

Prikazana metoda se lahko uporabi za izračun poljubnih prostorskih modelov.

Z vpeljavo pomembnejših fizikalnih modelov in zgotovitvijo mreže lahko izboljšamo rezultate, za kar pa so potrebni zmogljivejši računalniki.

LITERATURA

[1] A. Lipej, Numerical Solution of Three-dimensional Potential Flow in Draft Tube. Proc. of the Eight Conference on Fluid Machinery, Akademiai Kiado, Budapest, (1987), 434-440.

[2] B. Velenšek, Theoretical Optimization and Development of Bulb and Kaplan Turbine Runners. Conference Waterpower 87, Portland Or., ASCE, (1987).

UDK 532.529.6

Kaotične lastnosti v pulzirajočem dvofaznem toku trdi delci — plin

BRANE ŠIROK — IGOR GRABEC

Uvod

V zadnjih desetletjih so raziskave pokazale, da se lahko tako preprosti kakor kompleksni sistemi obnašajo kaotično [1] in lahko pričakujemo razvoj kaosa tudi v disipativnih sistemih, kakršno je turbulentno gibanje fluida. Pri raziskavah turbulentnih tokov je bilo ugotovljeno, da jih je mogoče opisati podobno kakor nizkodimenzionalne nelinearne dinamične sisteme, ki kažejo kaotično obnašanje. Kot značilni primer lahko navedemo pulzirajoči zračni curek [2] ali tok fluida med koncentričnima valjema [3]. Iz omenjene podobnosti lahko natančno opišemo turbulentni tok s časovnimi posnetki na različnih mestih, kar nas vodi v večdimenzionalni prostor stanj [4]. Na raznih nizkodimenzionalnih sistemih je bilo ugotovljeno [4], da se gibljejo trajektorije sistema v faznem prostoru po specifično omejenih formah — atraktorjih. Osnovni podatek o atraktorju podaja fraktalna dimenzija [5]. Presenetljivo je, da pripada nekaterim značilno turbulentnim pojavom nizka fraktalna dimenzija atraktorja, kljub temu, da sistem ni nizkodimenzionalen. Zato lahko sklepamo, da bi bilo mogoče opisati ustrezne pojave z majhnim številom spremenljivk, kar je zanimivo za praktično uporabo.

Namen našega članka je pokazati, da lahko do podobnih sklepov pridemo tudi pri opazovanju dvofaznih tokov. S tem namenom predstavljamo osnovne lastnosti dvofaznega toka trdi delci — plin v vodoravni cevi. Kot reprezentativno fizikalno spremenljivko uporabimo prostorninsko koncentracijo trdnih delcev. Turbulentni tok natančno opišemo s spektri fluktuacij, faznimi portreti atraktorja in dimenzionalnostjo, ocenjeno s korelacijskim eksponentom.

[3] Chung T. J., Finite Element Analysis in Fluid Dynamics. McGraw Hill Book Company, New York, (1978).

[4] K. Rektorys, Variational Methods in Mathematics, Science and Engineering. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, (1980).

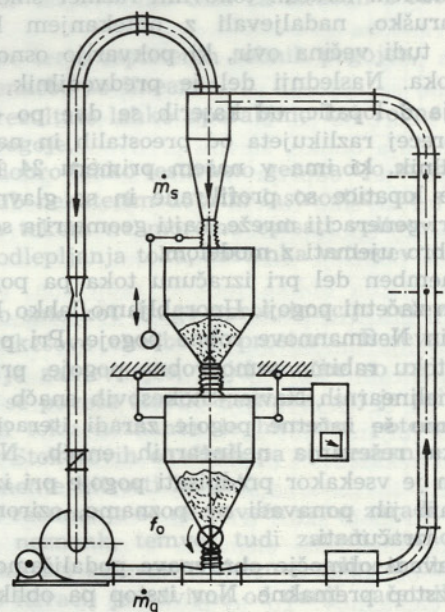
[5] C. Taylor, Finite Element Programming in Fluids. Pine-ridge Press, Swansea, (1981).

[6] B. Velenšek, A. Lipej, V. Vujanič, S. Cizl, Cevne Turbine — Teoretične in eksperimentalne raziskave. RSS — URP poročilo za leto 1986.

Naslovi avtorjev: Andrej Lipej dipl. inž.,
Dragica Jošt dipl. inž.,
Stanka Ulčar dipl. inž.,
prof. dr. Boris Velenšek dipl. inž.,
Turboinštitut, Ljubljana

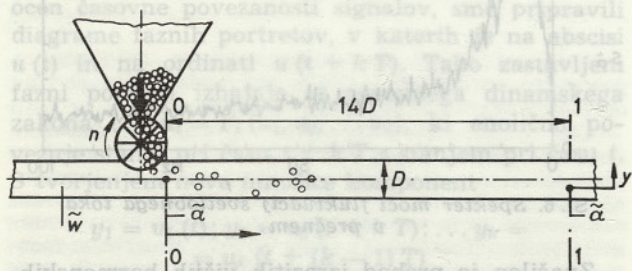
Eksperiment

Za transport sipkega materiala v plinastem mediju v poljubnem elementu pnevmatskega transporta so pomembne tri osnovne karakteristične spremenljivke: masni pretok plina, masni pretok trdnih delcev in prostorninska koncentracija delcev. Na sliki 1 je prikazana eksperimentalna postaja za pnevmatski transport v Turboinštitutu. Postaja omogoča transportiranje trdnih delcev v zračnem toku pri zvezno nastavljenih karakterističnih spremenljivkah.



Sl. 1. Eksperimentalna postaja

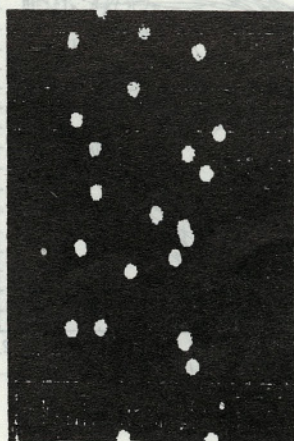
Osnovni eksperimentalni sistem, ki predstavlja del postaje za pnevmatski transport, je prikazan na sliki 2. Zračni tok je bil generiran z radialnim ventilatorjem. Vrtilna hitrost rotorja ventilatorja je 53 vrt./s. Trdni delci valjaste oblike ($d = 2,5 \text{ mm}$, $l = 3 \text{ mm}$, z maso $m = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$) so vstopali v



Sl. 2. Osnovni eksperimentalni sistem

zračni tok s periodičnim vsipanjem iz volumetriškega dozirnika s frekvenco $f_0 = 3,75 \text{ Hz}$. Pred vstopom trdnih delcev v zračni tok so bile merjene hitrostne fluktuacije nosilnega medija. Uporabljena je bila enokomponentna metoda merjenja hitrosti »hot-wire« v zračnem toku. Sonda s segreto žičko je bila nameščena v osi cevovoda. Na razdalji $l = 14D$ od mesta vsipanja je bil postavljen optični sistem za merjenje fluktuacij prostorske koncentracije z možnostjo navpičnega pomikanja kontrolnega segmenta.

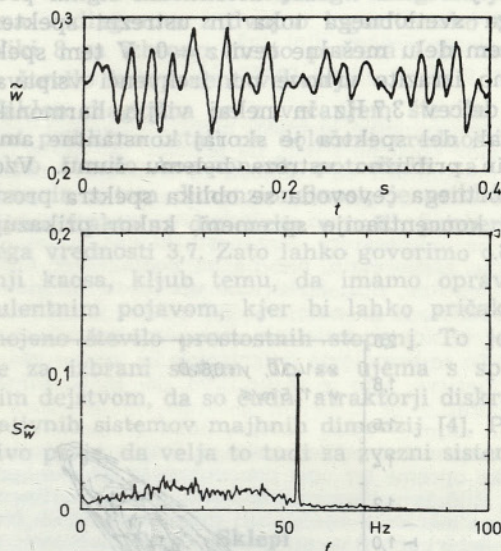
Pri nizki koncentraciji delcev v zračnem toku je zmanjšanje prepuščenega svetlobnega toka zaradi zasenčitve sorazmerno s koncentracijo delcev. Zato je relativna sprememba prostorske koncentracije v opazovanem segmentu ocenjena z relativno spremembo svetlobnega toka. Navedeno odvisnost lahko ocenimo iz fotografskih posnetkov gibanja delcev v cevovodu pri omenjenih obratovalnih režimih slika 3. Delamo z razmeroma redkim tokom in zato je verjetnost zasenčitve posameznih delcev majhna.



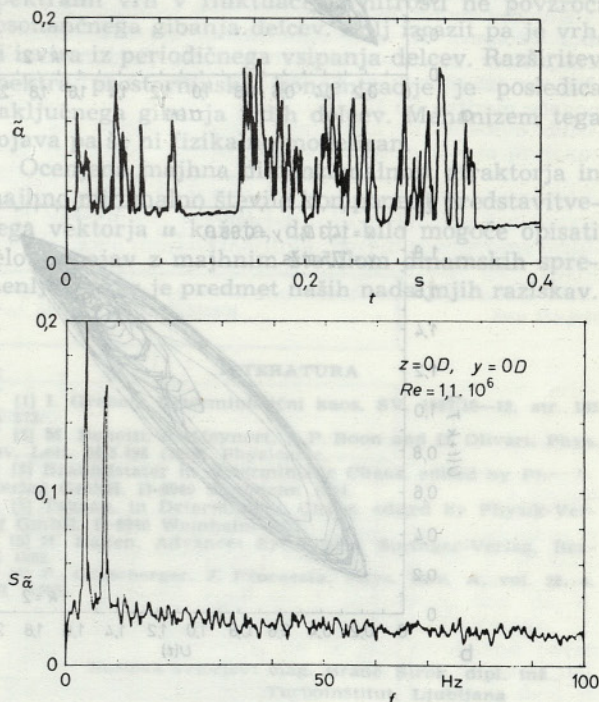
Sl. 3. Tok trdnih delcev v zračnem toku

Eksperimentalna analiza

Namen eksperimentalne analize je bil ustvariti empirično podlago za opis kinematike turbulentnega toka trdnih delcev v cevovodu. Značilne časovne serije hitrostnih signalov in pripadajoči močnosni spekter so prikazani na sliki 4. Spekter hitrostnih fluktuacij na mestu pred vsipanjem je sestavljen iz dveh značilnih delov.

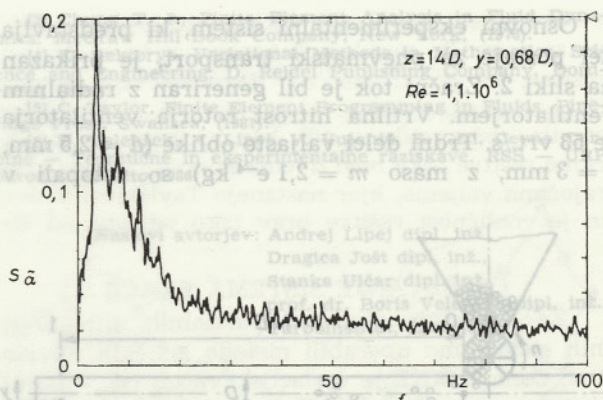


Sl. 4. Spekter moči hitrostnih fluktuacij w pred vsipnim lijakom



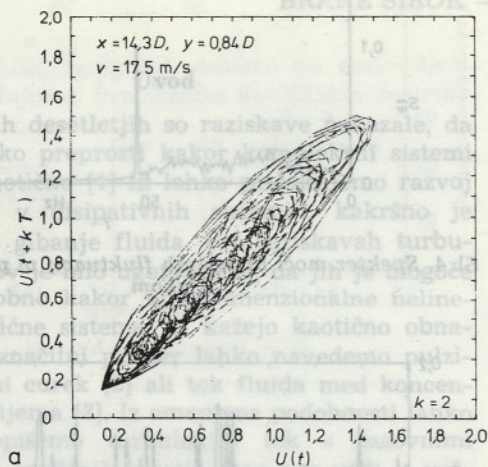
Sl. 5. Časovna vrsta in spekter moči fluktuacij svetlobnega toka v mešalnem področju $z = 0$

Prvi, ki ga predstavlja ozek spektralni vrh, je posledica vrtenja rotorja ventilatorja s konstantno frekvenco, drugi širokopasovni del pa je posledica turbulentnega toka. V področju dvofaznega toka hitrostne fluktuacije niso bile detektirane zaradi možnosti poškodbe anemometra z naletom trdih delcev. Izmerjene pa so bile fluktuacije svetlobnega toka, ki so bile v opazovanem eksperimentu proporcionalne fluktuacijam prostorninske koncentracije. Slika 5 kaže detektirani signal prepuščenega svetlobnega toka in ustrezeni spekter v začetnem delu mešalne cevi $z = 0$. V tem spektru opazimo izrazite vrhove pri frekvenci vsipavanja trdih delcev 3,7 Hz in nekaj višjih harmonikov. Preostali del spektra je skoraj konstantne amplitude in približno ustreza belemu šumu. Vzdolž transportnega cevovoda se oblika spektra prostorninske koncentracije spremeni, kakor prikazujejo slike 6.

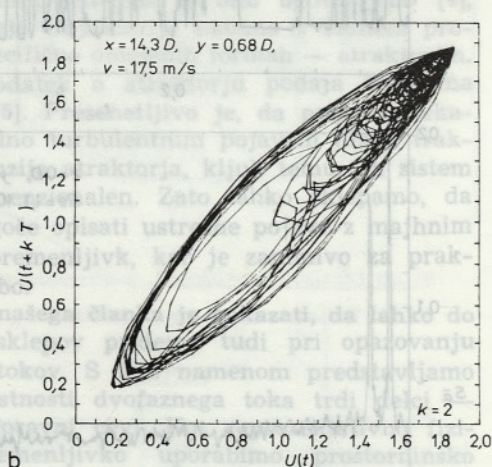


Sl. 6. Spekter moči fluktuacij svetlobnega toka v prečnem

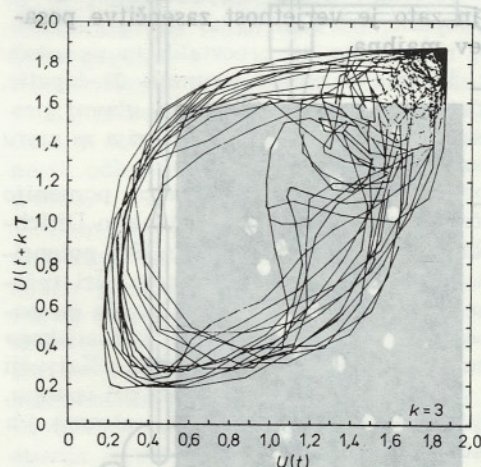
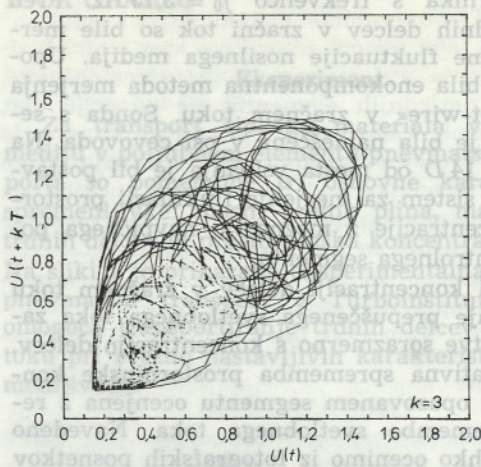
Značilen je prehod izrazitih višjih harmonskih vrhov v širokopasovni del spektra. Pri tem se spektralni maksimum pri frekvenci vsipavanja še



a



b



Sl. 7. Fazni portreti fluktuacij svetlobnega toka v različnih legah v opazovanem prerezu

vedno ohrani ne glede na ordinato preseka. Primerjava s časovno serijo oziroma spektrom hitrostnih fluktuacij kaže, da se vpliv periodičnih hitrostnih fluktuacij, povzročenih z gibanjem rotorja, ne prenaša na fluktuacije prostorninske koncentracije.

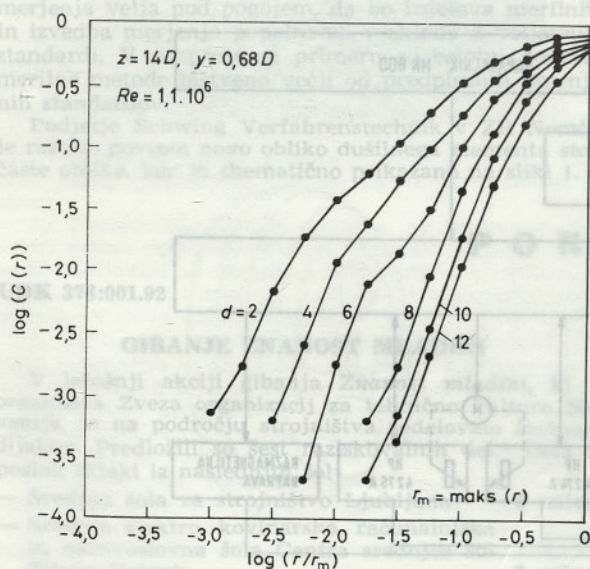
Z namenom, da bi dobili nekaj kvalitativnih ocen časovne povezanosti signalov, smo pripravili diagrame faznih portretov, v katerih je na abscisi $u(t)$ in na ordinati $u(t + kT)$. Tako zastavljeni fazni portreti izhajajo iz osnovnega dinamskega zakona (1) $u_i = F_i(u_1, u_2, \dots, u_k)$, ki enolično povezuje stanje pri času $t + kT$ s stanjem pri času t . S tvorjenjem nove množice komponent

$$y_1 = u_1(t); y_2 = u_2(t + kT); \dots y_k = u_k(t + (k-1)T)$$

lahko sklepamo, da se vpliv komponent $u_1 \dots u_k$ prenaša prek dinamskega zakona na nove komponente $y_1 \dots y_k$. Pričakujemo lahko, da se kaotično obnašanje sistema kaže tudi v vektorju $y = (y_1 \dots y_k)$, ter njegovem atraktorju, ki mu mora pripadati ista dimenzionalnost kakor vektorju u . V našem primeru je reprezentativna spremenljivka prostorninska koncentracija trdnih delcev v zračnem toku na določenem mestu, ki jo opazujemo pri medsebojno premaknjenih časih $t, t + T, \dots, t + kT$. Za T je bil izbran čas vzorčenja $4,4 \cdot 10^{-3}$ s. Povezanost tako dobljenih rezultatov prikazujejo diagrame faznih portretov na sliki 7a—b za različne k in dve značilni višini y preseza cevovoda.

Iz tako ustvarjenih komponent dobimo osnovni podatek o kaotičnem atraktorju s korelacijskim integralom

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i \neq j} \Phi(r - u_i - u_j) \quad (1),$$



Sl. 8. Korelacijski integral

kjer je Φ Heavisidejeva koračna funkcija in u k -dimenzionalni vektor s komponentami $u(t), \dots, u(t + kT)$. Časovni interval T je podan s frekvenco vzorčenja $T = 4,4 \cdot 10^{-3}$. Število komponent vektorja smo variirali v območju $k = 2$ do 12. Pri majhnih vrednostih r narašča korelacijski integral kot r^d , kjer pomeni korelacijski eksponent d fraktalno dimenzijo atraktorja [5]. To dimenzijo določimo iz diagrama $\log(C)/\log(r)$ pri majhnih vrednostih r . Odvisnost korelacijskega integrala je prikazana v diagramu z dvojno logaritemsko mrežo na sliki 8 za izbrano mesto preseza 1 in za različno število komponent vektorja u .

Naklon diagrama se z večanjem števila komponent približno ustali na določeni vrednosti. Minimalno število komponent, potrebnih za oceno naklona in s tem dimenzionalnost, je približno 6. Ocenjena fraktalna dimenzija v naših primerih ne presega vrednosti 3,7. Zato lahko govorimo o nizki stopnji kaosa, kljub temu, da imamo opravka s turbulentnim pojavom, kjer bi lahko pričakovali neomejeno število prostostnih stopenj. To je odkritje za izbrani sistem. To se ujema s splošno znanim dejstvom, da so čudni atraktorji diskretnih disipativnih sistemov majhnih dimenzij [4]. Presemetljivo pa je, da velja to tudi za zvezni sistem.

Sklepi

Mehanizem prenosa fluktuacij iz hitrostnega polja v polje prostorninskih koncentracij za zdaj še ni znan. Naši eksperimenti kažejo, da izraziti spektralni vrh v fluktuacijah hitrosti ne povzroči resonančnega gibanja delcev. Bolj izrazit pa je vrh, ki izvira iz periodičnega vsipanja delcev. Razširitev spektra prostorninske koncentracije je posledica naključnega gibanja trdnih delcev. Mehanizem tega pojava pa še ni fizikalno modeliran.

Ocenjena majhna dimenzionalnost atraktorja in majhno minimalno število komponent predstavitevne vektorja u kažeta, da bi bilo mogoče opisati celotni pojav z majhnim številom dinamskih spremenljivk, kar je predmet naših nadaljnjih raziskav.

LITERATURA

- [1] I. Grabec, Deterministični kaos, SV, 1987/10—12, str. 165 do 173.
- [2] M. Bonetti, R. Meynart, J. P. Boon and D. Olivari, Phys. Rev. Lett. 55.5.498 (1985) Physical c.
- [3] Braundstater in Deterministic Chaos, edited by Phys. -Verlag GmbH, D-6940 Weinheim 1984.
- [4] Takens, in Deterministic Chaos, edited by Physik-Verlag GmbH, D-6940 Weinheim 1984.
- [5] H. Haken, Advancet Synergetic, Springer-Verlag, Berlin 1983.
- [6] P. Grassberger, J. Procaccia, Phys. Rev. A. vol. 28, 4, 2951 (1983).

Naslova avtorjev: mag. Brane Širok, dipl. inž.,
Turboinštitut, Ljubljana
prof. dr. Igor Grabec, dipl. inž.,
Fakulteta za strojništvo,
Ljubljana