DOI: 10.24427/978-83-67185-30-1_15

Modelling of non-stationary pressure fluctuations during micromembrane-enhanced boiling in minichannel

Romuald MOSDORF, Gabriela RAFAŁKO, Hubert GRZYBOWSKI, Paweł DZIENIS

Bialystok University of Technology, Wiejska 45C, 15-351 Białystok, Poland
r.mosdorf@pb.edu.pl

ABSTRACT

In this paper a model of pressure fluctuations during boiling in parallel minichannels covered with a steel mesh micromembrane has been presented. The simulation results have been compared with the experimental results. The results show that the use of a mesh membrane causes additional pressure fluctuations due to boiling in the mesh openings. The time-varying level of the liquid filling the meshes openings causes the act like a compressible volume - but with a much smaller volume. This small volume is responsible for the high frequency of pressure fluctuations. The movement of the liquid meniscus in the mesh openings protects the system against excessive increase in water inlet pressure, which allows to decrease the inlet pressure fluctuations amplitude.

Keywords: minichannel, flow boiling, heat exchanger, vapour venting membrane, two-phase flow

1. INTRODUCTION

The presence of the mesh membrane above the minichannels allows a significant increase in the heat flux transferred by the heat exchanger (Czarnecki et al., 2021; Dai et al., 2013; David et al., 2011; Mosdorf et al., 2021). The main reason of vapour removal through a mesh membrane is to mitigate some of the problems observed during flow boiling in microchannels. Also numerical simulations, carried out by Fang et al.(Fang et al., 2010), confirm the fact that vapour-venting mechanism can effectively mitigate the vapour accumulation issue, reduce the pressure drop and suppress the local dry-out in the microchannel. In such system the liquid which was supplied to the minichannels flew also through the openings of the mesh where the water evaporation occurred. Filling the openings of the mesh with water began near the inlet (because the liquid pressure in the inlet is high). Then, the water flew along the mesh – filling the next openings of the mesh. As the water temperature was growing along the minichannel, vapour bubbles started occurring in the gaps of the mesh and later they escaped to the area above the mesh.The presence of the mesh membrane modifies the character of inlet pressure fluctuations. In this paper a model of pressure fluctuations during flow boiling in parallel minichannels covered with a steel mesh micromembrane has been presented.

2. EXPERIMENTAL SETUP

In the system the stainless steel woven meshes were applied as a micromembrane which covered the minichannels. The mesh was pressed against the upper part of the minichannels by means of Teflon beams shown in Fig. 1a. A scheme of the test section with microchannel heat exchanger is shown in Fig. 1a. Experimental setup consists of a water loop (Fig. 1b) and an air loop (Fig. 1c). The distilled water was pumped by gear pump to the surge tank. The water flow rate was measured by the mass flow meter. The exchanger was heated by electric power. The temperatures were measured using thermocouples. The inlet pressure, outlet pressure and air pressure over the mesh were measured by pressure sensors MPX5050DP. The heat exchanger consisted of 11 parallel minichannels each of dimension 32 x 0.25 x 0.5 mm.

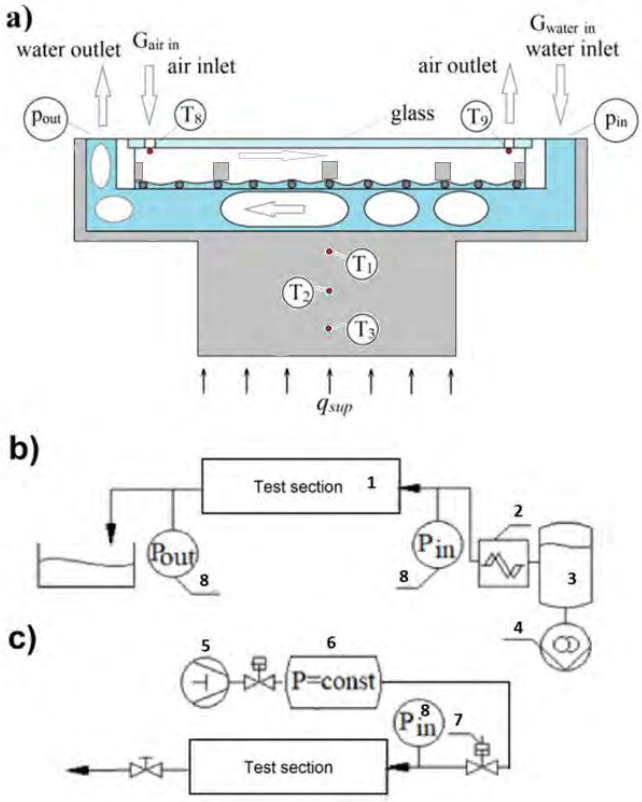


Figure 1: Experimental setup. a) Scheme of test section. b) Scheme of water supply system. c) Scheme of air supply system. Test section (1), mass flow meter - Bronkhorst mini CORI-FLOW™ M13 (2), surge tank (3), gear pump (4), compressor (5), tank (6), proportional pressure regulator (7) (Metalwork Regtronic), pressure sensors (8)

Fig. 2a shows the changes in the heat flux as a function of the electric power of the heater with a constant water flow rate. If the channels are closed by steel plate then the maximum heat flux transferred by the exchanger corresponds to the first point shown in the diagram (about 350 kW/m2).

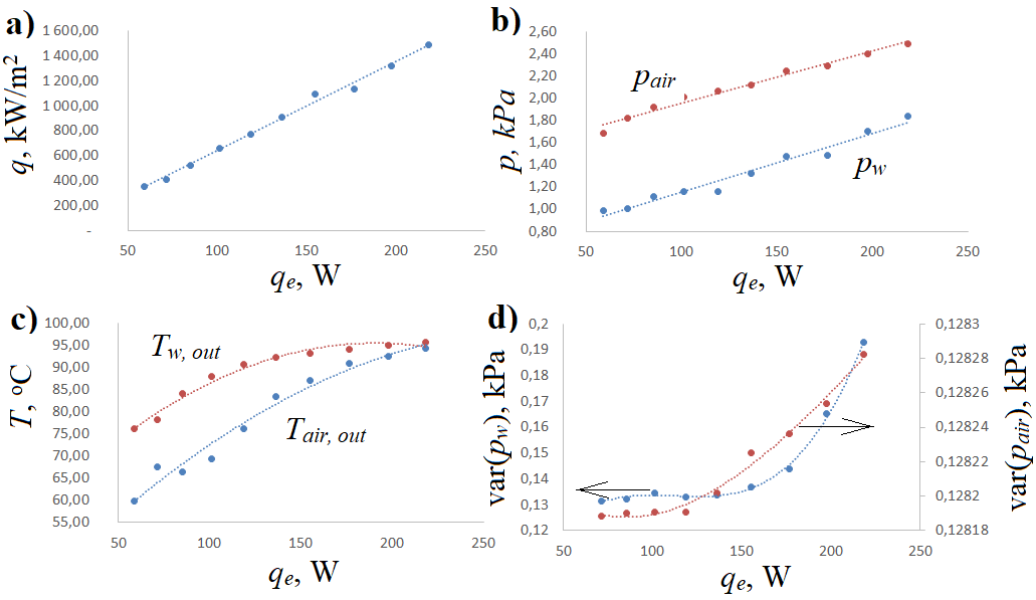


Figure 2: Experimental results. a) the changes in the heat flux as a function of the electric power of the heater with a constant water flow rate $\dot{m}$ = 717 g/h. b) Average value of water inlet pressure (p_w) and air pressure over the mesh (p_{air}). c) Average values of water outlet temperature and air temperature, d) Variance of water inlet pressure and air pressure over the mesh

3. THE MODEL OF WATER FLOW IN A HEAT-EXCHANGER WITH A STEEL MESH MICROMEMBRANE

The model of water flow in a heat-exchanger with a steel mesh micromembrane has been show in Fig. 3. A model of pressure drop instabilities during boiling in minichannels with a steel mesh micromembrane was developed basing on the model presented in the paper (Zhang et al., 2010).

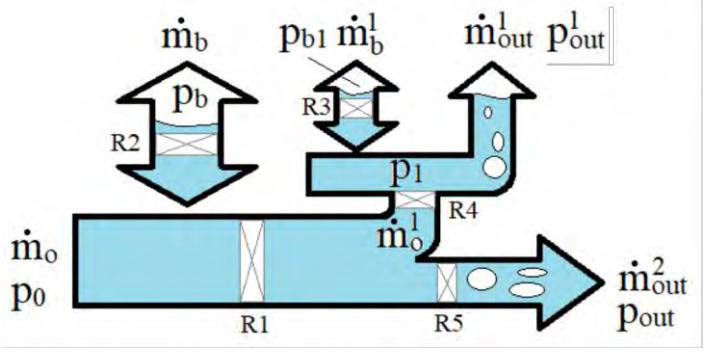


Figure 3: The model of water flow in a heat-exchanger with a steel mesh micromembrane.

The model analyses liquid, air and two-phase flow pressure changes. The diagram of water flow in the system consisting of minichannels which is covered with a mesh membrane is shown in Fig. 3. It was assumed that the system is supplied with water with a flow rate of $\dot{m}_0$ at a constant pressure p_0. It was assumed that there is a compressible volume in the system to which the liquid flow $\dot{m}_b$ is damped by the restrictor *R2*. The pressure in a compressible volume - p_b. The resistance of the heat exchanger supply system is described by the restrictor *R1*. It was assumed that part of the water flowing into the exchanger wets the mesh $\dot{m}_0^1$ and then evaporates from it, the remaining part of the water boils in the minichannels $\dot{m}_{out}^2$. The process of water flow through the mesh was divided into two stages. Near the cool water inlet, the liquid wets the mesh and flows to the area filled with air. The amount of water flowing through the mesh depends on the pressure difference between the liquid and air. The resistance of water flow through the mesh is described by the restrictor *R3*. Changes in air pressure above the mesh caused by changes in the air volume above the mesh are marked with the symbol p_{b1}. The second stage of water flow through the mesh occurs when the mesh covers the channels in which the boiling process occurs. In this case, there is a two-phase flow in the mesh. The amount of water evaporating through the mesh is marked with the symbol $\dot{m}_{out}^1$. The amount of water supplied to the mesh depends on the intensity of the boiling in the channels, on the position of the boiling front and the amount of generated vapour. In order to model this process, the model includes two restrictors *R4* and *R5*. The relationship between them determines the proportion between $\dot{m}_o^1$ and $\dot{m}_{out}^2$. In this paper the influence of this relationship on the pressure fluctuations will be discussed.

The following mass flow rate relation occurs in the mesh system:

$$\dot{m}_{out}^1 = \dot{m}_0^1 + \dot{m}_b^1 \qquad \text{Eq. (1)}$$

where $\dot{m}_b^1$– the water flow rate flowing into the mesh opening (without evaporation), $\dot{m}_0^1$– the water flow rate transferred from minichannels to the mesh.

The second-order derivative of the momentum balance of the mass flow rate through mesh openings ($\dot{m}_b^1$) has the form:

$$I_b \frac{d^2\dot{m}_b^1}{dt^2} = \frac{dp^1}{dt} - \frac{dp_{b1}}{dt} - \frac{d(\Delta p_r^3)}{dt} \qquad \text{Eq. (2)}$$

where: I_b – the lumped mesh inertia, $I_b = \sum_i \frac{L_i}{A_i}$; $\Delta p_r^3 = \gamma_3 \dot{m}_b^1$, γ_3– is the lumped pressure loss coefficient related to the flow filling the openings of the mesh.

In a short period of time, when we assume that the amount of air flowing in and out to the first chamber above the mesh is equal, and when we assume that the intensity of evaporation is small. The time derivative of the compressible volume pressure is dependent on the mass flow rate $\dot{m}_{\mathrm{b}}^{1}$:

$$\frac{dp_{b_1}}{dt} \approx \frac{npp_{b_1}}{\rho V_{b_1}} \dot{m}_b^1 = A\dot{m}_b^1 \qquad \text{Eq. (3)}$$

where: *n* – is a fixed polytropic index of expansion.

Considering Eq. (1) the Eq. (2) can be written:

$$I_b \frac{d^2\dot{m}_{out}^1}{dt^2} - I_b \frac{d^2\dot{m}_0^1}{dt^2} = \frac{dp_0^1}{dt} - \gamma_3 \frac{d\dot{m}_{out}^1}{dt} + \gamma_3 \frac{d\dot{m}_0^1}{dt} - A\dot{m}_{out}^1 + A\dot{m}_0^1 \qquad \text{Eq. (4)}$$

The second-order derivative of the momentum balance of two phase flow in the mesh openings (for constant p_{out}^1) can be written as:

$$I_c \frac{d^2\dot{m}_{out}^1}{dt^2} = \frac{dp_{out}{}^1}{dt} - \frac{\Delta p_c^1}{dt} \qquad \text{Eq. (5)}$$

where: $I_c = \sum_i \frac{L_i}{A_i}$, $\Delta p_c^1 -$ the pressure drop in the thickness of the mesh (two-phase flow), p_{out}^1– the outlet pressure.

By summing Eq. (4) and (5) for constant p_{out} and considering: $p^1 = p_0 - \Delta p_r^1 - \Delta p_r^4$ and

$$\frac{d(\Delta P_{MC}^1)}{d\dot{m}_{out}^1} = \delta_1(\dot{m}_{out}^1 - \dot{m}_a)(\dot{m}_{out}^1 - \dot{m}_b) \qquad \text{Eq. (6)}$$

where: m_a - the mass flow of saturated vapour, m_b – the mass flow of saturated liquid,

we obtain:

$$I\frac{d^2\dot{m}_{out}^1}{dt^2} + [\delta_1(\dot{m}_{out}^1 - \dot{m}_a)(\dot{m}_{out}^1 - \dot{m}_b) + \gamma_3]\frac{d\dot{m}_{out}^1}{dt} + A(\dot{m}_{out}^1 - \dot{m}_0^1) = -\gamma_1\left(\frac{d\dot{m}_{out}^2}{dt}\right) + (\gamma_3 - \gamma_1 - \gamma_4)\frac{d\dot{m}_0^1}{dt} + I_S\frac{d^2\dot{m}_0^1}{dt^2} \qquad \text{Eq. (7)}$$

where: $I = I_c + I_b$.

For the mass flow rate in minichannels:

$$\dot{m}_{out}^2 = \dot{m}_0 + \dot{m}_b - \dot{m}_0^1 \qquad \text{Eq. (8)}$$

where: $\dot{m}_b^1$- the changes of mass flow rate related to the occurrence of the compressible volume.

Considering the momentum balance of $\dot{m}_b$ and $\dot{m}_{out}^2$ we can obtain:

$$I\frac{d^2\dot{m}_{out}^2}{dt^2} + [\delta_2(\dot{m}_{out}^2 - \dot{m}_a)(\dot{m}_{out}^2 - \dot{m}_b) + \gamma_2 + \gamma_1 + \gamma_5]\frac{d\dot{m}_{out}^2}{dt} + C_{s2}(\dot{m}_{out}^2 - \dot{m}_0) = -C_{s2}\dot{m}_0^1 - (\gamma_2 - \gamma_1)\frac{d\dot{m}_0^1}{dt} - I_b\frac{d^2\dot{m}_0^1}{dt^2} \qquad \text{Eq. (9)}$$

where: $C_{s2} = \frac{nP_b}{\rho V_b}$; $I = I_c + I_b$.

The $\dot{m}_0^1$ can be calculated as follows:

$$\dot{m}_0^1 = (1/\gamma_4)\,(\Delta P_{MC}^2 - \Delta P_{MC}^1 + P_{out}^1 - P_{out})$$

where: $\Delta P^2_{MC} = \delta_2 \left(\frac{1}{3}(\dot{m}^1_{out})^3 - \frac{1}{2}(\dot{m}^1_{out})^2 m_a - \frac{1}{2}(\dot{m}^1_{out})^2 m_b + \dot{m}^1_{out} m_a m_b\right)$.

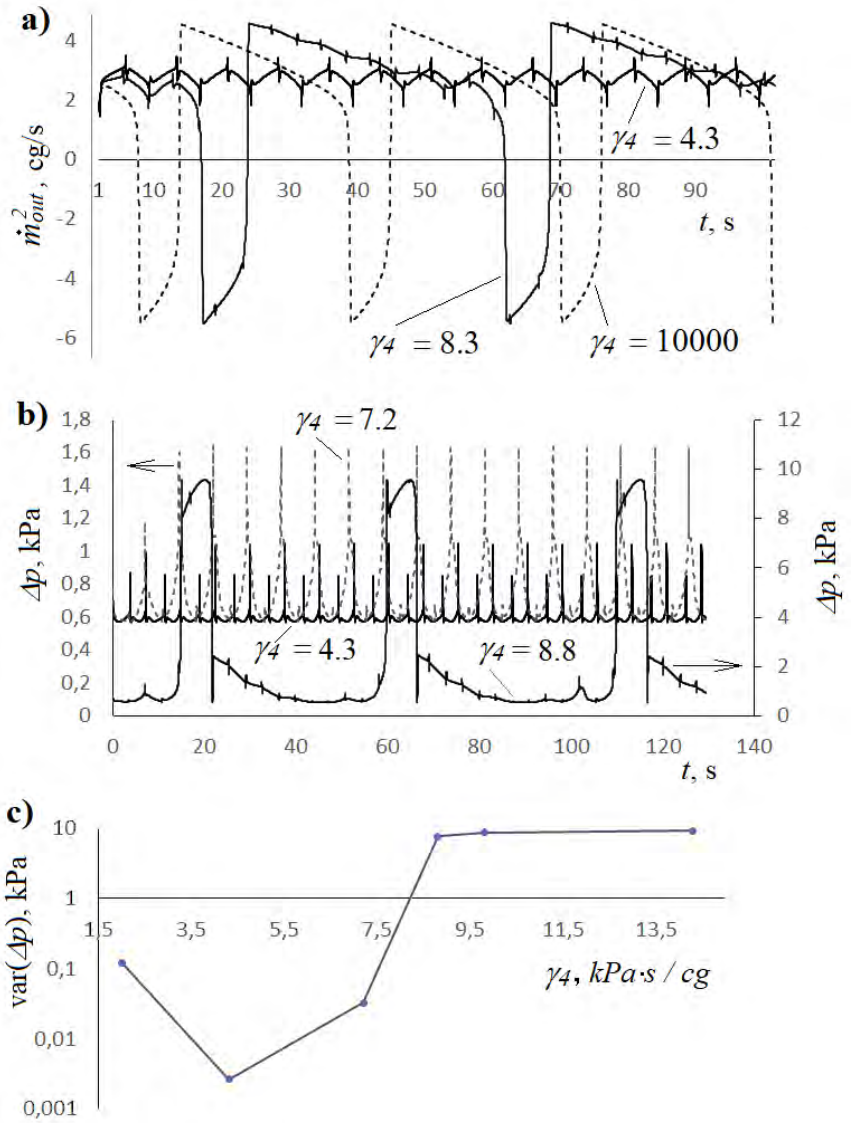


Figure 4: The results of the numerical simulation: a) changes in time the water flow rate $\dot{m}^2_{out}$ at different values of the R4 restrictor, b) the changes in liquid pressure over time with different values of R4, c) changes in the variance of pressure fluctuations as a function of the restrictor R4 value. Model's parameter: $\delta_1 = \delta_2 = 0.164$; $m_a = -4 * 10^{-2}$; $m_b = 2.9 * 10^{-2}$; $m_0 = 1.8 * 10^{-2}$; $I_1 = 0.0530$; $\gamma_1 = 0.3719$; $I_{b1} = 0.0447$; $I_2 = 0.0530$; $\gamma_2 = 0.3719$

4. RESULTS AND CONCLUSION

The simulations were carried out with the model parameters given in (Zhang et al., 2010). Figure 4a shows changes in time of the water flow rate $\dot{m}^2_{out}$ at different values of the *R4* restrictor. When the value of *R4* is large then the amount of water supplied to the mesh is very small and then the flow rate fluctuations are determined by the frequency of pressure changes in the compressible volume. In this case the reverse flow appears when $\dot{m}^2_{out}$ is negative. When the value of *R4* is reduced to the value of 8.4, then in the flow rate an additional frequency appears which is related to the air volume above the mesh.

A further increase in the water flow rate supplied to the mesh significantly changes the character of the fluctuations, the amplitude of the fluctuations decreases and the reverse flow disappears. Figure 4b shows the changes in liquid pressure over time with different values of *R4*. An increase in the liquid flow rate supplied to the mesh leads to an increase in the frequency of the pressure

fluctuations and a decrease in the amplitude of the pressure fluctuations. In Figure 4c, changes in the variance of pressure fluctuations as a function of the restrictor *R4* value were shown. The result obtained in the middle part of the graph corresponds to the experimental results shown in Fig. 2b, where it was shown that an increase in the boiling intensity (increasing the amount of steam in the channels) leads to an increase in the pressure oscillation amplitude. Similarly, in Figure 4c, reducing the amount of water supplied to the mesh increases the amplitude of pressure changes. The simulation results show that the use of a mesh membrane causes additional pressure fluctuations due to boiling in the mesh opening.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Science Centre, Poland [Grant Number: UMO-2017/27/B/ST8/02905].

NOMENCLATURE

$\dot{m}$	mass flow rate (g/s)
ΔP	pressure drop (kPa)
P	pressure (kPa)
V	Volume (m^3)
I	Inertia (-)
q	heat flux (kW/m^2)
q_e	electric power (W)
A	cross section (m^2)

Special characters

γ	restrictor model parameters (-)
ρ	water density [kg/m^3]

Subscripts

$out,$	outlet
e	electric
0	channel
b	mesh micromembrane
MC	minichannel
R	restrictor

REFERENCES

Czarnecki, J., Mosdorf, R., Grzybowski, H., Dzienis, P., 2021. Modeling dynamics of pressure fluctuations in a microchannel heat exchanger covered with a wire mesh membrane. E3S Web Conf. 321, 02006. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132102006

Dai, X., Yang, F., Yang, R., Lee, Y.-C., Li, C., 2013. Micromembrane-enhanced capillary evaporation. International Journal of Heat and Mass Transfer 64, 1101–1108. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.030

David, M.P., Miler, J., Steinbrenner, J.E., Yang, Y., Touzelbaev, M., Goodson, K.E., 2011. Hydraulic and thermal characteristics of a vapor venting two-phase microchannel heat exchanger. International Journal of Heat and Mass Transfer 54, 5504–5516. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.07.040

Fang, C.C., David, M.P., Rogacs, A., Goodson, K.E., 2010. Volume of fluid simulation of boiling two-phase flow in a vapor-venting microchannel. Frontiers in Heat and Mass Transfer 1.

Mosdorf, R., Grzybowski, H., Dzienis, P., Zaborowska, I., Adamowicz, A., 2021. Stability of Micromembrane Enhanced Boiling in Minichannel. Proceedings of the 15th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT2021) 2357.

Zhang, T., Peles, Y., Wen, J.T., Tong, T., Chang, J.-Y., Prasher, R., Jensen, M.K., 2010. Analysis and active control of pressure-drop flow instabilities in boiling microchannel systems. International Journal of Heat and Mass Transfer 53, 2347–2360. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.005

DOI: 10.24427/978-83-67185-30-1_16

Wybrane algorytmy analizy cech przepływów dwufazowych na podstawie zarejestrowanych filmów

Gabriela RAFAŁKO[(a)], Romuald MOSDORF[(a)], Paweł DZIENIS[(a)], Hubert GRZYBOWSKI[(a)] Grzegorz GÓRSKI[(a)]

[(a)] Politechnika Białostocka, Wiejska 45C, 15-351 Białystok, Poland
rafalkogabriela@gmail.com

STRESZCZENIE

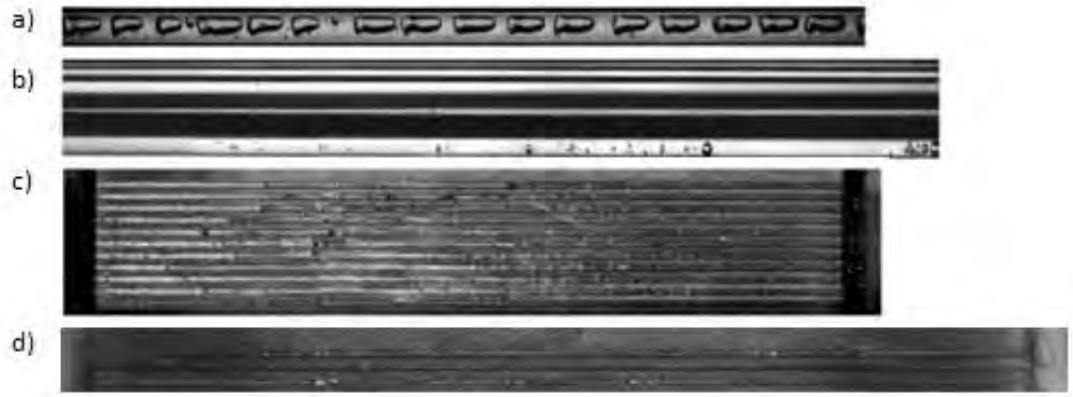
Praca dotyczy metod analizy obrazu służących do badania cech przepływów dwufazowych w mini i mikrokanałach. W pracy wykorzystano metody analizy obrazu, które opierają się na analizie szumu świetlnego (zmian jasności pikseli na klatkach filmu). Analiza charakterystycznych cech przepływu prowadzona jest na podstawie zmian jasności pikseli generowanych przez zachodzące zmiany fazy. Takie podejście pozwala analizować obrazy o dobrej, jak i o słabszej jakości. Wykorzystano dwa rodzaje metod analizy obrazu: korelacyjną metodę analizy obrazu, opracowaną przez autorkę pracy i metodę opartą na koncepcji entropii wieloskalowej, zaadaptowaną w pracy do badania filmów przepływów dwufazowych. Używając obu metod przeprowadzono identyfikację struktur przepływu dwufazowego, w wyniku której uzyskano mapę struktur przepływu. Zauważono, że korelacyjna metoda analizy obrazu pozwala badać zmiany struktury w czasie, natomiast metoda oparta na koncepcji entropii umożliwia analizę stopnia uporządkowania zmian jasności pikseli na danej klatce filmu. Stosując modyfikacje korelacyjnej metody analizy obrazu i wielowymiarowej entropii wieloskalowej przeprowadzono identyfikację fragmentu kanału, w którym zachodzą najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary na podstawie filmów przepływu dwufazowego we wrzeniu. Pokazano, że korelacyjna metoda analizy obrazu wyznacza początkowy obszar najbardziej gwałtownych zmian dystrybucji pary w kanałach, natomiast metoda oparta na koncepcji entropii wieloskalowej służy do określenia jego maksymalnego położenia (względem wlotu). Korelacyjną metodę analizy obrazu wykorzystano również do badania synchronizacji przepływu w układach wielokanałowych. Zastosowane metody analizy obrazu opierające się na analizie szumu świetlnego pozwoliły na wyodrębnienie poszczególnych cech przepływów dwufazowych na podstawie nagrań z różnych stanowisk eksperymentalnych. Przedstawione wyniki i ich analizy pokazują, że szum świetlny zawarty na zarejestrowanych filmach jest cechą reprezentatywną przepływów dwufazowych. Praca pokazuje, że przedstawione metody analizy obrazu stanowią nieinwazyjne i skuteczne narzędzie do analizy przepływów dwufazowych w mini i mikrokanałach na podstawie zarejestrowanych filmów.

Słowa kluczowe: metody analizy obrazu, przepływ dwufazowy, wrzenie w minikanałach, korelacyjne metody analizy obrazu, entropia wieloskalowa

1. WSTĘP

Praca dotyczy analizy cech przepływów dwufazowych w mini i mikrokanałach. Przepływ dwufazowy charakteryzuje się zmiennością struktur i ich dynamiki. Rejestracja takiego przepływu powinna charakteryzować się wysoką częstotliwością nagrywania i rozdzielczością, ze względu na stosowanie kanałów o coraz mniejszych rozmiarach. Wymagania te niosą za sobą szereg trudności związanych z rejestracją przepływu m.in. problemy w zapewnieniu mocnego i równomiernego oświetlenia, uzyskanie odpowiednio wysokiej rozdzielczości rejestrowanego obrazu czy dostosowanie częstotliwości nagrywania do zmian zachodzących w trakcie przepływu. Na rys. 1 pokazano przykładowe klatki filmu zarejestrowane podczas przepływów dwufazowych. Rysunek 1a pokazuje przepływ dwufazowy roztworu wodnego gliceryny i powietrza w okrągłym minikanale o średnicy 3 mm. Na rys. 1b widoczna jest klatka filmu z przepływu dwufazowego we wrzeniu w dwóch równoległych, okrągłych minikanałach o średnicy 1 mm (strumień masy wynosił G = 38,80 kg/(m^{2}s) i G = 61,65 kg/(m^{2}s). Na rys. 1c widoczny jest przepływ dwufazowy

wrzeniu w 11 prostopadłościennych mikrokanałach o wymiarach: gł. 0,25 mm, szer. 0,13 mm, dł. 32 mm. Rysunek 1d pokazuje przepływ dwufazowy we wrzeniu w trzech równoległych, prostopadłościennych minikanałach o wymiarach: 0,25 mm x 0,50 mm x 32 mm.



Rysunek 1: Przykłady klatek filmu zarejestrowanych w trakcie przepływu dwufazowego: a) roztworu wodnego gliceryny i powietrza w okrągłym minikanale, b) z wrzeniem w dwóch okrągłych minikanałach, c) z wrzeniem w 11 równoległych mikrokanałach, d) z wrzeniem w trzech prostopadłościennych minikanałach

Na podstawie rys. 1 można zauważyć, że nierównomierność oświetlenia wpływa na jakość rejestrowanego obrazu, widoczne są jaśniejsze obszary tworzone przez fronty korków pary (rys. 1d) oraz inny poziom oświetlenia środkowej części kanału w stosunku do brzegów kanału (rys. 1a). Wyzwaniem jest również dobranie rozdzielczości zdjęć, która stanowi kompromis pomiędzy taką wielkością zdjęć, aby uchwycić cały kanał, a uzyskaną jakością poszczególnych struktur przepływu. Na rys. 1a widać wyraźnie zarysowane kontury korków pary w przeciwieństwie do słabo oświetlonych małych pęcherzy. Na rys. 1c trudno dostrzec pęcherze pary, jednak dobrze widoczne są fronty korków pary.
Motywacją pracy jest opracowanie algorytmów analizy filmów, które pomimo szeregu trudności i wad związanych z rejestracją przepływu dwufazowego, umożliwią analizę jego cech i ekstrakcję istotnych informacji dotyczących charakterystyk przepływu.

2. CZĘŚĆ GŁÓWNA

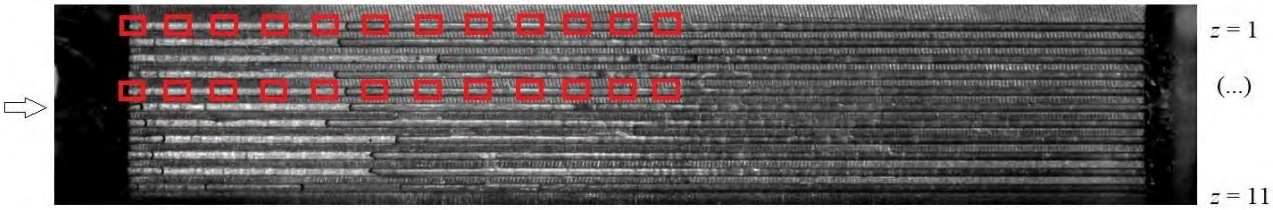
W pracy wykorzystano metody analizy obrazu, które opierają się na analizie szumu świetlnego (zmian jasności pikseli na klatkach filmu). Analiza charakterystycznych cech przepływu prowadzona jest na podstawie zmian jasności pikseli generowanych przez zachodzące zmiany fazy. Takie podejście pozwala analizować obrazy o dobrej, jak i o słabszej jakości.

2.1. Analizowane fragmenty obrazu

W celu ekstrakcji informacji na podstawie zarejestrowanych filmów przepływów dwufazowych do analizy pobierane są fragmenty obrazu zwane dalej „bramkami". Długość i szerokość analizowanych fragmentów obrazu jest dobierana w taki sposób, aby przykładowo długość bramki odpowiadała długości korka pary, a szerokość bramki obejmowała wewnętrzną średnicę kanału. Analiza przeprowadzana na podstawie bramek umożliwia badanie wybranych fragmentów obrazu z minimalizacją występujących artefaktów. Analiza wybranych fragmentów obrazu jest przeprowadzana w dwojaki sposób:

a) analiza zmian przepływu wzdłuż kanału i w czasie (bramki ustawiane w kolejnych fragmentach kanału i na kolejnych klatkach filmu),
b) analiza synchronizacji przepływu w wielu kanałach (bramki ustawiane wzdłuż kanałów, na kolejnych klatkach filmu i na kolejnych kanałach).

Rysunek 2 pokazuje dwa wspomniane sposoby analizy wybranych fragmentów kanału, bramki stosowane w analizie oznaczono na rysunku jako czerwone prostokąty.



Rysunek 2: Przykładowe analizowane fragmenty obrazu wzdłuż kanału, w czasie i w wielu kanałach oznaczone czerwonymi prostokątami, numer kanału oznaczono jako *z*

Analiza fragmentów przepływu wzdłuż kanału i w czasie pozwala uzyskać informacje o zmianach dystrybucji fazy w kanale (zmianach jasności pikseli w analizowanych fragmentach kanału) oraz o dynamice tych zmian (charakterze tych zmian w czasie). Analiza bramek położonych w wielu kanałach umożliwia identyfikację procesów synchronizacji przepływu pomiędzy w poszczególnymi kanałami. Rysunek 2 pokazuje kolejne położenia analizowanych bramek wzdłuż danego kanału (*z*) na przykładzie dwóch minikanałów (*z* = 1, *z* = 5). Analiza przeprowadzana jest na podstawie wielu kolejnych pozycji bramki dla każdego kanału osobno. Obszaranalizy w tym przypadku obejmuje niewiele ponad połowę długości kanału, z tego względu iż w pierwszej połowie długości kanału zmiany dystrybucji pary i proces wrzenia były najbardziej gwałtowne. Takie ograniczenie obszaru analizy kanału pozwala znacząco zmniejszyć złożoność czasową algorytmu.

2.2. Wybrane algorytmy analizy

Wykorzystane metody analizy obrazu można podzielić na dwie grupy: metody korelacyjne analizy obrazu oraz metody oparte na koncepcji entropii wieloskalowej. Metody korelacyjne służą do badania podobieństwa zmian struktur przepływów dwufazowych w czasie. Pozwalają one również określić czy dana struktura utrzymuje się w kanale w określonym przedziale czasu. Metody oparte na koncepcji entropii skupiają się na analizie stopnia uporządkowania zmian jasności pikseli (rozkładu faz w kanale) na danej klatce filmu. Koncepcja entropii wieloskalowej umożliwia badanie zmian dystrybucji fazy w kanale w różnych skalach czasowych, co uwzględnia gwałtowne zmiany dystrybucji fazy w kanale (związane m.in. z generacją pęcherzyków) jak również długookresowe zmiany dotyczące m.in. przepływu długich korków pary czy utrzymywania się fazy ciekłej w kanałach.
Korelacyjną metodę analizy obrazu przedstawiono w pracy (Rafałko et al., 2020). Stosowane w metodzie korelacyjnej bramki (fragmenty klatek filmu) podzielono na dwa rodzaje: bramki referencyjne oraz bramki ruchome. W trakcie analizy pobierane jest kilka serii składających się z jednej bramki referencyjnej i wielu bramek ruchomych. W algorytmie obliczany jest dwuwymiarowy współczynnik korelacji Pearsona (Równ. (1)) pomiędzy jasnościami pikseli w bramce referencyjnej, a kolejnymi bramkami ruchomymi znajdującymi się na kolejnych klatkach filmu. Zależność opisującą obliczany współczynnik korelacji (*R*) pokazano poniżej:

$$R = cor(G_r, G_m) = \frac{\sum_i \sum_j (G_r(i,j) - \overline{G_r}) * (G_m(i,j) - \overline{G_m})}{\sqrt{(\sum_i \sum_j (G_r(i,j) - \overline{G_r})^2) * (\sum_i \sum_j (G_r(i,j) - \overline{G_r})^2)}} \qquad \text{Równ. (1)}$$

gdzie G_r to macierz jasności pikseli w bramce referencyjnej, G_m to macierz jasności pikseli bramki ruchomej, *i* to indeks pikseli znajdującego się w G_r, *j* to indeks piksela znajdującego się w G_m, $\overline{Gr}$ to średnia wartość jasności pikseli w bramce referencyjnej, a , $\overline{Gm}$ to średnia wartość jasności pikseli w bramce ruchomej.

W następnym kroku badana jest różnica pomiędzy maksymalną a średnią wartością współczynnika korelacji Pearsona dla analizowanych serii bramek. W ten sposób uzyskiwana jest funkcja będąca miarą zróżnicowania zmian jasności pikseli w różnych strukturach przepływu. W kolejnym kroku algorytmu ta funkcja jest uśredniana dla analizowanego zbioru bramek ruchomych. Na podstawie uśrednionej funkcji wyznacza się dwa współczynniki: wartość funkcji dla najbliższej bramki oraz jej nachylenie. Wartość funkcji ($\bar{S}(1)$) opisuje krótkotrwałe zmiany dystrybucji fazy gazowej podczas, gdy nachylenie (α) stanowi miarę zróżnicowania dystrybucji fazy gazowej w analizowanym fragmencie. Do identyfikacji struktur przepływu wykorzystano iloraz tych współczynników, a jego rezultat oznaczono jako współczynnik V_v:

$$V_v = -\frac{\alpha}{\bar{S}(1)}, \qquad \text{Równ. (2)}$$

gdzie α to nachylenie funkcji, a $\bar{S}(1)$ to wartość funkcji dla najbliższej bramki. Metoda korelacyjna została opracowana przez autorkę pracy. Opracowano również modyfikację korelacyjnej metody analizy obrazu przeznaczoną do analizy układów wielokanałowych. Metody korelacyjne analizy obrazu zostały również zaadaptowane do analizy synchronizacji przepływu w układach wielokanałowych (Rafałko, Grzybowski, Dzienis, Mosdorf, et al., 2021).

Metoda analizy obrazu oparta na koncepcji entropii wieloskalowej pozwala analizować złożoność szeregów w różnych skalach czasowych (Costa et al., 2003; Li & Zhang, 2008). W przypadku obrazów zarejestrowanych w trakcie przepływu dwufazowego, taki szereg może stanowić szereg jasności pikseli pobrany z klatki filmu. Na klatce filmu przedstawiającej poziomy minikanał wyznacza się pas pikseli o zadanej szerokości obejmującej środkową część kanału. Ta szerokość dobierana jest w taki sposób, aby zawierała istotne cechy badanej struktury przepływu. Szereg uzyskany na podstawie klatki filmu przedstawiającej przepływ dwufazowy jest następnie poddawany operacji tworzenia tzw. „szeregu gruboziarnistego". Szereg gruboziarnisty stanowi szereg utworzony na podstawie szeregu wejściowego uzyskany poprzez uśrednianie kolejnych sekwencji punktów (liczba uśrednianych punktów szeregu zależy od wartości czynnika skalującego (τ), czyli np. dla τ = 2, każde kolejne 2 punkty szeregu są uśredniane). W kolejnym kroku algorytmu wyznaczana jest entropia nazywana *Sample Entropy* (*SampEn*). Entropia *SampEn* bada regularność skończonego szeregu czasowego. Im częstsze i bardziej regularne występowanie podobnych sekwencji w szeregu, tym wartość *SampEn* jest niższa. *SampEn* jest definiowana jako ujemny logarytm naturalny z warunkowego prawdopodobieństwa, że w szeregu o długości *N* dwie sekwencje o *m* punktach, pozostaną nadal podobne, z tolerancją *r*, jeśli będą miały *m*+1 punktów (Costa et al., 2005). W algorytmie entropii wieloskalowej, entropia wyliczana jest jako średnia wartość *SampEn* dla *k* elementów szeregu gruboziarnistego w funkcji czynnika skalującego (τ) (Równ. (3)).

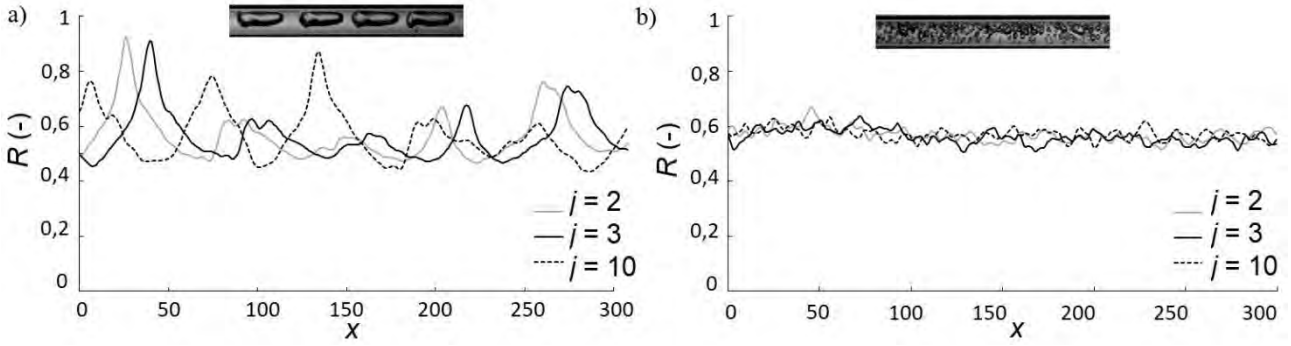
$$\mathrm{CMSE}(\mathrm{x}, \tau, \mathrm{m}, \mathrm{r}) = \frac{1}{\tau}\sum_{k=1}^{\tau} SampEn(y_k^{\tau}, m, r), \qquad \text{Równ. (3)}$$

gdzie *x* – szereg oryginalny, τ – czynnik skalujący, *m* – długość sekwencji punktów, *r* – tolerancja odległości punktów, *k* – długość szeregu gruboziarnistego *y*. W celu uzyskania pojedynczej miary opisującej charakterystykę danego przepływu stosuje się współczynnik *CI* (ang. *Complexity Index*), który stanowi pole pod funkcją entropii wieloskalowej.
W przypadku zastosowania algorytmu do analizy układów z równoległymi minikanałami dane wejściowe stanowią dane w formie macierzy, która zawiera zmiany jasności pikseli pobrane z każdego minikanału. W tym przypadku wykorzystywany jest zmodyfikowany algorytm entropii wieloskalowej (*MMSE*) (Ahmed & Mandic, 2012). Algorytmy oparte na koncepcji entropii zostały opracowane przez autorów pracy (Zhang, 1991), a jedne z ich pierwszych aplikacji zamieszczono m.in. w pracy (Costa et al., 2003). Algorytmy te zostały zaadaptowany przez autorkę pracy do analizy danych zarejestrowanych w postaci filmów przepływów dwufazowych.

2.3. Uzyskane wyniki

Dwie metody analizy obrazu – korelacyjną metodę analizy obrazu i metodę opartą na koncepcji entropii wieloskalowej zastosowano w celu wyznaczenia mapy struktur przepływu dwufazowego roztworu wodnego gliceryny i powietrza. Analizę przeprowadzono na podstawie 56 filmów zarejestrowanych przy następujących wydatkach faz: wydatek fazy ciekłej q_w = (10,76 ÷ 43,56 kg/h), wydatek fazy gazowej q_g = (0,027 ÷ 0,328 l/min). Korelacyjną analizę obrazu przeprowadzono w następujący sposób: pobrano film o długości 12100 klatek tj. 2,42 s. Dla każdego filmu rozpatrywano 12 zestawów bramek referencyjnych wyodrębnionych z klatek referencyjnych (czas pomiędzy klatkami wynosił 0,20 s) i 300 bramek ruchomych przesuwających się na każdej z dziesięciu klatek testowych (czas pomiędzy klatkami wynosił 0,002 s). Długość bramek była dobrana tak, aby mieściły one najdłuższe korki występujące w przepływie, natomiast ich wysokość odpowiadała średnicy minikanału. Zmiany współczynnika korelacji obliczanego pomiędzy bramką referencyjną a bramkami ruchomymi różniły się w zależności od analizowanej struktury przepływu (analizowanego filmu), co pokazuje rys. 3. Na rys. 3a pokazano zmiany współczynnika korelacji zaobserwowane na podstawie nagrania przedstawiającego przepływ korków powietrza. Zmiany współczynnika korelacji w tym przypadku mają charakter długookresowy

i posiadają wysoką amplitudę zmian. Natomiast zmiany współczynnika korelacji zaobserwowane w przypadku przepływu dyspersyjnego (małych pęcherzy) charakteryzują się niewielkimi oscylacjami wartości amplitudy (rys. 3b). Wymiary bramek były stałe dla wszystkich analizowanych nagrań przepływu, w celu unifikacji uzyskanych wyników i możliwości zbudowania mapy struktur przepływu.

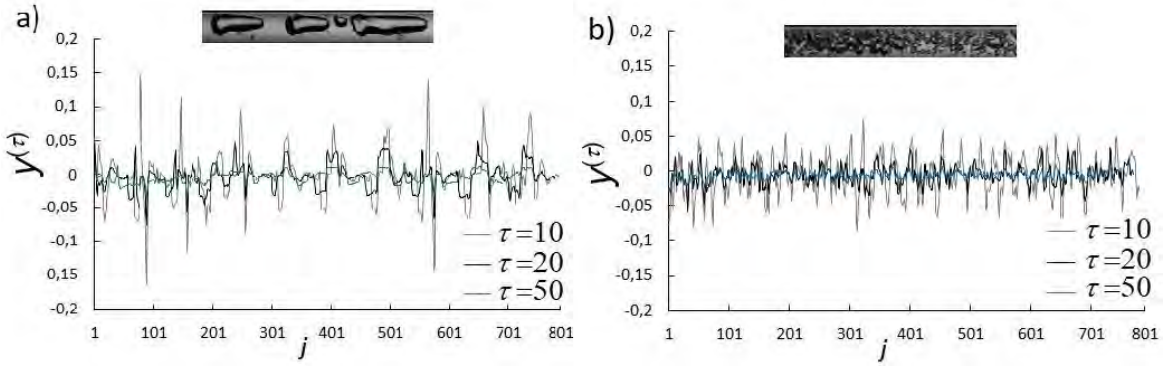


Rysunek 3: Zmiany współczynnika korelacji obliczonego pomiędzy zmianami jasności pikseli na bramce referencyjnej i klatkach testowych (j = 2,3,10) w funkcji położenia bramki ruchomej (x) wyrażonego w pikselach: a) q_w = 16,15 kg/h, q_g = 0,199 l/min, b) q_w = 43,51 kg/h, q_g = 0,156 l/min

W metodzie analizy obrazu opartej na koncepcji entropii wieloskalowej pobierano do analizy środkowy fragment minikanału pokazany na rys. 4.

Rysunek 4: Analizowany obszar klatki filmu oznaczony żółtym prostokątem w metodzie opartej na koncepcji entropii wieloskalowej.

Dane wejściowe stanowił szereg zawierający zmiany jasności pikseli w środkowym fragmencie minikanału po zastosowaniu algorytmu usuwającego trend, zsumowane w każdej kolumnie pikseli. W następnym kroku przygotowywano szeregi gruboziarniste z szeregów pobranych z pojedynczych klatek reprezentujących 56 filmów. Przykładowe szeregi gruboziarniste pokazano na rys. 5.



Rysunek 5: Szeregi gruboziarniste (y): a) q_w = 16,15 kg/h, q_g = 0,199 l/min, b) q_w = 43,44 kg/h, q_g = 0,328 l/min

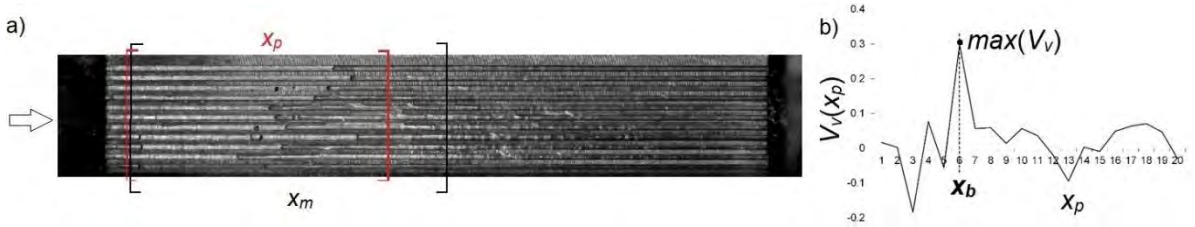
Odległości pomiędzy poszczególnymi oscylacjami oraz amplituda szeregów gruboziarnistych różnią się w zależności od analizowanej struktury (rys. 5). Najmniejsze odległości pomiędzy gwałtownymi zmianami wartości szeregu obserwowane są dla struktury minipęcherzy (rys. 5b). Większe odległości pomiędzy oscylacjami wartości odnotowano w przypadku struktury korków powietrza (rys. 5a).

Mapę struktur uzyskaną na podstawie dwóch metod analizy obrazu pokazano na rys. 6, na tle przykładowych klatek filmu reprezentujących poszczególne nagrania. Liniami żółtymi ciągłymi zaznaczono granice między strukturami przepływu uzyskane za pomocą korelacyjnej metody analizy obrazu, a liniami przerywanymi, obszary zidentyfikowane za pomocą metody opartej

na koncepcji entropii. Na mapie struktur wyróżniono strukturę połączonych korków, strukturę korków powietrza i dłuższych pęcherzy, strukturę pęcherzykową i strukturę dyspersyjną (bardzo małych pęcherzy). Dodatkowo, na podstawie metody analizy opartej na koncepcji entropii, wyróżniono strukturę dyspersyjną o większych i mniejszych pęcherzykach.

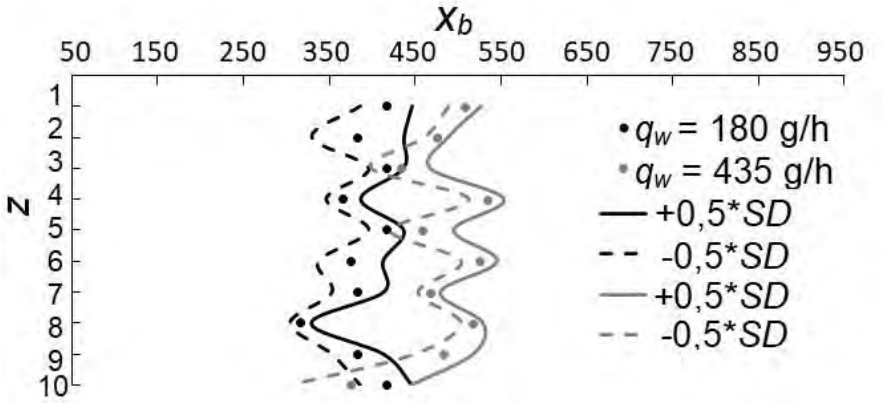
Rysunek 6: Mapa struktur przepływu uzyskana na podstawie korelacyjnej metody analizy (linie żółte ciągłe) i na podstawie metody analizy opartej na koncepcji entropii (linie żółte przerywane)

Korelacyjna metoda analizy obrazu pozwala wykryć zmiany rozkładu faz w czasie, natomiast metoda oparta na koncepcji entropii służy do analizy rozkładu danej fazy na danej klatce filmu. Pomimo występujących różnic w działaniu obu metod analizy na uzyskanej mapie struktur widocznej na rys. 6 nie widać znaczących różnic pomiędzy granicami struktur wyznaczonymi dwiema metodami analizy obrazu. W tym eksperymencie analizowano stany stacjonarne (ustalone) – nagranie rozpoczynano po ustaleniu się wydatków fazy ciekłej i gazowej. Dlatego, w przypadku tych danych, rozkład fazy na danej klatce analizowany za pomocą metody opartej na koncepcji entropii był reprezentatywny do identyfikacji struktury przepływu. Natomiast, w przypadku badania stanów niestacjonarnych, różnice pomiędzy korelacyjną metodą analizy obrazu i metodą opartą na koncepcji entropii uwidocznią się. Wówczas, ewolucja w czasie struktury przepływu (badana za pomocą korelacyjnej metody analizy obrazu) będzie inna niż rozkład faz na danej klatce filmu (badany z użyciem entropii wieloskalowej).
Modyfikacje korelacyjnej metody analizy obrazu i metody analizy opartej na koncepcji entropii wykorzystano w celu identyfikacji fragmentu kanału, w którym zachodzą najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary w 11 równoległych mikrokanałach (rys. 1c). Przedmiotem zainteresowań była zmiana struktury przepływu wzdłuż kanału, dlatego oba typy bramek (referencyjna i ruchoma) były przesuwane wzdłuż kanałów. Szczegółowy opis modyfikacji korelacyjnej metody analizy obrazu przedstawiono w pracy (Rafałko, Grzybowski, Dzienis, & Mosdorf, 2021). Obliczenia były prowadzone dla 100 zestawów składających się z 1 klaki referencyjnej i następujących po niej 30-stu klatek testowych, uwzględniając wszystkie możliwe położenia wyodrębnianych z nich bramek. Wysokość bramki obejmowała całą wysokość kanału, a szerokość bramki odpowiadała długości pięciu pęcherzy lub krótkiego korka. Fragment kanału, w którym zachodziły najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary oznaczony jako x_b w każdym z mikrokanałów identyfikowano jako takie położenie bramki referencyjnej (x_p), dla którego zaproponowany w tej metodzie współczynnik V_v (Równ. (2)) osiągał wartość maksymalną. Przykładowe zmiany współczynnika V_v w funkcji położenia bramki referencyjnej (x_p) pokazano na rys. 7b, a zakres pozycji bramek referencyjnych (x_p) i bramek ruchomych (x_m) na rys. 7a.



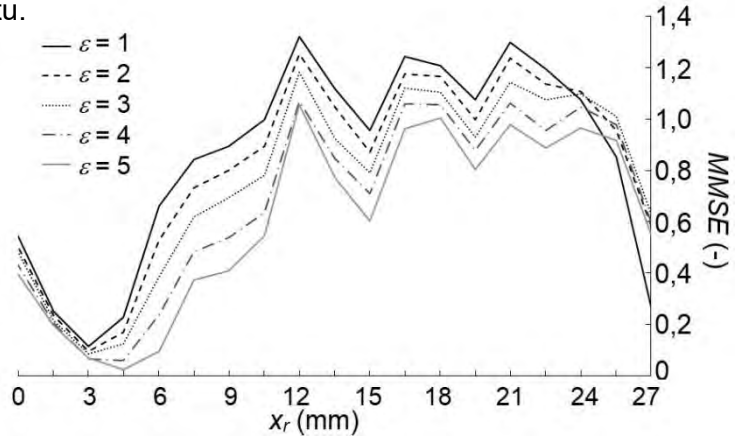
Rysunek 7: Modyfikacja korelacyjnej metody analizy obrazu służąca do identyfikacji fragmentu kanału, w którym zachodziły najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary: a) zakres analizy i pozycji bramek, b) zmiany współczynnika V_v w funkcji bramki referencyjnej

Zidentyfikowane fragmenty kanałów, w których zachodziły najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary wraz z odchyleniem standardowym pokazano na rys. 8. Fragmenty kanałów oznaczone punktami na rys. 8 odpowiadają położeniu bramki referencyjnej.



Rysunek 8: Fragmenty kanałów (*z*), w których zachodziły najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary (x_b) dla przepływów o różnych wydatkach wody (q_w) oznaczono punktami, linią przerywaną i ciągłą oznaczono odchylenia standardowe

Modyfikacja metody opartej na koncepcji entropii wieloskalowej polegała na umieszczeniu bramki wzdłuż kanału i przesuwaniu jej na kolejne pozycje. Długość bramki odpowiadała długości krótkiego korka pary lub dwóch pęcherzy. Badano stopień uporządkowania zmian jasności pikseli wszystkich 11 mikrokanałów dla 12 położeń bramki w każdym kanale. Identyfikację fragmentu kanału, w których zachodziły najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary z użyciem algorytmu wielowymiarowej entropii wieloskalowej (*MMSE*) przeprowadzono w przedziale od 0 do 660 pikseli (od 0 mm do 16,5 mm) od wlotu (mikrokanały miały długość 32 mm). Parametry wielowymiarowej entropii wieloskalowej zostały dobrane w taki sposób, aby rejestrować zmiany zachodzące w małym przedziale zmian jasności pikseli. Tym samym uwzględniać w tej analizie niewielkie zmiany jasności pikseli związane z występowaniem pęcherzy przemieszczających się z dużą prędkością. Parametry te były stałe dla każdej analizowanej kolumny danych (każdego kanału *z*). Na rys. 9 pokazano zmiany wielowymiarowej entropii wieloskalowej w funkcji położenia bramki (x_r). Analiza wartości *MMSE* w funkcji skali czasowych (ε) opisuje zmiany jasności pikseli zachodzące w różnych skalach czasowych: krótkookresowe dla małych wartości ε oraz długookresowe dla wysokich wartości ε. Maksimum *MMSE* na rys. 9 wskazuje na obszar, w którym zmiany dystrybucji pary (zmiany jasności pikseli) są najbardziej gwałtowne. Ponieważ w dalszej części kanału, następuje spadek wartości entropii wieloskalowej, dlatego można przypuszczać, że od punktu wyznaczonego przez maksymalną wartość *MMSE* przepływ obu faz odbywa się w kierunku wylotu.

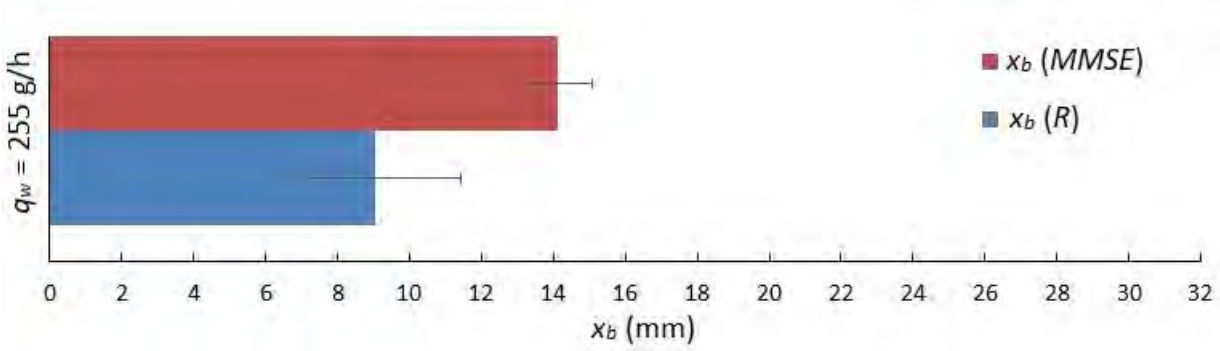


Rysunek 9: Funkcje *MMSE* uzyskane dla kolejnych skali czasowych (ε) w funkcji pozycji bramki (x_r)

Uśredniona pozycja bramki x_r (dla wszystkich skali czasowych ε), dla której funkcja *MMSE* przyjmuje wartość maksymalną, jest fragmentem kanału, w którym zachodziły najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary – x_b. W algorytmie wyznaczano maksimum każdej funkcji *MMSE* i odpowiadającą mu pozycję bramki (x_r). W przypadku pokazanym na rys. 9 wartości

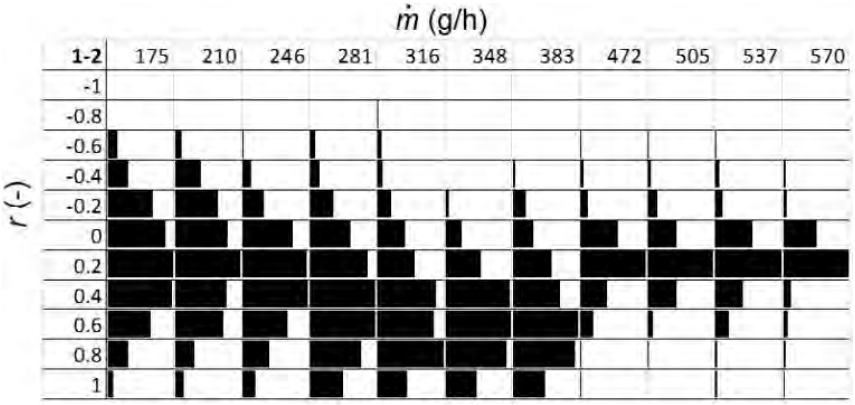
maksimum *MMSE* wahały się od 1,0 do 1,3 za każdym razem jednak występowało ono dla pozycji bramki x_r = 12,0 mm od wlotu.

W celu porównania wyników uzyskanych za pomocą obu metod analizy obrazu, zidentyfikowano fragmenty kanałów, w których zachodziły najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary w przepływie o wydatku wody q_w = 255 g/h. W przypadku korelacyjnej metody analizy obrazu wyniki uśredniono dla wszystkich kanałów, a w przypadku metody opartej na koncepcji entropii wyniki uśredniono dla skali czasowych (maksimum *MMSE* dla różnych skali czasowych występowało często dla różnych, ale zbliżonych pozycji bramki). Rezultaty pokazano na rys. 10, na którym słupki wskazują na fragmenty wymiennika, w których występowały najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary (x_b). Na słupkach naniesiono również odchylenia standardowe. Oś odciętych na rys. 10 odpowiada całej długości wymiennika (32 mm). Zidentyfikowane fragmenty kanałów, w których zachodziły najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary wyznaczone za pomocą korelacyjnej metody analizy obrazu $x_b(R)$ są usytuowane bliżej wlotu o ok. 2-6 mm niż pozycje uzyskane za pomocą metody opartej na koncepcji entropii – $x_b(MMSE)$ (rys. 10).
Podsumowując charakterystykę obu metod można stwierdzić, iż korelacyjna metoda analizy obrazu stanowi narzędzie do stosunkowo szczegółowego wyznaczania fragmentu wymiennika, w którym zachodzą najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary (osobno w każdym kanale). Wynik uzyskany dla całego wymiennika za pomocą korelacyjnej metody analizy obrazu obarczony jest większym błędem niż w przypadku metody opartej na koncepcji entropii (rys. 10). Za pomocą *MMSE* możliwa jest identyfikacja obszaru wymiennika, od którego przepływ obu faz odbywa się tylko w kierunku wylotu. Można zatem wnioskować, iż korelacyjna metoda analizy obrazu wyznacza początkowy fragment wymiennika, w którym zachodzą najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary, natomiast *MMSE* służy do określenia jego maksymalnego położenia (względem wlotu).



Rysunek 10: Fragmenty wymiennika, w których zachodzą najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary odpowiadające położeniu bramki referencyjnej (x_b) wyznaczone za pomocą korelacyjnej metody analizy obrazu ($x_b(R)$) i za pomocą wielowymiarowej entropii wieloskalowej ($x_b(MMSE)$), wraz z naniesionym odchyleniem standardowym

Korelacyjną metodę analizy obrazu wykorzystano również do badania synchronizacji rozkładu faz w układzie z trzema równoległymi minikanałami (rys. 1d). W tym celu analizowano zmiany jasności pikseli w bramkach oddalonych o 2 mm i 6 mm od wlotu położonych w każdym z trzech minikanałów. Korelację pomiędzy zmianami jasności w każdym z kanałów wyznaczano w oknie czasowym równym 0,1 s. W ten sposób uzyskano szeregi czasowe zmian jasności pikseli, na podstawie których wyznaczono zmiany współczynników korelacji w czasie. Na podstawie zmian współczynników korelacji w czasie wyznaczono histogramy wartości współczynników korelacji obliczonych pomiędzy zmianami jasności dla każdej pary minikanałów. Przykładowe histogramy uzyskane na podstawie zmian wartości współczynnika korelacji obliczonego pomiędzy zmianami jasności w dwóch kanałach, w bramkach położonych bliżej wlotu pokazano na rys. 11. Asymetria histogramów (przesunięcie wartości współczynnika korelacji w kierunku wartości dodatnich) wskazywała na występowanie synchronizacji struktur w analizowanych przedziałach czasu. Pokazano, że tego typu synchronizacja występuje, gdy w kanałach odbywa się przepływ krótkich korków pary. Przeprowadzoną analizę i opis rezultatów umieszczono w pracy (Rafałko, Grzybowski, Dzienis, Mosdorf, i in., 2021).



Rysunek 11: Histogramy współczynnika korelacji (*r*) w funkcji wydatku wody ($\dot{m}$)

W celu potwierdzenia uzyskanych wyników przeprowadzono analizę rekurencyjną (*The Cross Recurrence Plot*) zmian w czasie szumu świetlnego pobranego ze środkowej części każdego z minikanałów. Wyniki analiz umieszczono w pracy wysłanej do czasopisma *The European Physical Journal Special Topics*, w której potwierdzono występowanie synchronizacji przepływu dla przepływów pokazanych na rys. 11. Pokazano również, że synchronizacja przepływu negatywnie wpływa na oscylacje temperatury i ciśnienia na wlocie i wylocie do minikanałów, powodując zwiększanie amplitudy oscylacji.

3. WNIOSKI

W pracy pokazano zastosowanie metod analizy obrazu do badania przepływów dwufazowych w mini i mikrokanałach. Metody te opierają się na analizie szumu świetlnego (zmian jasności pikseli na klatkach filmu) w kanale. Dane pobierane do analizy były w formie zarejestrowanych filmów przepływów dwufazowych z różnych stanowisk eksperymentalnych. Stosując korelacyjną metodę analizy obrazu i metodę opartą na koncepcji entropii, utworzono mapę struktur przepływu dwufazowego. Korelacyjna metoda analizy obrazu, opracowana przez autorkę pracy, służy do badania podobieństwa zmian struktur przepływów dwufazowych w czasie. Metoda oparta na koncepcji entropii wieloskalowej, zaadaptowana przez autorkę pracy, służy do analizy stopnia uporządkowania zmian jasności pikseli na danej klatce filmu. Stosując modyfikacje obu metod zidentyfikowano fragmenty kanałów, w których zachodziły najbardziej gwałtowne zmiany dystrybucji pary na podstawie filmów przepływu dwufazowego we wrzeniu. Odnotowano, że korelacyjna metoda analizy obrazu wyznacza początkowy fragment kanału o najbardziej gwałtownych zmianach dystrybucji pary, natomiast metoda oparta na koncepcji entropii wieloskalowej służy do określenia jego maksymalnego położenia (względem wlotu). Korelacyjną metodę analizy obrazu zastosowano również do badania synchronizacji przepływu w układzie wielokanałowym we wrzeniu. Przedstawione wyniki i ich analizy pokazują, że szum świetlny zawarty na zarejestrowanych filmach jest cechą reprezentatywną przepływów dwufazowych. W zaprezentowanych metodach analizy obrazu istotnym jest również dobór takich parametrów jak: wielkość analizowanego obszaru, częstotliwość próbkowania danych (pobranych do analizy) czy sposób ich uśredniania.

PODZIĘKOWANIA

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o numerze: UMO-2017/27/B/ST8/02905, Narodowe Centrum Nauki, Polska.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr WI/WM-IIM/6/2021 w Politechnice Białostockiej i sfinansowane z subwencji badawczej przekazanej przez Ministra Edukacji i Nauki.

ODNIESIENIA

Ahmed, M. U., Mandic, D. P. 2012. Multivariate Multiscale Entropy Analysis. *IEEE Signal Processing Letters*, *19*(2), 91–94.

Costa, M., Goldberger, A. L., Peng, C.-K. 2005. Multiscale entropy analysis of biological signals. *Physical Review E*, *71*(2), 021906.

Costa, M., Peng, C.-K., L. Goldberger, A., Hausdorff, J. M. 2003. Multiscale entropy analysis of human gait dynamics. *Physica A*, *330*(1–2), 53–60.

Li, Z., Zhang, Y.-K. 2008. Multi-scale entropy analysis of Mississippi River flow. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *22*(4), 507–512.

Rafałko, G., Grzybowski, H., Dzienis, P., Mosdorf, R. 2021. An image analysis method for determining boiling front in minichannel heat exchanger. *E3S Web of Conferences*, *321*, 01006.

Rafałko, G., Grzybowski, H., Dzienis, P., Mosdorf, R., Adamowicz, A. 2021. Image Analysis of Flow Maldistribution during Boiling in Parallel Minichannels. *Chemical Engineering & Technology*, *44*(11), 1978–1985.

Rafałko, G., Mosdorf, R., Górski, G. 2020. Two-phase flow pattern identification in minichannels using image correlation analysis. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *113*, 104508.

Zhang, Y.-C. 1991. Complexity and 1/f noise. A phase space approach. *Journal de Physique. I (Les Ulis)*, *1*(7), 971–977.