

Mariusz R. RZAŚA¹ i Bolesław DOBROWOLSKI¹

BADANIE ZJAWISKA POWSTAWANIA CHAOSU W PROCESIE TWORZENIA SIĘ KROPLI CIECZY

STUDY OF CHAOS PHENOMENON IN LIQUID DROP FORMATION PROCESS

Abstrakt: Artykuł jest poświęcony badaniu procesu formowania się kropli cieczy tworzącej się na dyszy. Dysza jest ustawiona pionowo, a krople odrywają się od dyszy pod wpływem siły grawitacji. Głównym celem pracy jest oszacowanie, jak bardzo może być niestacjonarny proces formowania się kropli cieczy oraz czy można go opisać znanymi regułami chaosu deterministycznego. Praca zawiera wyniki badań wskazujące na występowanie zjawisk chaotycznych w procesie formowania się kropli cieczy. Badania eksperymentalne i wyniki wizualizacji stanowiły podstawę do opracowania modelu matematycznego, opartego na bilansie sił działających na kroplę cieczy formującą się na wylocie z dyszy. Wyniki badań opracowano i przedstawiono w postaci atraktora oraz wykresów widma mocy. W pracy w sposób skrócony opisano algorytm tworzenia atraktora w oparciu o typowe procedury stosowane w opisie zjawisk chaosu deterministycznego. Określono przedziały wartości parametrów, przy których odstęp czasu pomiędzy kolejnymi kroplami są nieregularne, a ich prezentacja w przestrzeni fazowej wskazuje na obecność zjawisk chaotycznych. W podsumowaniu wykazano, że wyniki obliczeń numerycznych są porównywalne z wynikami eksperymentu. W ten sposób udowodniono, że stosunkowo proste modele matematyczne mogą symulować niestacjonarne stany procesów fizycznych.

Słowa kluczowe: tworzenie się kropeł, chaos, atraktory

Proces powstawania kropli ma miejsce w różnego rodzaju skraplaczach i skrubkach. W ostatnim okresie prowadzone są prace nad skraplaniem wody znajdującej się w spalinach z uwagi na zwiększenie sprawności kotłów opalanych biomasą. Niejednokrotnie procesy formowania się kropli cieczy występujące w urządzeniach skraplających przebiegają w sposób niestacjonarny. Tematem tego artykułu jest oszacowanie, jak bardzo może być niestacjonarny proces formowania się kropli cieczy oraz czy można go opisać znanymi regułami chaosu deterministycznego [1-3]. Ponadto jest opisanych wiele innych zagadnień z tematyki przepływów dwufazowych, w których występuje chaos deterministyczny [4, 5].

Metodyka badań i stanowisko pomiarowe

Eksperyment polega na sprawdzeniu odstępów czasu pomiędzy kolejno odrywającymi się kroplami od wylotu dyszy i określeniu przedziału utraty stabilności. Przeprowadzono serię doświadczeń mających na celu pomiar odstępów czasu pomiędzy kolejno odrywającymi się kroplami wody od końcówki dyszy. Schemat stanowiska pomiarowego jest przedstawiony na rysunku 1. Zbiornik 1 umocowano w ten sposób, aby ciecz mogła swobodnie wypływać poprzez rurę o średnicy ϕ 30 mm. Na zakończeniu rury zamontowano zawór regulacyjny 2, za pomocą którego regulowano natężenie swobodnego wypływu cieczy ze zbiornika. Zawór zakończono dyszą, na której formuje się kropla cieczy. Dyszę wykonano z mosiądzu. W pewnej odległości od końcówki dyszy osiowo

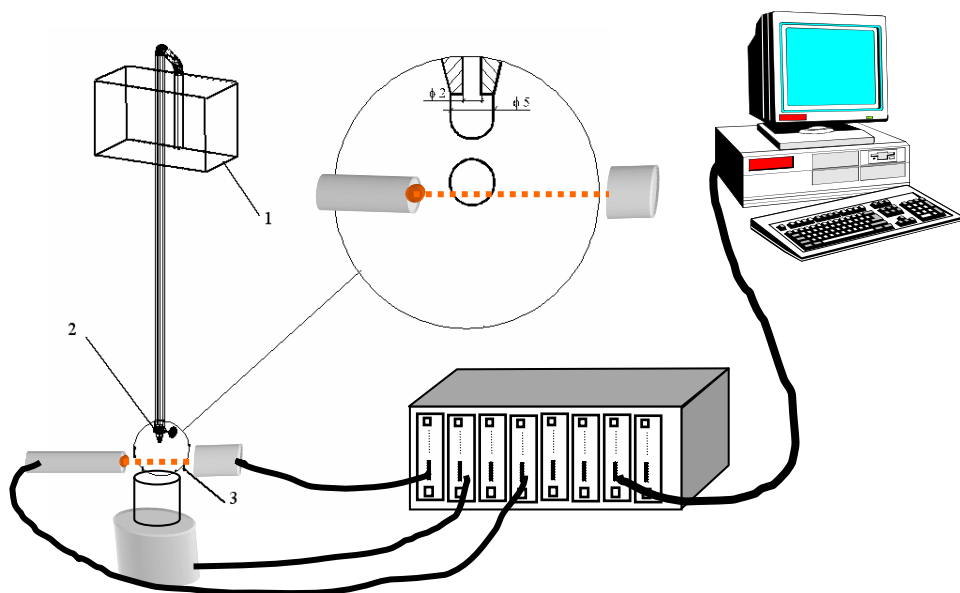
¹ Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, ul. E. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, tel. 77 449 80 71, email: m.rzasa@po.opole.pl, b.dobrowolski@po.opole.pl

² Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'13, Jarnottówek, 23-26.10.2013

umieszczono fotokomórkę, która w połączeniu z komputerowym systemem pomiarowym rejestruje kolejne czasy odrywania się kropli cieczy. Pomiar natężenia przepływu przeprowadzono metodą wagową przy użyciu zbiornika pomiarowego umieszczonego na wadze. Wartości natężenia przepływu obliczono na podstawie zależności:

$$Q = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (1)$$

gdzie: Δq - przyrost ciężaru cieczy gromadzonej w naczyniu podczas pomiaru [kg],
 Δt - czas pomiaru [min].



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

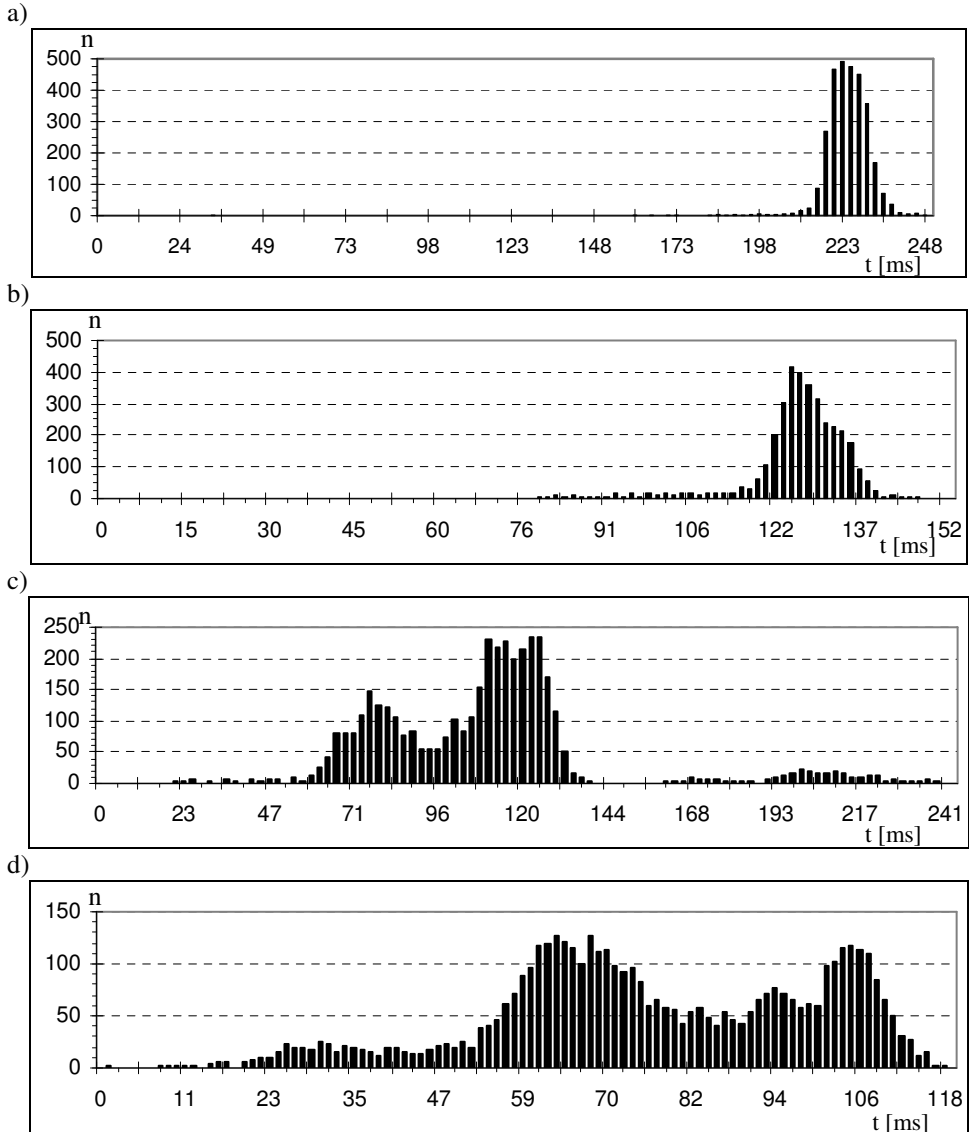
Fig. 1. Experimental setup

Wykonano serię pomiarów dla różnych wartości natężenia przepływu. Pomiar przebiegał w sposób dyskretny, tzn. dla ustalonej wartości natężenia przepływu zebrano szereg odstępów czasu pomiędzy kroplami (dla 3000-5000 kropeł), po czym zwiększono przepływ i przeprowadzono następne pomiary. W wyniku otrzymano serie danych dla różnych wartości natężenia przepływu.

Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów eksperymentalnych mają postać szeregu czasowego, dla którego poszczególne wartości elementów ciągu oznaczają czas pomiędzy kolejnymi kroplami. Rozrzut wartości odstępów czasu pomiędzy odrywającymi się kroplami zależy od strumienia wypływającej wody. Zmierzone ciągi liczbowe poddano analizie widmowej. Na tej podstawie można stwierdzić, czy w badanym ciągu występują jakieś dominujące

wartości, które świadczyłyby o procesie zdeterminowanym [2]. Proces wyznaczania widma mocy oparto na dyskretnej transformacji Fouriera [1].



Rys. 2. Widmo mocy dla: a) $Re = 109,1$, b) $Re = 203,5$, c) $Re = 226,1$, d) $Re = 258,5$

Fig. 2. Power spectrum for: a) $Re = 109.1$, b) $Re = 203.5$, c) $Re = 226.1$, d) $Re = 258.5$

Na rysunku 2 przedstawiono rozkład ilościowy próbek, gdzie n oznacza ilość próbek, a t wartość liczbową przedziału czasowego dla danego szeregu. Wyniki przedstawiono dla

różnych wartości strumienia wody wypływającej z dyszy, dla których liczbę Reynoldsa obliczono na podstawie zależności:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\eta} = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho}{\pi \cdot d \cdot \eta} \quad (2)$$

gdzie: v - prędkość wypływu cieczy z dyszy [m/s], η - lepkość cieczy [Pa·s], d - średnica dyszy ($d = 0.005$ m), ρ - gęstość cieczy [kg/m³].

Na rysunku 2a przedstawiono rozkład widma mocy dla stabilnego procesu formowania się kropli cieczy. Rozkład wartości czasów formowania się poszczególnych kropli przypomina krzywą Gaussa. Zatem można uznać, że rozbieżności mierzonych czasów są wynikiem błędów pomiaru. Widmo mocy dla przepływu bliskiego punktowi utraty stabilności przedstawiono na rysunku 2b. Widmo jest bardzo podobne do rozkładu dla przepływów stabilnych, aczkolwiek obserwuje się asymetrię rozkładu mocy. Dla przepływów, przy których występuje rozwinięty chaos deterministyczny, widmo mocy ma kilka wyraźnie dominujących przedziałów wartości (rys. 2c i d) [7]. Stanowi to dowód na wielkowymiarowość procesu. Wraz ze zwiększaniem przepływu cieczy w widmie pojawia się coraz więcej prążków mocy, co w konsekwencji prowadzi do pełnej niestabilności układu i powstania chaosu, gdzie żaden z parametrów procesu nie jest dominujący. Powyższe widma mocy pozwalają na wyodrębnienie wartości odstępów czasowych pomiędzy formującymi się kolejnymi kroplami, które są najbardziej prawdopodobne przy danym natężeniu przepływu.

Dla wybranych wartości strumienia cieczy przeanalizowano przebiegi kolejnych wyrazów ciągu wartości odstępów czasowych pomiędzy kroplami (rys. 3). Na osi pionowej zaznaczono średni czas powstawania kolejnych kropli. Oś rzędnych oznacza liczbę porządkową tworzącej się kropli. Wraz ze zwiększaniem strumienia cieczy maleje czas powstawania kropli, jednak nieregularność tworzenia się kropli znacznie rośnie. W celu porównania otrzymanych wyników wprowadzono parametr zwany dewiacją, którym jest procentowy stosunek przedziału wiarygodności do wartości średniej:

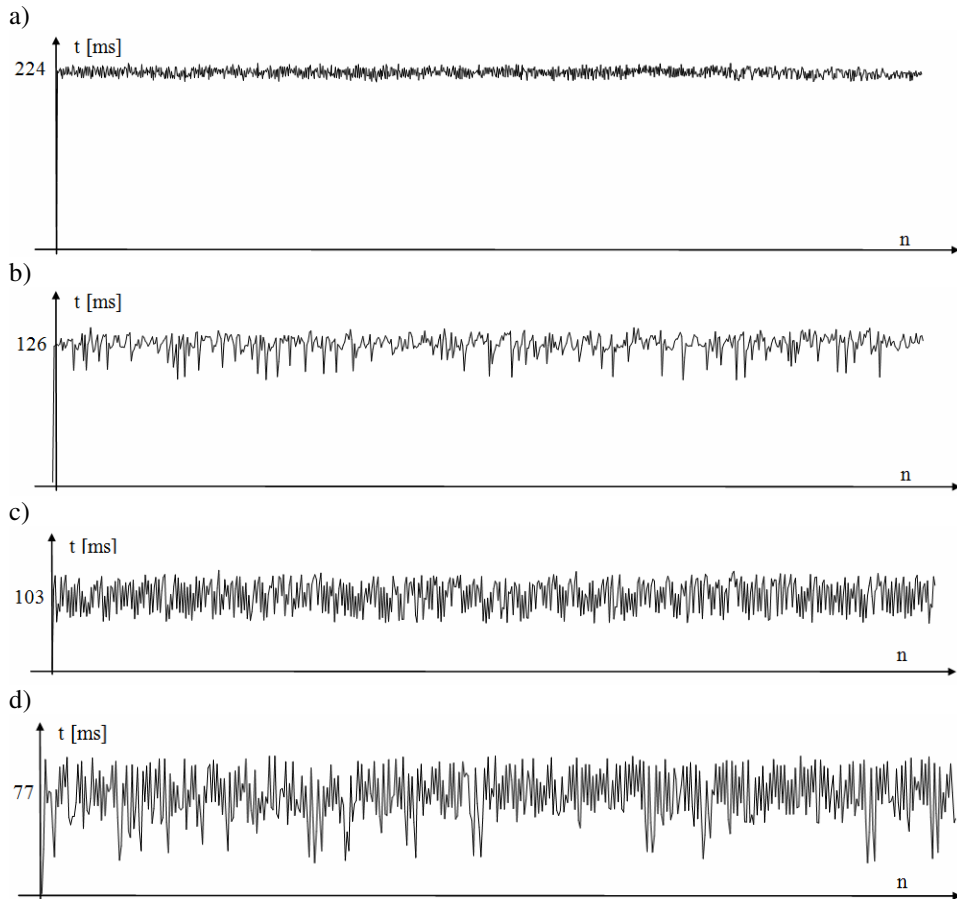
$$d = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie: t_{\max} - wartość maksymalna odstepu, t_{\min} - wartość minimalna odstepu, N - oznacza liczbę danych.

Podczas pomiaru odstępów czasu pomiędzy kroplami może się zdarzyć, że zostaną zarejestrowane przypadkowe i błędne wartości, tzn. bardzo odbiegające od pozostałych z powodu przypadkowych zakłóceń (drgania, hałas). W związku z tym z każdej serii pomiarowej odrzucono 5% danych z przedziału największych i najmniejszych wartości. W celu przejrzystego zobrazowania zmian czasu dyskretny punkty odstępów czasowych połączono odcinkami.

Przeanalizowanie kolejnych rozkładów szeregów wartości dla zwiększającego się strumienia cieczy wypływającej z dyszy pozwoli na uchwycenie mechanizmu powstawania chaosu. Rysunek 3a przedstawia ciąg wartości odstępów czasowych pomiędzy kroplami dla natężenia przepływu, przy którym jeszcze nie występuje chaos. Wszystkie wartości

zawierają się w granicach wartości średniej. Niewielkie odchyłki od wartości średniej są spowodowane zakłóceniami. Dobrze obrazuje to wartość dewiacji, która wynosi 10,51%. Zwiększanie strumienia cieczy powoduje zwiększenie intensywności odrywania się kropli przy tym samym poziomie zakłóceń. Rysunek 3b przedstawia przebieg krytyczny, przy którym następuje przejście ze struktury uporządkowanej w chaotyczną. Dostrzegalne jest stosunkowo regularne powstawanie kropli, których czasy są znacząco mniejsze od wartości średniej, a ich czasy odrywania się są zbliżone do siebie. Zgodnie z teorią chaosu są to punkty bifurkacji [8].



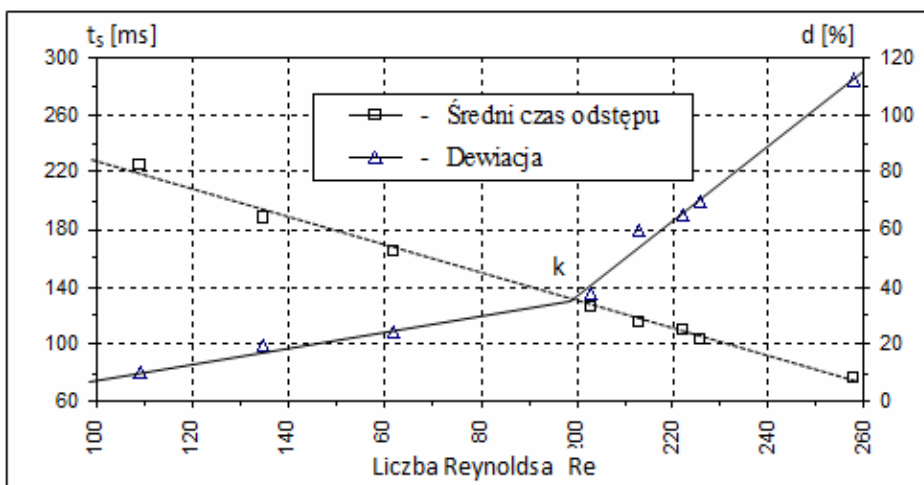
Rys. 3. Rozkład wyrazów ciągu odstępów czasowych dla: a) $Re = 109,1$ i $d = 10,51\%$, b) $Re = 203,5$ i $d = 37,85\%$, c) $Re = 226,1$ i $d = 70,04\%$, d) $Re = 258,5$ i $d = 112,2\%$

Fig. 3. Values of time intervals between the forming drops for: a) $Re = 109.1$ and $d = 10.51\%$, b) $Re = 203.5$ and $d = 37.85\%$, c) $Re = 226.1$ and $d = 70.04\%$, d) $Re = 258.5$ and $d = 112.2\%$

Kolejne wykresy (rys. 3c i 3d) przedstawiają chaos deterministyczny. Trudno jest dostrzec na podstawie przebiegu wyrazów ciągu jakkolwiek regularność. Niemniej, nie

musi to oznaczać braku uporządkowania. W celu jednoznacznego stwierdzenia zachowania chaotycznego układu należałoby przeprowadzić dalsze badania w dziedzinie atraktorów fazowych. Atraktory tego typu można opisać za pomocą technik fraktalnych, ich parametry można wyrazić za pomocą wymiarów stosowanych do określania parametrów fraktali [2]. Pojawienie się chaosu w procesie formowania się kropli cieczy wynika z faktu, że na krople cieczy działa zbiór sił, z których żadna nie jest dominująca. Ponadto chaos, choć jest nieprzewidywalny, jest jednak deterministyczny. To znaczy, że dwa identyczne układy chaotyczne, pobudzone takim samym sygnałem, zachowują się identycznie, choć nie jesteśmy w stanie przewidzieć, jaki będzie stan układu w danej chwili. Badając zachowanie się układów złożonych, Bernard Derrid [9] udowodnił, że gdy siła oddziaływania pomiędzy współzależnymi elementami układu rośnie, układ przechodzi fazowo od stanu uporządkowanego do chaotycznego. Podobnie rzecz ma się z kroplami, nie można przewidzieć, jaki będzie odstęp czasu pomiędzy konkretnymi następującymi po sobie kroplami, ale można określić zbiór wielkości, w jakim będą zawarte.

Zależność średniego czasu odstępu pomiędzy kroplami od liczby Reynoldsa jest liniowa i odwrotnie proporcjonalna (rys. 4), natomiast wprost proporcjonalna od dewiacji. Chaos pojawia się dla wartości liczby Reynoldsa powyżej 200, co odpowiada dewiacji $d > 35\%$ i średniemu czasowi odstępu $t_s < 130$ ms. Znajomość przedziałów tych wielkości może służyć jako kryterium wystąpienia chaosu. Punkt k jest punktem krytycznym, dla którego zachodzi zmiana zachowania się układu, a ściślej mówiąc utrata stabilności układu, powyżej której układ zaczyna zachowywać się chaotycznie.



Rys. 4. Zależność średniego czasu odstępu i dewiacji od liczby Reynoldsa

Fig. 4. Relation between drop interval time and deviation and Reynolds number

Jak wynika z powyższych charakterystyk, zmiana kąta nachylenia linii dewiacji jest miarą występowania chaosu, a po przejściu przez punkt krytyczny obserwujemy zwiększony jej przyrost. Dla wartości liczb Reynoldsa powyżej punktu k obserwujemy nagły przyrost dewiacji przy niezmiennym spadku wartości średniej czasu t_s tworzenia się

kropli. Jest to dowód na utratę stabilności oraz początek obszaru występowania zachowań chaotycznych układu.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy wykazano występowanie kilku podstawowych cech chaosu deterministycznego w procesie formowania się kropli cieczy. Zaobserwowano, że po przekroczeniu pewnej wartości krytycznej strumienia cieczy wypływającej z dyszy proces tworzenia się kropeł zmienia się z regularnego na chaotyczny. Po przekroczeniu punktu krytycznego widmo mocy zmienia się z prążkowanego na ciągle szerokopasmowe, co jest cechą charakterystyczną dla chaosu. Na podstawie doświadczenia stwierdzono, że układ zachowuje się chaotycznie dla liczb Reynoldsa większych od 200.

Literatura

- [1] Bracewell RN. The Fourier Transform and Its Applications. 3rd ed., New York: McGraw-Hill Book Company; 2000.
- [2] Schuster HG. Chaos deterministyczny - wprowadzenie. Warszawa: Wyd Nauk PWN; 1993.
- [3] Peitgen HO, Jürgens H, Saupe D. Granice Chaosu FRAKTALE. Warszawa: Wyd Nauk PWN; 2002.
- [4] Franca F, Acikgoz M, Lahey RTJr, Clausse A. The use of fractal techniques for flow regime identification. *Multiphase Flow*. 1991;17(4):545-552. DOI: 10.1016/0301-9322(91)90049-9.
- [5] Lacy CE, Sheintuch M, Dukler AE. Methods of deterministic chaos applied to the flow of thin wavy films. *AIChE J*. 1991;37(4):481-489. DOI:10.1002/aic.690370402.
- [6] Van Den Bleek CM, Schouten JC. Can Deterministic chaos create order in fluidized-bed scale-up. *Chem Eng Sci*. 1993;48(13):2367-2373. DOI: 10.1016/0009-2509(93)81058-4.
- [7] Łączkowski R. Identyfikacja chaosu zdeterminowanego. *Pomiary Automat Kont*. 1990;8:159-163.
- [8] Szemplińska-Stupnicka W. Chaos, bifurkacje i fraktale wokół nas. Najkrótsze wprowadzenie. Warszawa: OWPW; 2002.
- [9] Tambe SS, Kulkarni BD. Intermittency route to chaos in a periodically forced model reaction system. *Chem Eng Sci*. 1993;48(15):2817-2821. DOI: 10.1016/0009-2509(93)80193-T.

STUDY OF CHAOS PHENOMENON IN LIQUID DROP FORMATION PROCESS

Department of Mechanical Engineering, Opole University of Technology

Abstract: The subject matter of this paper involves the examination of the process of liquid drop formation at the outlet of a nozzle. The tested nozzle has vertical orientation and the drops are separated under the influence of gravitational force. The objective in this paper is the assessment of the non-stationary characteristics in the process of drop formation and the potential for describing it in terms of principles familiar from deterministic chaos. The paper contains the results of experiments which indicate that chaotic phenomena occur during the formation of liquid drops. Both experimental results and results of visualization offer a foundation for the development of a mathematical model based on the balance of forces acting on a liquid drop which is formed at the outlet of a nozzle. The results of the research are elaborated and presented in the form of attractors and power spectrum diagrams. The paper also contains an outline of the algorithm used for the development of the attractor based on standard procedures which are applied in the description of deterministic chaos. The ranges of the parameters are determined for which the time intervals between the successive drops tend to be non-stationary. Their presentation in the phase space has revealed the occurrence of chaotic phenomena. It was concluded that numerical calculations and the results gained from experiment offer comparable results. Consequently, it was indicated that relatively simple mathematical model can be used for simulation of the states of actual physical processes.

Keywords: drop formation, chaos, attractors

