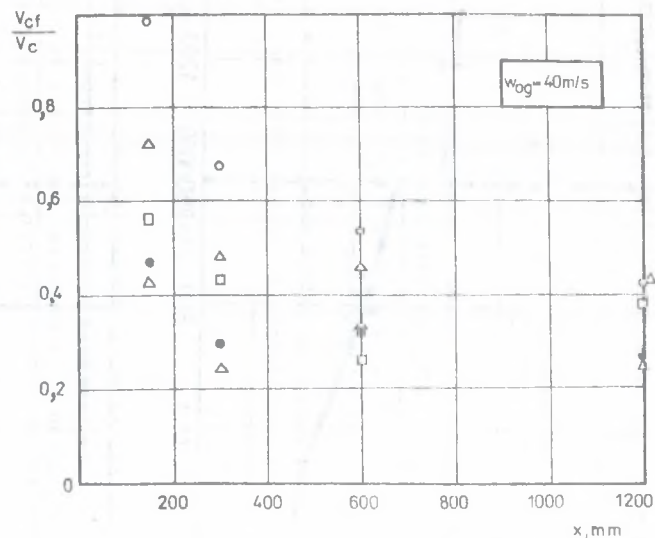
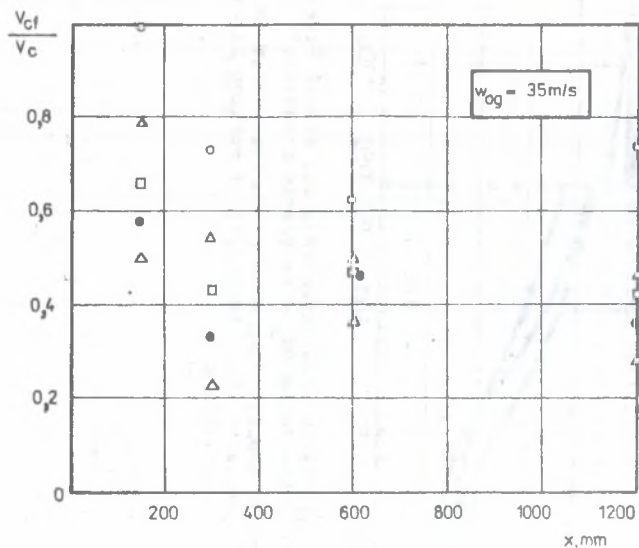
Znamienne przebiegi obserwowane na wszystkich wykresach sugeruje, że zbiór kropli w początkowej fazie ruchu jest silnie przyspieszony (co jest oczywiste wobec największych wówczas prędkości względnych gazu i kropli), a następnie jakby zmniejszał swą prędkość.

Przy dokładniejszym przeanalizowaniu zjawisk tworzenia się i ruchu kropli oraz filmu można sądzić, że głównym powodem tej charakterystycznej zmiany obrazu ruchu kropli jest zróżnicowanie ich pochodzenie, a więc również zróżnicowana ich prędkość. Dzieje się tak na skutek koalescencji części kropli na ściankach aparatu oraz wtórnego generowania kropli z powierzchni filmu. W bezpośrednim sąsiedztwie przekroju wprowadzania cieczy do strumienia gazu grubość filmu rośnie w miarę wzrostu odległości x . Gdy grubość filmu przekracza określoną wartość, równowaga pomiędzy siłami napięcia powierzchniowego a siłami aerodynamicznymi przesuwają się z obszaru intensywnej koalescencji w obszar intensywnego wtórnego rozpadu części cieczy znajdującej się w postaci filmu na krople. Krople te ponownie trafiają do strumienia gazu i stanowią tym samym część zdyspergowanej cieczy, jednakże posiadają one znacznie mniejszą energię kinetyczną, gdyż "startują" ze znacznie mniejszą prędkością równą prędkości filmu płynącego po ściankach aparatu. Ponieważ pomiar czasów międzyelektrodowych w omawianym eksperymencie ma charakter losowy, część uzyskiwanych wyników pochodziła z pewnością od kropli, które od chwili iniekcji cieczy nie zmieniły swojej formy występowania, zaś część kropli, które wcześniej jednokrotnie



Rys. 3. Przykładowe przebiegi czasów przemieszczania się kropli cieczy w gardzieli płuczki o średnicy 70 mm (N_z - natężenie zraszania)

Fig. 3. Typical dependences of droplet displacement in the throat of injection scrubber of 70 mm diameter (N_z - intensity of working liquid sprinkling)



d = 70 mm	
oznaczenie	$N_z [m^3/m^3]$
○	0.001
△	0.002
□	0.003
●	0.004
▲	0.005

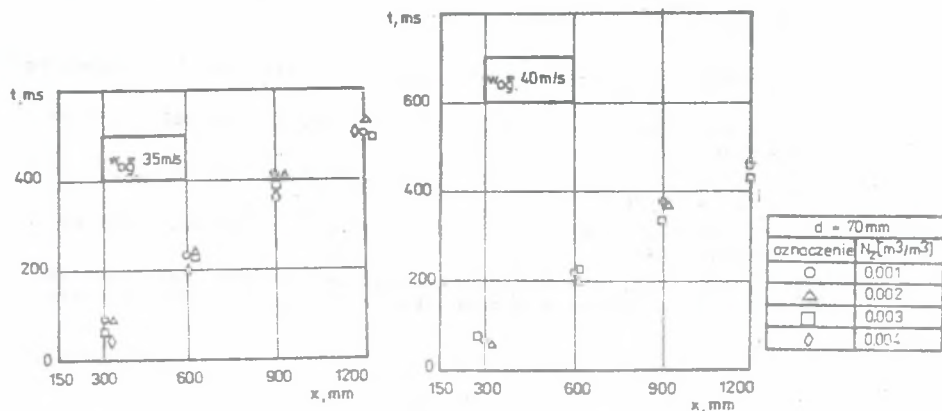
Rys. 4. Przykładowe przebiegi udziału filmu w strumieniu objętości cieczy w gardzieli płuczki o średnicy 70 mm (N_z - natężenie zraszania)

Fig. 4. Typical dependences of liquid film ratio in volume of liquid stream in the throat of injection scrubber of 70 mm diameter (N_z - intensity of sprinkling)

bądź wielokrotnie występowały w formie filmu. Tak więc dalsze części krzywych na rys. 3 występujące za charakterystycznymi przegięciami pozwalają określić średnie czasy ruchu kropeł o różnym pochodzeniu.

Tak postawione zagadnienie wydaje się zadowalająco dokładne z punktu widzenia projektowania procesów wymiany pędu, ciepła i masy, gdyż pozwala na symulację tych procesów opartą na lokalnych średnich wartościach takich parametrów jak średnia średnica oraz średnia prędkość względna kropeł.

Powyższą hipotezę mogły potwierdzić tylko badania filmu, a zwłaszcza zmienności jego udziału w ogólnym strumieniu objętości cieczy przepływającej w gardzieli płuczkki. Badania strumienia objętości cieczy przepływającej w postaci filmu (przeprowadzone metodą odsysania filmu przez porowatą ściankę) 4 wykazały, że przedstawione na rys. 3 charakterystyczne przegięcia pokrywają się z obszarem intensywnego generowania kropeł z filmu do strumienia gazu, o czym świadczy wyraźnie zmniejszający się w tym obszarze udział filmu w ogólnym strumieniu objętości cieczy (rys. 4). A zatem skoro istotną część kropeł cieczy przemieszczających się w strumieniu gazu stanowią krople nowo wygenerowane z filmu (o prędkościach znacznie niższych od prędkości kropeł powstałych bezpośrednio w wyniku iniekcji cieczy), to średnia prędkość całego zbioru kropeł o zróżnicowanym pochodzeniu może ulegać lokalnemu obniżeniu.



Rys. 5. Przykładowe przebiegi czasów przemieszczania się filmu cieczy po ściankach gardzieli płuczkki o średnicy 70 mm (N_z - natężenie zraszania)

Fig. 5. Typical dependence of liquid film displacement time on the wall of the scrubber throat

Istotne dodatkowe informacje uzyskano badając czasy przemieszczania się filmu (rys. 5). Stwierdzono, że maksymalna prędkość filmu (przy powierzchni międzyfazowej) w iniekcyjnej płuczce jest niemal niezależna od odległości x rozpatrywanego przekroju aparatu od przekroju iniekcji cieczy oraz

natężenia zraszania. Zależy ona natomiast praktycznie wyłącznie od prędkości przepływu gazu oraz średnicy gardzieli płuczki.

Wyniki tej części eksperymentu dowodzą, że ciecz w postaci filmu zachowuje się w iniekcyjnej płuczce zupełnie inaczej niż krople. Krople poruszają się bowiem wzdłuż gardzieli płuczki ruchem przyspieszonym, natomiast w przypadku filmu równowaga pomiędzy siłą tarcia gazu o ciecz a siłami tarcia filmu o ścianki, tarcia wewnątrz filmu (lepkość), bezwładności i grawitacji jest osiągnięta tuż za przekrojem iniekcji cieczy. Stąd film porusza się wzdłuż gardzieli płuczki ruchem jednostajnym poza bardzo krótką (o długości niemierzalnej w przeprowadzonym eksperymencie) strefą jego powstawania.

Badania wykazały ponadto, że przy przepływie pierścieniowo-dyspersyjnym z dołu ku górze w iniekcyjnej płuczce krople osiągają prędkość rzędu prędkości gazu, zaś film prędkości o rząd niższe.

W związku z tym wpływ filmu cieczy na procesy wymiany masy i ciepła w iniekcyjnych płuczках (zwłaszcza o niewielkich średnicach) może być istotny i winien znaleźć swoje odzwierciedlenie w projektowaniu tych aparatów.

Wyniki badań ruchu elementów cieczy wykorzystano m.in. przy weryfikacji matematycznego modelu przepływu pierścieniowo-dyspersyjnego w iniekcyjnych płuczках [4].

LITERATURA

- [1] Meloch H., Knop F., Ostropolski W.: Rap. Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocław. SPR nr 31/83 Wrocław 1983.
- [2] Meloch H. i in.: Rap. Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocław., SPR nr 64/84, Wrocław 1984.
- [3] Meloch H., Knop F.: Rap. Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocław., SPR nr 5/86, Wrocław 1986.
- [4] Meloch H. i in.: Rap. Inst. Inż. Ochr. Środow. Pol. Wrocław., SPR nr 67/87, Wrocław 1987.
- [5] Meloch H. i in.: Mat. III Ogólnopolskiego Seminarium "Zastosowanie Mechaniki Płynów w Ochronie Środowiska 88". Gliwice 1988 (maszynopis).

ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ И ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ИНЖЕКТОРНОМ СКРУББЕРЕ

Резюме

Представлено принцип действия инжекторного скруббера и существенные вопросы его проектирования. Описано выбранные результаты исследований движения капель и жидкой пленки в горловине скруббера а также явление обмена жидкости между жидкой пленкой и каплями.

INVESTIGATIONS OF DROPLETS AND LIQUID FILM MOVEMENT
IN HIGH-VELOCITY INJECTION SCRUBBER

S u m m a r y

The principle of injection scrubber performance has been presented. Some design problems have been discussed. Most important results of investigations of droplets and liquid film movement in the throat of the scrubber, and the phenomenon of liquid transfer between the droplet phase and the liquid film have been described.