

Krystyna JEŻOWIECKA-KABSCH

Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów  
Politechnika Wrocławska

## STRUGI PERIODYCZNE SPOSOBEM INTENSYFIKACJI PROCESÓW WENTYLACJI I OCZYSZCZANIA GAZÓW

Streszczenie. Przeanalizowano wytwarzanie i charakterystyki periodycznych strug pulsujących i oscylujących. Na podstawie badań doświadczalnych wykazano, że niskoczęstotliwościowe periodyczne wzbudzenia w zasadniczy sposób intensyfikują procesy turbulentnego transportu energii w początkowym stadium rozwoju strugi.

Omówiono możliwości zastosowania strug periodycznych w procesach wentylacji, koalescencji mgieł i oczyszczania powierzchni pokrytych pyłem.

### 1. WPROWADZENIE

Strugi turbulentne są przedmiotem zainteresowań zarówno teoretyków, jak i praktyków z następujących powodów:

- z jednej strony stanowią pewien podstawowy i prosty sposób generowania turbulencji,
- z drugiej zaś w praktyce występują w licznych urządzeniach i instalacjach przemysłowych (reaktorach, piecach, urządzeniach uzdatniających itp.).

Z tych względów prowadzone są liczne ich badania przy różnych konfiguracjach geometrycznych w rozmaitych warunkach kinematycznych i dynamicznych.

W wielu monografiach analizowana jest struktura strug turbulentnych:

- osiowosymetrycznych - płaskich,
- swobodnych - ograniczonych,
- z zawirowaniem lub bez,

przy czym nieliczne są opracowania dotyczące makro- i mikrostruktury strug, których warunki wypływu i przepływu są zmieniane periodycznie.

W praktyce jednak spotykamy się z urządzeniami, do których dopływ czynnika jest niestacjonarny, najczęściej periodyczny. Nawet jakościowe obserwacje zjawisk zachodzących w urządzeniach przemysłowych wykazują, iż niestacjonarność dopływu czynnika będąca wynikiem oddziaływań rucho-

wych części urządzeń (dozowniki, pompy) lub periodycznie przebiegających procesów (np. spalania) w istotny sposób może wpłynąć na dynamikę przepływu. Właściwe więc sterowanie takim procesem może intensyfikować lub hamować jego przebieg.

Zmieniając zatem warunki początkowe wypływu lub przepływu strugi poprzez podniesienie jej stopnia turbulencji lub nałożenie na nią periodycznego oddziaływania wymuszającego (poprzez impuls mechaniczny, akustyczny lub ewentualnie zawirowanie jej) można zmienić strukturę strugi, poszerzyć obszar dyfuzji, skrócić strefę początkową, wywołać lokalne przyrosty turbulencji, ciśnień lub koncentracji.

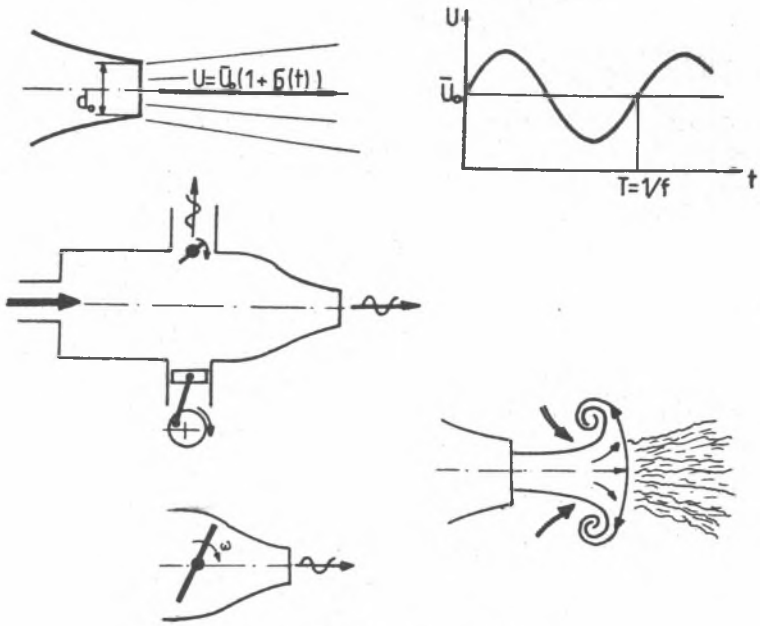
## 2. WYTWARZANIE I CHARAKTERYSTYKA STRUG PERIODYCZNYCH

Struga turbulentna może być poddana dodatkowemu oddziaływaniu wymuszającemu poprzez:

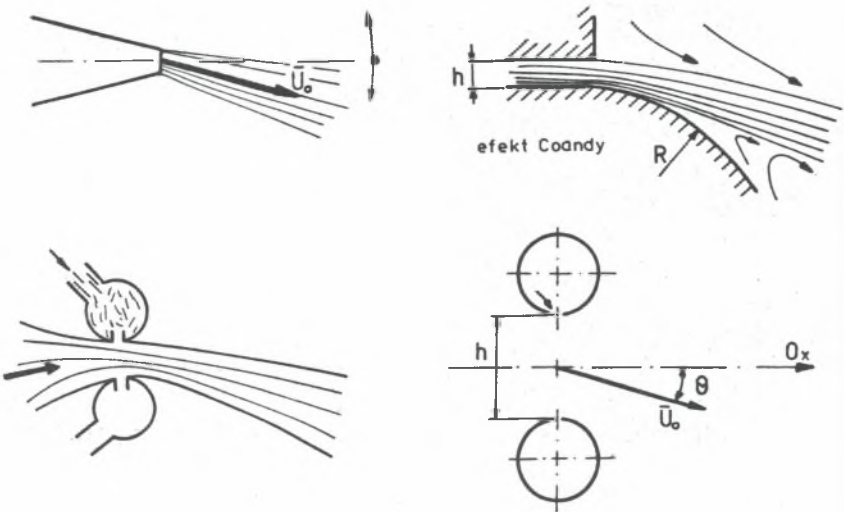
- pulsację (drogą periodycznych zaburzeń mechanicznych w przewodzie doprowadzającym czynnik) lub
- oscylację (poprzez nałożenie na wypływającą strugę periodycznego impulsu mechanicznego lub akustycznego).

Wprowadzenie tych oddziaływań generuje strugi niestacjonarne:

- pulsujące, charakteryzujące się stałym kierunkiem prędkości, której moduł zmienia się periodycznie w czasie, a prędkość oscyluje wokół wartości średniej  $U_0$ . Uzyskać je można poprzez zmianę objętości komory wylotowej (zastosowanie membran) lub przez umieszczenie w przewodzie obracającej się przysłony, której każdy obrót wywołuje dwukrotną pulsację strugi (rys. 1). Wizualizacja [1] wykazuje, że przepływ (strugę) pulsacyjny kształtują podmuchy wytwarzane przez pulsator, będące dużymi strukturami turbulentnymi, na froncie których obserwuje się zjawisko podobne do "punktu stagnacji" wywołujące rozproszenie wpływającego kłębu oraz lokalne przyrosty ciśnienia (rys. 1);
- oscylujące, o stałym module prędkości, a kierunku oscylującym periodycznie wokół położenia średniego; zasada wytwarzania takiej strugi oparta jest na efekcie Coandy. Wpływająca przez szczelinę o szerokości  $h$  płaska struga przylega do cylindrycznej powierzchni o promieniu  $R$  (przy cylindrycznym ukształtowaniu obu wylotów szczeliny przylega do jednej powierzchni). Nawiercenie dodatkowych otworów w wylotowej części szczeliny wpływającej i periodyczny nadmuch przez przeciwległe otwory zwiększa efekt Coandy i wywołuje ruch oscylacyjny strugi głównej (rys. 2). Oscylacja wpływającej strugi tworzy serię przemiennych dużych struktur wirowych, przemieszczających się w kierunku przepływu, których wymiar zależy w dużej mierze od chwilowego kąta oscylacji [2].



Rys. 1. Struga pulsująca  
Fig. 1. Pulsating jet



Rys. 2. Struga oscylująca  
Fig. 2. Flapping jet

### 3. ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ STRUG PERIODYCZNYCH

Szybkość rozprzestrzeniania się strugi turbulენტnej zależy zasadniczo [3] od dużych struktur wirowych, których skale znacznie przewyższają skale wirów niosących podstawową część energii fluktuacji. Duże struktury wirowe wywołują zakrzywienie powierzchni granicznej strugi, a tym samym powodują porywanie otaczającego ośrodka. Podczas wypływu dyssypacja energii związana jest zasadniczo ze strukturami drobnymi, natomiast naprężenia styczne wynikają z działania wielkich i średnich wirów. W zagadnieniach turbulencji swobodnej można wyróżnić zatem dwie struktury:

- podstawową strukturę turbulencji charakteryzującą się stosunkowo małą skalą i przenoszącą znaczną część energii oraz nałożoną na nią,
- strukturę powolnych dużych wirów, które wywołują przemieszczenie oraz porywanie cząstek otaczającego nieruchomego ośrodka.

Opierając się na przedstawionej podwójnej strukturze wypływu izotermicznej strugi, będącej wynikiem rozważań Landaua oraz badań eksperymentalnych jej mikrostruktury, można sądzić, iż przy wypływie periodycznym występuje wzmocnienie dużych struktur wirowych wywołujących zwiększenie naprężeń stycznych. Intensywność przebiegu tych zjawisk i wzajemne współzależności między nimi w istotny sposób mogą wpłynąć na szybkość rozprzestrzeniania się strugi. Szybkość ta uzależniona jest od grubości periodycznej warstwy przyściennej, która związana jest ściśle z gradientem prędkości w kierunku poprzecznym do ruchu.

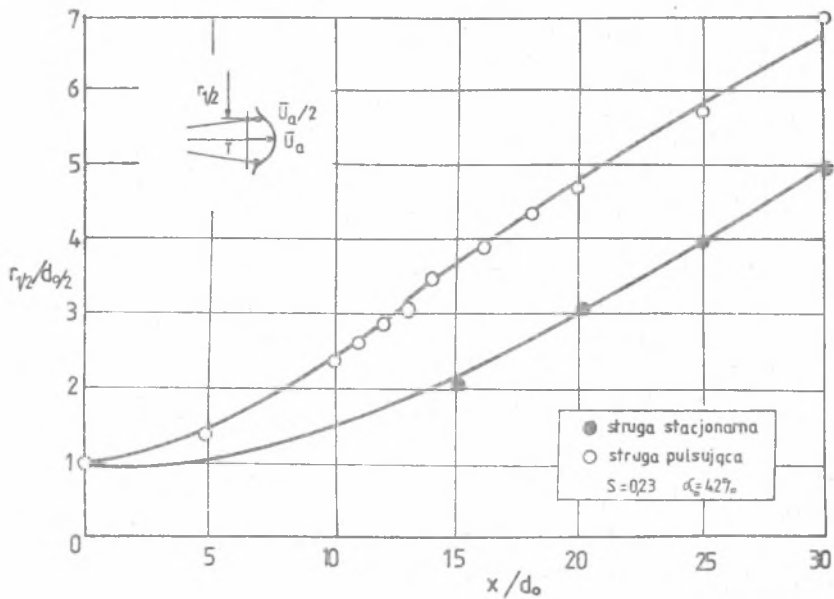
Z fizycznego punktu widzenia przy przepływie periodycznym, który może być traktowany jako efekt superpozycji wirów, zachodzące zjawiska przemiany energii są efektem wzajemnych oddziaływań między tymi wirami. Należy sądzić, że energia ruchu periodycznego może być przyswajana przez duże struktury wirowe, jeśli ich skale są tego samego rzędu. Może prowadzić to do powstania "rezonansu turbulენტnego" będącego źródłem podniesienia stopnia turbulencji [4].

Badania doświadczalne rozprzestrzeniania się strug periodycznych: pulsujących i oscylujących przeprowadzono w Instytucie Mechaniki w Grenoble.

Strugi periodyczne charakteryzują następujące zasadnicze parametry:

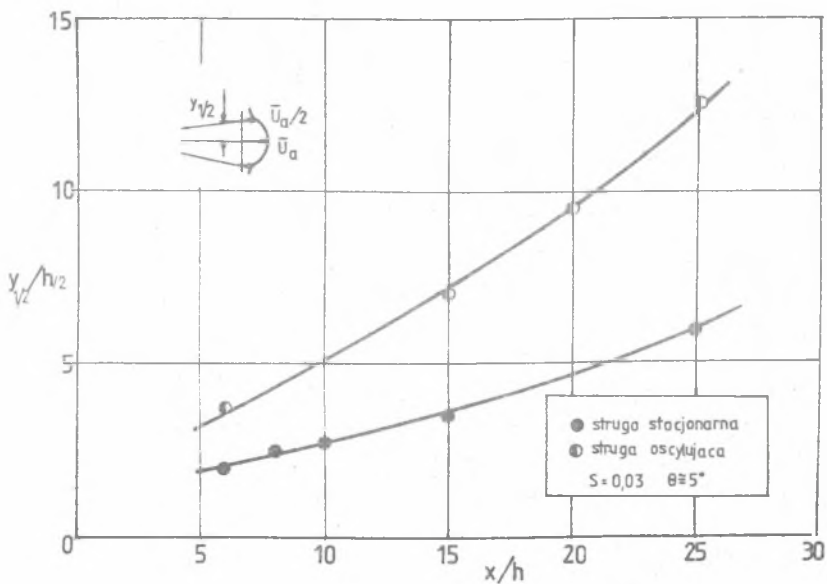
- liczba Strouhala  $S = fh/\bar{U}_0$ , będąca parametrem jednoznacznie określonym zależnym od częstotliwości zaburzenia periodycznego  $f$ , wymiaru charakterystycznego dyszy  $h$  lub  $d$  oraz średniej prędkości wypływu  $\bar{U}_0$ ,
- amplituda początkowa pulsacji  $\alpha_0 = \sqrt{u_0^2/\bar{U}_0}$ , stanowiąca miarę intensywności fluktuacji periodycznych w przekroju wypływowym,
- kąt oscylacji  $\theta$  będący amplitudą ruchu (rys. 2), który przy pominięciu fluktuacji turbulენტnych jest funkcją okresową czasu.

Przeprowadzone badania turbulენტnych strug pulsujących [5] i oscylujących [4, 5, 6] wykazują, że ich ekspansja jest szybsza od ekspansji strug stacjonarnych, tj. strug bez dodatkowego oddziaływania wymuszającego



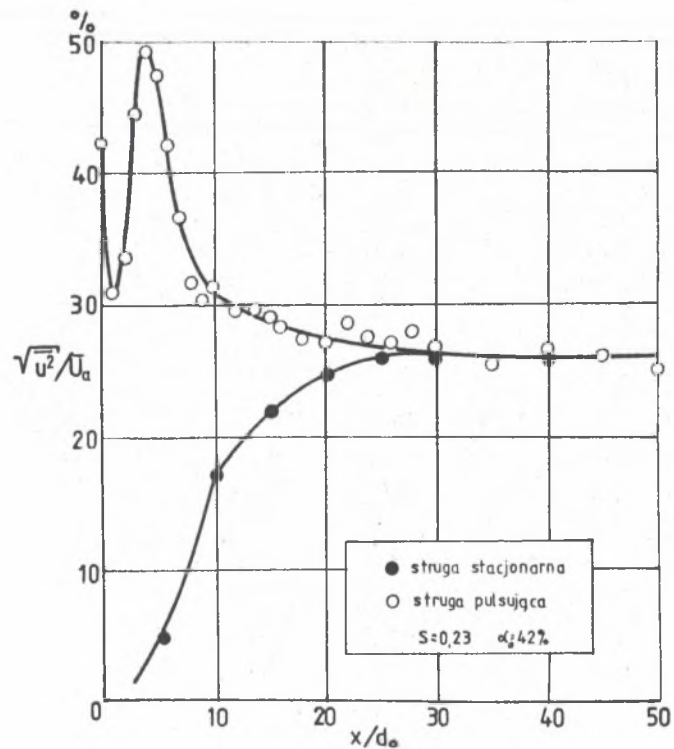
Rys. 3. Ekspansja strugi osiowosymetrycznej wg [5]

Fig. 3. Expansion of axisymmetric jet [5]



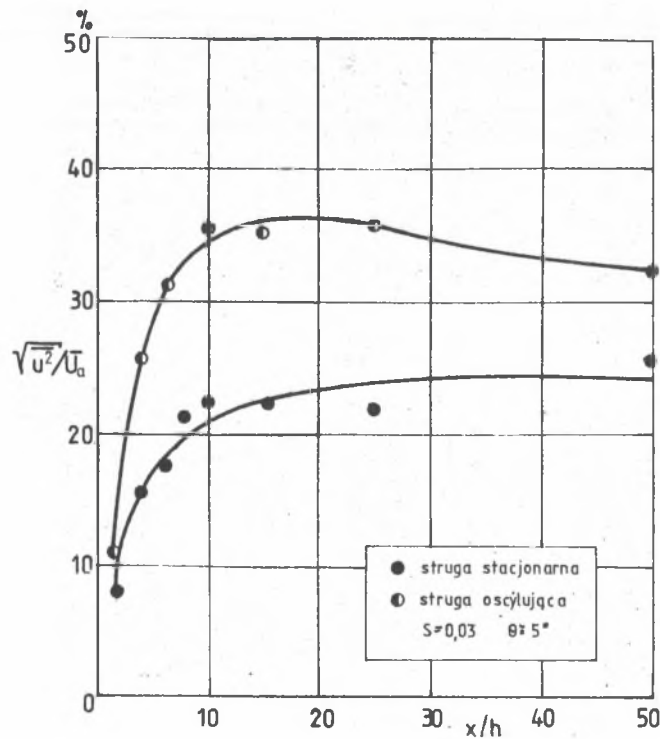
Rys. 4. Ekspansja strugi p\u0142askiej wg [4]

Fig. 4. Expansion of two-dimensional jet [4]



Rys. 5. Zmiana intensywności fluktuacji wzdłuż osi strugi osiowoosymetrycznej wg [5]

Fig. 5. Change of fluctuation intensity along axisymmetric axis jet [5]



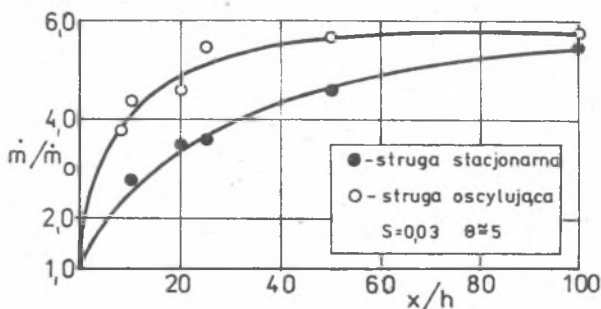
Rys. 6. Zmiana intensywności fluktuacji wzdłuż osi strugi płaskiej wg [6]

Fig. 6. Change of fluctuation intensity along two-dimensional axis jet [6]

(rys. 3 i 4); obserwuje się to już w bezpośrednim sąsiedztwie wylotu z dyszy, gdzie oddziaływanie periodyczne jest znaczne.

Istniejącym wewnątrz tej strefy znacznym gradientom prędkości średniej towarzyszy wyraźna intensyfikacja procesów turbulentnego transportu masy i pędu, związana z lokalnymi przyrostami stopnia turbulencji strugi (rys. 5 i 6). Periodyczne oddziaływania wymuszające wpływają na strukturę fluktuacji turbulentnych, przy czym ich aktywne oddziaływanie na charakter przepływu w strudze ogranicza się do odległości  $x < 10 h$  (lub  $d$ ), ale skutki tego oddziaływania widoczne są również w dalej położonych obszarach strugi.

W strugach niestacjonarnych obserwuje się ponadto bardziej intensywny wzrost strumienia masy zasysanej z otoczenia (rys. 7) wskutek iniekcyjnego oddziaływania wypływającego z dyszy czynnika [4].



Rys. 7. Ewolucja strumienia masy w płaskiej strudze stacjonarnej i oscylującej wg [4]

Fig. 7. Evolution of mass flow along the axis jet (steady and flapping jet)

Należy podkreślić, iż w aspekcie zastosowań praktycznych interesuje nas przede wszystkim struktura globalna strug periodycznych; oddziaływania wymuszające traktujemy więc jako oddziaływania wpływające na warunki początkowe wypływu strug turbulentnych (bez wnikania w ich strukturę chwilową), które wpływają na wzrost poprzecznych rozmiarów strugi, jak i strumienia masy płynu zasysanego z otoczenia.

#### 4. ZASTOSOWANIE STRUG PERIODYCZNYCH W PROCESACH WENTYLACJI I OCZYSZCZANIA GAZÓW

##### 4.1. Procesy wentylacji

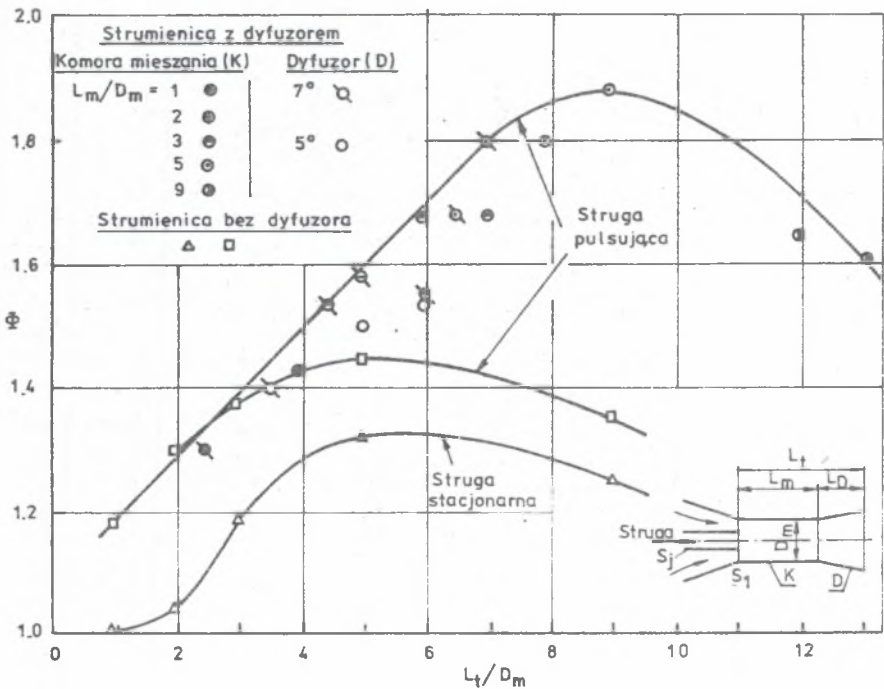
Osiągnięcie odpowiedniej skuteczności wentylacji i obróbki powietrza (np. w klimakonwektorach) uzależnione jest w dużej mierze od stworzenia optymalnego w danych warunkach pola prędkości średnich i fluktuacyjnych. Jednym ze sposobów świadomej ingerencji w strukturę tych pól może być



zastosowanie strug periodycznych w miejsce tradycyjnie stosowanych strumieni stacjonarnych.

Zastąpienie np. płaskiej stacjonarnej nieograniczonej strugi turbulenta strugą oscylującą o niskoczęstotliwościowym wzbudzeniu skraca znacznie obszar jej zmieszania (rys. 7); proces ten można uznać za zakończony już w odległości 50 h stanowiącej połowę tej odległości dla wypływu stacjonarnego. Istnieje zatem możliwość zastąpienia tradycyjnego stacjonarnego nawiewu szczelinami płaskimi (szczególnie w wentylacji przemysłowej) strugami oscylującymi.

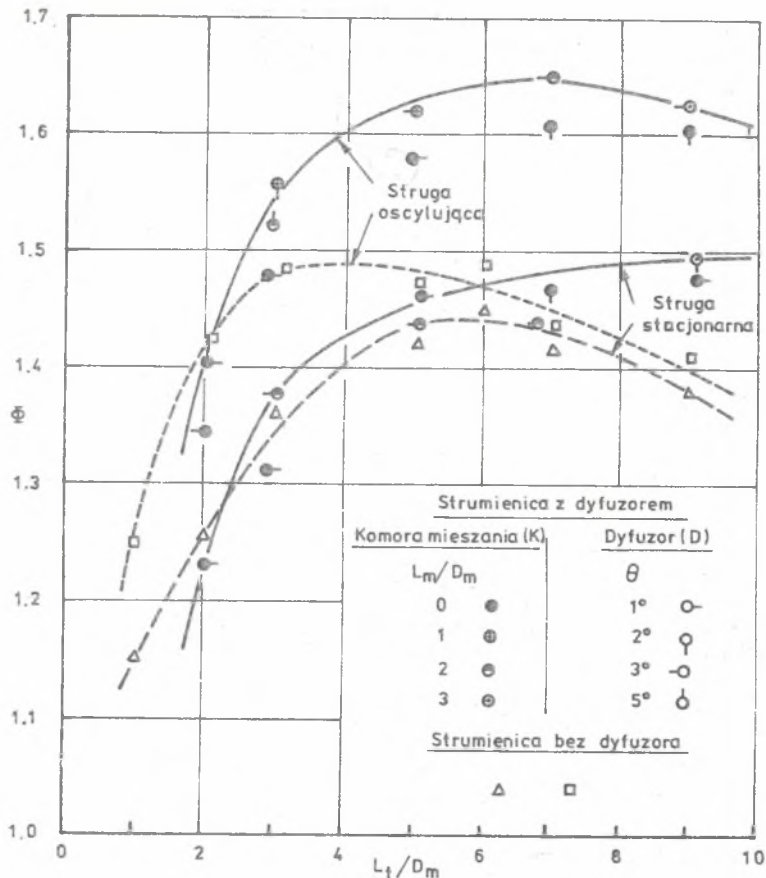
Również w strumienicach [7] zastąpienie tradycyjnego wypływu z dyszy roboczej strugą niestacjonarną (pulsującą lub oscylującą) znakomicie intensyfikuje proces mieszania. W strumieniach o zasilaniu periodycznym (rys. 8, 9) uzyskuje się istotny przyrost ciśnienia przy minimalizacji ich długości ( $\Phi$  jest współczynnikiem zwiększenia ciśnienia będącym stosunkiem ciśnień: za dyfuzorem i u wylotu dyszy zasilającej). Cytowane wyniki badań wykazują, iż:



Rys. 8. Przyrost ciśnienia wzdłuż strumienicy zasilanej strugą stacjonarną i pulsującą (strumienica osiowoosymetryczna  $S_j/S_1 = 9,15$ ) wg [8]

Fig. 8. Pressure augmentations along ejector vs total length with steady and pulsating jet (axisymmetric ejector  $S_j/S_1 = 9,15$ ) [8]





Rys. 9. Przyrost ciśnienia wzdłuż strumienicy zasilanej strugą stacjonarną i oscylującą (strumienica płaska  $S_j/S_1 = 20$ ) wg [8]

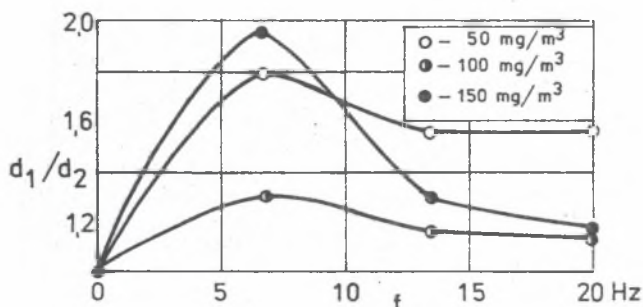
Fig. 9. Pressure augmentations along ejector vs total length with steady and flapping jet (two-dimensional ejector  $S_j/S_1 = 20$ ) [8]

- w strumienicy bez dyfuzora pulsacja i oscylacja strugi zasilającej zwiększa przyrost ciśnienia w komorze mieszania w stosunku do wypływu stacjonarnego,
- w strumienicach z dyfuzorem osiąga się znaczny przyrost ciśnienia wynoszący 1,65 przy oscylującym wypływie strugi zasilającej, a sięgający nawet 1,9 przy wypływie pulsującym, podczas gdy przy stacjonarnym (tradycyjnym) zaledwie ok. 1,3.

Pulsacja i oscylacja strugi zasilającej intensyfikuje zatem proces mieszania (szybsza dyfuzja, wyższy poziom turbulencji), pozwala skrócić komorę mieszania, a ponadto zwiększa skuteczność działania dyfuzora; prowadzi to do dwukrotnego skrócenia całej strumienicy.

#### 4.2. Procesy koalescencji mgieł i koagulacji pyłów

Podwyższenie skuteczności procesów separacji mgły olejowej lub mgieł innych cieczy może być dokonane poprzez zintensyfikowanie procesów koalescencji drobnych jej cząstek. Jednym ze sposobów tej intensyfikacji może być wprowadzenie cząstek mgły w periodyczną strugę powietrzną, co wywołuje podniesienie turbulencji ośrodka rozpraszającego. Dzięki temu w rozproszonym ośrodku pojawiają się siły skierowujące lekkie cząstki w ślad aerodynamiczny cząstek cięższych, co w efekcie prowadzi do intensyfikacji koalescencji w porównaniu z zagadnieniem stacjonarnym. Przeprowadzone eksperymenty [8] jakościowego wpływu fluktuacji turbulencyjnych, wywołanych pulsacją dwufazowej strugi, złożonej z powietrza oraz cząstek mgły olejowej na względną zmianę wielkości cząstek (dla wybranego najkorzystniejszego rozwiązania konstrukcyjnego) wskazują, iż w zakresie badanych koncentracji aerozolu, przy niskich częstotliwościach pulsacji (5-10 Hz) obserwuje się nawet dwukrotne zwiększenie średnicy cząstek mgły olejowej (rys. 10).



Rys. 10. Zależność względnej średniej wielkości cząstek mgły olejowej od częstotliwości pulsacji dla różnych koncentracji wg [9]

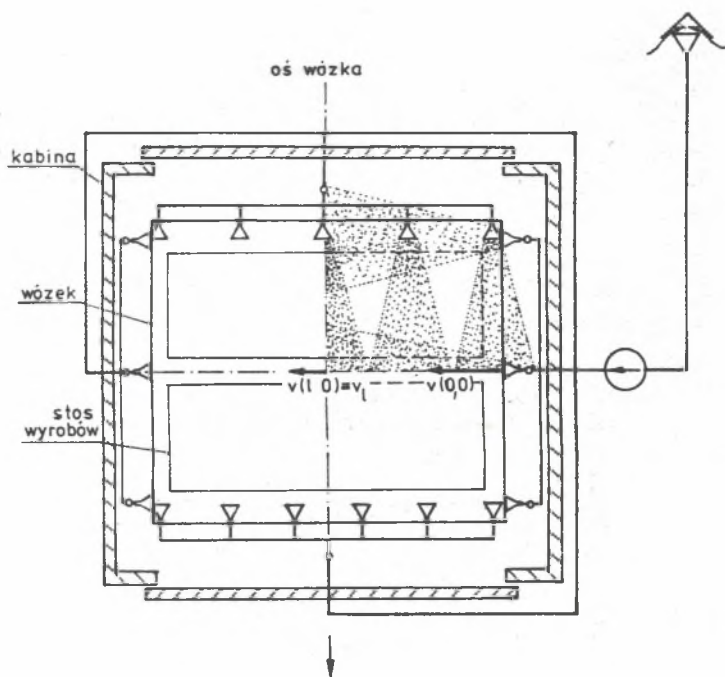
Fig. 10. Relative changes in mean size of particles (oil mist) vs. gas flux pulsation frequency for different concentrations [9]

Istnieje prawdopodobieństwo, iż w podobny sposób jak koalescencja mgieł może przebiegać koagulacja pyłów i prowadzić do wzrostu skuteczności odpylania.

#### 4.3. Procesy oczyszczania powierzchni pokrytych pyłem

Stosowane w wentylacji przemysłowej procesy oczyszczania powierzchni polegają na poderwaniu cząstek zalegającego pyłu strugą powietrza skierowaną ku danej powierzchni. Skuteczność tego procesu zależy przede wszystkim od miejscowej a nawet chwilowej prędkości przepływu powietrza (podmuchu), która nie może być mniejsza od prędkości skutecznej, tj.

prędkości zapewniającej uniesienie zalegającego pyłu. Dobór i odpowiednie rozmieszczenie dysz nawiewnych, ilości zdmuchującego powietrza oraz odpowiednie prowadzenie procesu istotnie wpływa na skuteczność oczyszczania powierzchni. Obserwacje odpopielenia wózków z wyrobami ceramicznymi [9] w istniejących kabinach do odpopielenia wykazują, iż mimo znacznych prędkości wypływu  $v(0,0)$  i zapewnienia w osi wózka prędkości  $v(1,0) \equiv v_1$  zapewniającej poderwanie cząstek pyłu, wypływające z dysz nawiewnych strugi nie oddziałują na całą powierzchnię stosu wyrobów (rys. 11).



Rys. 11. Zasięg oddziaływania strug stacjonarnych na oczyszczane powierzchnie wg [10]

Fig. 11. The range of steady jet area influence on cleaned surfaces [10]

Zastąpienie strug stacjonarnych szybciej ekspandującymi strugami periodycznymi umożliwiłoby rozszerzenie obszaru oczyszczania powierzchni wiążące się z 1,5-2-krotnym wzrostem kąta efektywnego oddziaływania strugi (rys. 3 i 4). Ponadto w celu uzyskania tej samej co w strudze stacjonarnej prędkości skutecznej możliwe byłoby obniżenie średniej prędkości  $v(0,0)$  wypływu z dyszy (a zatem i natężenia wypływu), gdyż nałożone na wypływającą strugę wymuszenie periodyczne wywołuje chwilowe przyrosty prędkości miejscowej, intensywności turbulencji i ciśnień.

Wprowadzenie zatem strug periodycznych umożliwiającym przy tym samym wymiarze dysz powiększenie obszaru ich oddziaływania wiąże się ponadto z obniżeniem ilości nawiewanego powietrza, co obniża koszty eksploatacyjne systemu oczyszczania powierzchni.

## 5. PODSUMOWANIE

Omówione sposoby intensyfikacji turbulentnego transportu energii w początkowym stadium rozwoju strugi poprzez wytworzenie strug periodycznych oraz wskazane możliwości zastosowania tych strug w zagadnieniach związanych z ochroną środowiska stanowią pewien kierunek działań zmierzających do poprawy sprawności energetycznej systemów wentylacyjnych i oczyszczania gazów.

Odpowiednie wykorzystanie w technice inżynierskiej wyników badań doświadczalnych stanowić może jedną z dróg podniesienia skuteczności wielu procesów inżynierii środowiska, a także obniżenia ich kosztów.

## LITERATURA

- [1] Girard J.Ph., Curtet R.: Jets instationnaires-Visualisation des jets pulsés - Rapport DRME - Convention DRME 71/575 - 1973.
- [2] Paturel R.: Etude de jets battants par visualisation - Thèse de Docteur de Spécialité, IMG, 1975.
- [3] Townsend A.A.: The structure of turbulent shear flow, Cambridge, University Press (1956), tłumaczenie na j.rosyjski: Struktura turbulentnego potoku s poperecznym sdwigom, Izd. Inostr. Lit., Moskwa 1959.
- [4] Jeżowiecka-Kabsch K.: Badania obszaru mieszania nieograniczonych turbulentnych strumieni oscylujących, Raport ITCiMP PWR SPR nr 28/80. Wrocław 1980 (niepublikowana).
- [5] Favre-Marinet M.: Structure des jets pulsants, Thèse de Docteur-Ingénieur, IMG, 1975.
- [6] Soutif M.: Diffusion et structure périodique des jets battants, Thèse de Docteur de Spécialité, IMG, 1977.
- [7] Jeżowiecka-Kabsch K.: Wpływ warunków początkowych na parametry ruchu średniego i fluktuacyjnego turbulentnej płaskiej strugi swobodnej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa 3, 2, 1982, s. 323-342.
- [8] Binder G., Didelle H.: Improvement of ejector thrust augmentation by pulsating or flapping jet, 2 nd Symposium on Jet Pumps & Ejectors and Gas Lift Techniques, 1975, E-2 15-26.
- [9] Jeżowiecka-Kabsch K., Meloch H., Zalewski H.: Ccalescence of oil mist droplets in non-stationary air flux, Environment Protection Engineering Vol. 10, No. 1, 1984, s. 21-30.
- [10] Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H., Kabsch P.: Badania oraz model przepływu powietrza w kabinach do odpopielania wózków piecowych, Raport ITCiMP PWR SPR nr 50/84 Wrocław 1984. (niepublikowana).

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ВЕНТИЛЯЦИИ И ОЧИСТКИ ГАЗОВ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУЙ

Р е з ю м е

Проанализована продукция и характеристика периодических пульсационных и колебательных струй. На базе экспериментов проявлено, что низкочастотные периодические возбуждения интенсифицируют процессы турбулентного транспорта энергии в начальном участке струи.

Обсуждены возможности использования периодических струй в процессах вентиляции, коалесценции туманов и очистки площадей покрытых пылью.

INTENSIFICATION OF VENTILATION AND GASS CLEANING  
PROCESSES USING PERIODIC JET

S u m m a r y

The generation and characteristic of periodic pulsating and flapping jet was analysed. Basing on experiments it was proved that low-frequency periodic forces action intensify transport of energy in initial region of jet.

The possibility of periodic jet application in ventilation, coalescence of mist and cleaning of surfaces covered by industrial dusts were discussed.