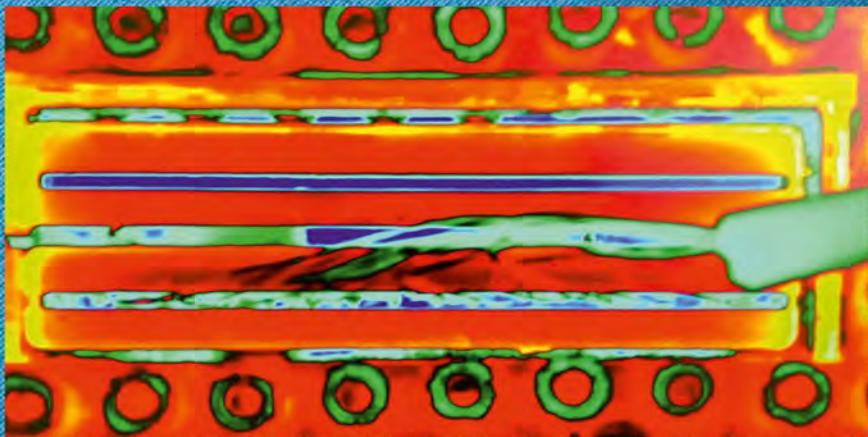


**MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY**

**M119**

**Magdalena Piasecka**

**WYMIANA CIEPŁA  
PODCZAS WRZENIA W PRZEPŁYWIE  
W MINIPRZESTRZENIACH  
O ZRÓŻNICOWANEJ GEOMETRII**



**Politechnika Świętokrzyska**  
Kielce 2019

**MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY**

**M119**

**Magdalena Piasecka**

**WYMIANA CIEPŁA  
PODCZAS WRZENIA W PRZEPŁYWIE  
W MINIPRZESTRZENIACH  
O ZRÓŻNICOWANEJ GEOMETRII**

Kielce 2019

**MONOGRAFIE, STUDIA, ROZPRAWY NR M119**

**Redaktor Naukowy serii**

**INŻYNIERIA MECHANICZNA**

prof. dr hab. inż. Tomasz Lech STAŃCZYK

**Recenzenci**

prof. dr hab. inż. Tadeusz BOHDAL

prof. dr hab. inż. Andrzej FRĄCKOWIAK

**Redakcja**

Irena IMIOŁEK

**Projekt okładki**

Tadeusz UBERMAN

© Copyright by Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2019

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana  
czy rozpowszechniana w jakiekolwiek formie, w jakikolwiek sposób:  
elektroniczny bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiowaniem, nagrywaniem  
na taśmy lub przy użyciu innych systemów, bez pisemnej zgody wydawcy.

PL ISSN 1897-2691

PL ISBN 978-83-65719-61-4

Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej  
25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7  
tel./fax 41 34 24 581  
e-mail: [wydawca@tu.kielce.pl](mailto:wydawca@tu.kielce.pl)  
[www.wydawnictwo.tu.kielce.pl](http://www.wydawnictwo.tu.kielce.pl)

# S p i s t r e ś c i

---

Przedmowa .....	5
Wykaz ważniejszych oznaczeń .....	7
<b>1. WSTĘP.....</b>	<b>11</b>
<b>2. ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z TEMatyką MONOGRAFII .....</b>	<b>13</b>
2.1. Podstawowe pojęcia i ich znaczenie .....	13
2.2. Klasyfikacja kanałów .....	14
2.3. Charakterystyka wrzenia podczas przepływu .....	15
2.4. Wrzenie na powierzchniach rozwiniętych .....	17
2.5. Przegląd badań .....	18
2.5.1. Informacje ogólne .....	18
2.5.2. Badania prowadzone w polskich ośrodkach naukowych .....	20
2.5.3. Zastosowanie grzejnych powierzchni rozwiniętych podczas wrzenia przepływającego płynu .....	23
<b>3. BADANIA EKSPERYMENTALNE .....</b>	<b>25</b>
3.1. Cel eksperymentów i analiza wyników badań .....	25
3.2. Główne obiegi i systemy realizowane na stanowiskach badawczych .....	25
3.3. Moduły testowe z miniprzestrzeniami .....	34
3.3.1. Moduły prostokątne .....	34
3.3.2. Moduł pierścieniowy .....	44
3.3.3. Moduł kwadratowy z zestawem minikanałów .....	48
3.4. Metodyka badań .....	51
3.4.1. Metody pomiaru temperatury powierzchni grzejnej .....	52
3.4.2. Charakterystyka kluczowych elementów aparatury oraz błędów pomiarowych .....	54
<b>4. WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEJMOWANIA CIEPŁA PRZY WRZENIU W PRZEPŁYWE PRZEZ MINIPRZESTRZENIE .....</b>	<b>58</b>
4.1. Postawienie zagadnienia .....	58
4.2. Zagadnienia jednowymiarowe .....	62
4.2.1. Moduł testowy z minikanałem o przekroju prostokątnym .....	62
4.2.2. Moduł testowy z miniprzestrzenią pierścieniową .....	68
4.3. Zagadnienia dwuwymiarowe .....	71
4.3.1. Postawienie zagadnienia i założenia .....	71
4.3.2. Wybrane metody rozwiązań zagadnień dwuwymiarowych .....	72

4.3.3. Wyznaczanie współczynnika przejmowania ciepła w minikanałach o przekroju prostokątnym .....	73
4.3.4. Wyznaczanie współczynnika przejmowania ciepła w miniprzestrzeni o przekroju pierścieniowym .....	80
<b>5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA .....</b>	<b>83</b>
5.1. Uwagi ogólne .....	83
5.2. Moduł testowy z minikanałami o przekroju prostokątnym .....	84
5.2.1. Współczynnik przejmowania ciepła .....	84
5.2.2. Krzywe wrzenia .....	93
5.2.3. Wpływ rozwinięcia powierzchni grzejnej, położenia przestrzennego miniprzestrzeni, strumienia masy przepływu, ciśnienia, czynnika wrzącego oraz parametrów geometrycznych modułu testowego na intensyfikację wymiany ciepła przy wrzeniu .....	100
5.2.4. Struktury przepływu .....	124
5.2.5. Niestabilności przepływu i ciśnienia .....	131
5.3. Moduł testowy z miniprzestrzenią o przekroju pierścieniowym .....	136
5.4. Moduł testowy z zespołem minikanałów .....	149
5.5. Zastosowanie wybranych elementów analizy statystycznej do walidacji wyników .....	155
5.5.1. Charakterystyka metod IRT, LCT i wykorzystujących termopary oraz dokładność pomiaru temperatury .....	156
5.5.2. Analiza porównawcza wyników pomiarów temperatury powierzchni otrzymanych wybranymi metodami .....	160
5.5.3. Błąd wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła .....	169
5.5.4. Analiza porównawcza współczynnika przejmowania ciepła wyznaczonego za pomocą modeli 1D i 2D .....	175
5.5.5. Porównanie wyników uzyskanych z obliczeń metodą Trefftza i programami ADINA i ANSYS CFX .....	188
5.5.6. Porównanie wyników z wynikami innych badaczy .....	191
<b>6. PODSUMOWANIE .....</b>	<b>199</b>
Załącznik. Własności fizyczne czynników roboczych i materiałów grzejników .....	201
Literatura .....	203
Streszczenie .....	223
Summary .....	225

## Literatura

---

- Alifanow, O. (1994). *Inverse heat transfer problems*. Springer-Verlag, Berlin.
- Arendarski, J. (2006). *Niepewność pomiarów*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Balasubramanian, P., i Kandlikar, S.G. (2005). Experimental study of flow patterns, pressure drop, and flow instabilities in parallel rectangular minichannels. *Heat Transfer Engineering*, 26(3), 20–27.
- Baughn, J.W., Anderson, M.R., Mayhew, J.E., i Wolf, J.D. (1999). Hysteresis of thermochromic liquid crystal temperature measurement based on hue. *Journal of Heat Transfer*, 121(4), 1067–1072.
- Bertsch, S.S., Groll, E.A., i Garimella, S.V. (2009). A composite heat transfer correlation for saturated flow boiling in small channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7–8), 2110–2118.
- Bilicki, Z. (1997). The relation between the experiment and theory for nucleate forced boiling. *Proc. 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, 2-6.06.1997, Brussels, Belgium, 571–578.
- Błasiak, S., Musiał, T., Piasecka, M., i Strąk, K. (2016). Thermal stresses in the heated wall of the minichannel. *Measurement Automation Monitoring*, 62(1), 22–25.
- Bohdal, T. (2001a). Development of bubbly boiling in channel flow. *Experimental Heat Transfer*, 4, 199–215.
- Bohdal, T. (2001b). *Zjawiska wrzenia pęcherzykowego czynników chłodniczych*. Monografia, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- Bohdal, T. (2006). *Przyczyny niesabilności przemian fazowych czynników energetycznych*. Monografia, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- Bohdal, T. (2010). Bubbly boiling of environment-friendly refrigerating media. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21, 449–455.
- Bohdal, T. (2017). Bubble boiling in flow of refrigerating media. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 1(41)(1), 57–64.
- Bohdal, T., Charun, H., Czapp, M., i Dutkowski, K. (1999). *Wrzenie perspektywicznych czynników w parownikach chłodniczych*. Monografia, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- Bohdal, T., Charun, H., i Sikora, M. (2011). Comparative investigations of the condensation of R134a and R404A refrigerants in pipe minichannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 1963–1974.
- Bohdal, T., Charun, H., i Sikora, M. (2015a). Empirical study of heterogeneous refrigerant condensation in pipe minichannels. *International Journal of Refrigeration*, 59, 210–223.

- Bohdal, T., Charun, H., Sikora, M., i Flis, M. (2012). Condensation of R407C refrigerant in a single pipe minichannels. *Proc. XIV International Symposium on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy HTRSE-2012, 6-9.09.2012, Międzyzdroje, Poland*, 303–310. Wydawnictwo Uczelniane ZUT, Szczecin.
- Bohdal, T., i Rasmus, A. (1999). Badanie wrzenia w przepływie proekologicznych czynników chłodniczych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 1, 123–136.
- Bohdal, T., Sikora, M., Widomska, K., i Radchenko, A.M. (2015b). Investigation of flow structures during HFE-7100 refrigerant condensation. *Archives of Thermodynamics*, 36(4), 25–34.
- Bohdal, T., Widomska, K., i Sikora, M. (2016). The analysis of thermal and flow characteristics of the condensation of refrigerant zeotropic mixtures in minichannels. *Archives of Thermodynamics*, 37(2), 41–69.
- Brauner, N., i Moalem-Maron, D. (1992). Identification of the range of small diameter conduits regarding two-phase flow pattern transitions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 19, 29–39.
- Brutin, D., i Tradist, L. (2004). Pressure drop and heat transfer analysis of flow boiling in a minichannel: influence of the inlet condition on two-phase flow stability. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2365–2377.
- Calibration certificate No. K1501035, Calibration laboratory No. 2372, accredited by Czech accreditation Institute under ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 for: Calibration of non-contact temperature measuring instruments.*
- Cengel, Y. A., Cimbala, J. M., i Turner, R. H. (2001). *Fundamentals of thermal-fluid sciences* McGraw-Hil Education, New York.
- Chatys, R., Depczyński, W., i Żórawski, W. (2008). Sposób wytwarzania struktur porowatych. Patent RP nr PL 199720 B1.
- Ciałykowski, M., i Frąckowiak, A. (2000). *Funkcje cieplne i ich zastosowanie do rozwiązywania zagadnień przewodzenia ciepła i mechaniki*. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Ciałykowski, M.J., i Grysa, K. (2010). Trefftz method in solving the inverse problems. *Journal of Inverse and Ill-posed Problems*, 18, 595–616.
- Cieśliński, J.T. (2011). Flow and pool boiling on porous coated surfaces. *Reviews in Chemical Engineering*, 27(3–4), 179–190.
- Cieśliński, J.T., i Kaczmarczyk, T.Z. (2014). Pool boiling of nanofluids on rough and porous coated tubes: Experimental and correlation. *Archives of Thermodynamics*, 35(2), 3–20.
- Cieśliński, J.T., i Kaczmarczyk, T.Z. (2015). Pool boiling of water – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and water – Cu nanofluids outside porous coated tubes. *Heat Transfer Engineering*, 35, 553–563.
- Cieśliński, J.T., i Krasowski, K. (2013). Heat transfer during pool boiling of water, methanol , and R141b on porous coated horizontal tube bundles. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 20(2), 165–177.

- Collatz, L. (1960). *Metody numeryczne rozwiązywania równań różniczkowych*. PWN, Warszawa.
- Collings, P.J. (1990). *Liquid crystals. Nature's delicate phase of matter*. Princeton University Press, Princeton.
- Cooper, M.G. (1984). Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling – a wide ranging examination using reduced properties. *Advances in Heat Transfer*, 16, 157–239.
- Czaki Thermo-Product. (2018). <https://www.czaki.pl/en/catalogue>
- Dawidowicz, B., i Cieśliński, J. T. (2012). Heat transfer and pressure drop during flow boiling of pure refrigerants and refrigerant/oil mixtures in tube with porous coating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2549–2558.
- Deng, D., Wan, W., Shao, H., Tang, Y., Feng, J., i Zeng, J. (2015). Effects of operation parameters on flow boiling characteristics of heat sink cooling systems with reentrant porous microchannels. *Energy Conversion and Management*, 96, 340–351.
- Depczyński, W., i Kaniowski, R. (2010). Wybrane aspekty technologii wytwarzania i zastosowania spiekanych proszkowych struktur porowatych. *Logistyka*, 6, 1231–5478.
- Depczyński, W., Piasecki, A., Piasecka, M., i Strąk, K. (2017). Impact of Fe powder sintering and soldering in production of porous heating surface on flow boiling heat transfer in minichannels. *E3S Web of Conferences*, 19, No. 03012, 6 pages.
- Dominiczak, P.R., i Cieśliński, J.T. (2008). Circumferential temperature distribution during nucleate pool boiling outside smooth and modified horizontal tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 173–177.
- Dutkowski, K. (2008). Single phase pressure drop in minichannels. *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery*, 121, 17–32.
- Dutkowski, K. (2009). Two-phase pressure drop of air–water in minichannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5185–5192.
- Dutkowski, K. (2010a). Influence of the flashing phenomenon on the boiling curve of refrigerant R134a in minichannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(5–6), 1036–1043.
- Dutkowski, K. (2010b). Pomiary oporów przepływu jednofazowego w minikanałach. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 56(5), 503–506.
- Dutkowski, K. (2011). *Wymiana ciepła i opory przepływu czynników jedno i dwufazowych w minikanałach*. Monografia, nr 192, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- Frąckowiak, A., Botkin, N.D., Ciałkowski, M., i Hoffmann, K.-H. (2010). A fitting algorithm for solving inverse problems of heat conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(9–10), 2123–2127.

- Frąckowiak, A., i Ciałkowski, M. (2018). Application of discrete Fourier transform to inverse heat conduction problem regularization. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 28(1), 239–253.
- Frąckowiak, A., Ciałkowski, M., i Wróblewska, A. (2012). Iterative algorithms for solving inverse problems of heat conduction in multiply connected domains. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(4), 744–751.
- Frąckowiak, A., von Wolfersdorf, J., i Ciałkowski, M. (2015). An iterative algorithm for the stable solution of inverse heat conduction problems in multiply-connected domains. *International Journal of Thermal Sciences*, 96, 268–276.
- Futakiewicz, S. (1999). *Metoda funkcji cieplnych do rozwiązywania prostych i odwrotnych zagadnień przewodnictwa ciepła*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Pojazdów, Poznań.
- Główny Urząd Miar. (1999). *Wyrażanie Niepewności Pomiaru. Przewodnik*.
- Górski, G., Litak, G., i Mosdorff, R. (2015). Dynamics of two-phase flow through a minichannel: Fourier and Multiscale Entropy Analyses. *Applied Mechanics and Materials*, 791, 217–223.
- Grabas, B. (2015a). An evaluation of the use of laser-vibration melting to increase the surface roughness of metal objects. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60(1), 33–39.
- Grabas, B. (2015b). Vibration-assisted laser surface texturing of metals as a passive method for heat transfer enhancement. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 499–508.
- Grabowski, M., Hożejowska, S., Pawińska, A., Poniewski, M. E., i Wernik, J. (2018). Heat transfer coefficient identification in mini-channel flow boiling with the hybrid Picard-Trefftz method. *Energies*, 11(8), No. 2057, 13 pages.
- Grysa, K. (2010). *Funkcje Trefftza i ich zastosowania w rozwiązywaniu zagadnień odwrotnych*. Monografie, studia, rozprawy, nr M13, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- Grysa, K., Hożejowska, S., i Maciejewska, B. (2012a). Adjustment calculus and Trefftz functions applied to local heat transfer coefficient determination in a minichannel. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 50(4), 1087–1096.
- Grysa, K., Maciąg, A., i Adamczyk-Krasa, J. (2014). Trefftz functions applied to direct and inverse non-Fourier heat conduction problems. *Journal of Heat Transfer. Transactions of the ASME*, 136(9), No. 091302, 9 pages.
- Grysa, K., Maciąg, A., i Pawińska, A. (2012b). Solving nonlinear direct and inverse problems of stationary heat transfer by using Trefftz functions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 7336–7340.
- Grysa, K., i Maciejewska, B. (2013). Trefftz functions for non-stationary problems. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 51(2), 251–264.

- Grzybowski, H., i Mosdorf, R. (2014). Dynamics of pressure oscillations in flow boiling and condensation in the minichannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 73, 500–510.
- Handbook of Thermochromic Liquid Crystal Technology*. (2014). Hallcrest. <https://www.hallcrest.com/support-documentation/entryid/520?page=2>.
- Harirchian, T., i Garimella, S. V. (2010). A comprehensive flow regime map for microchannel flow boiling with quantitative transition criteria. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(13–14), 2694–2702.
- Hay, J.L., i Hollingsworth, D.K. (1998). Calibration of micro-encapsulated liquid crystals using hue angle and a dimensionless temperature. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 18(3), 251–257.
- Herrera, I. (2000). Trefftz method: A general theory, numerical methods for partial differential equations. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 16(6), 561–580.
- Holman, J.P. (1989). *Experimental methods for engineers*. McGraw-Hill, New York.
- Hożejowska, S. (2015). Homotopy Perturbation method combined with Trefftz method in numerical identification of temperature fields in flow boiling. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 53(4), 969–980.
- Hożejowska, S., Hozejowski, L., i Piasecka, M. (2017a). Radial basis functions in mathematical modelling of flow boiling in minichannels. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 143, No. 02037, 5 pages.
- Hożejowska, S., Kaniowski, R., i Poniewski, M.E. (2014a). Application of adjustment calculus to the Trefftz method for calculating temperature field of the boiling liquid flowing in a minichannel. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 24(4), 811–824.
- Hożejowska, S., Kaniowski, R.M., i Poniewski, M.E. (2016a). Experimental investigations and numerical modeling of 2D temperature fields in flow boiling in minichannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 78, 18–29.
- Hożejowska, S., Maciejewska, B., i Piasecka, M. (2014b). *Zastosowanie funkcji Trefftza do wyznaczania pól temperatury i współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie*. Monografie, studia, rozprawy, nr 62, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- Hożejowska, S., Maciejewska, B., i Poniewski, M.E. (2016b). Numerical analysis of boiling two-phase flow in mini- and microchannels. W *Encyclopedia of Two-Phase Heat Transfer and Flow I, Fundamentals and Methods*, vol. 4: *Special Topics in Pool and Flow Boiling*, Chapter VI, 131–162, Thome J.R. (Red.), World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Hożejowska, S., Musiał, T., i Piasecka, M. (2016c). Heat transfer coefficient for flow boiling in an annular mini gap. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 114, No. 02042, 6 pages.

- Hożejowska, S., i Piasecka, M. (2014a). Equalizing calculus in Trefftz method for solving two-dimensional temperature field of FC-72 flowing along the minichannel. *Heat and Mass Transfer*, 50(8), 1053–1063.
- Hożejowska, S., i Piasecka, M. (2014b). Numerical modelling of temperature fields in the flow boiling liquid through a vertical minichannel with an enhanced heating surface. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 67, No. 02038, 7 pages.
- Hożejowska, S., i Piasecka, M. (2014c). Trefftz method in numerical modeling of temperature fields in the flow boiling in a minichannel. *Proc. 15th Int. Conf. Heat Transfer and Renewable Sources of Energy HTRSE-2014, 10-13.09.2014, Międzyzdroje, Poland*, 227–234.
- Hożejowska, S., i Piasecka, M. (2018). The application of Fourier transform to the identification of temperature distribution in HFE-7100 flow boiling in an annular minigap. *MATEC Web of Conferences*, 240, No. 01012, 5 pages.
- Hożejowska, S., Piasecka, M., i Hozejowski, L. (2015). Two dimensional heat transfer problem in flow boiling in a rectangular minichannel. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 92, No. 02023, 7 pages.
- Hożejowska, S., Piasecka, M., i Piasecki, A. (2017b). Trefftz method in solving Fourier-Kirchhoff equation for two-phase flow boiling in a vertical rectangular minichannel. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 143, No. 02038, 4 pages.
- Hożejowska, S., Piasecka, M., i Poniewski, M.E. (2009). Boiling heat transfer in vertical minichannels. Liquid crystal experiments and numerical investigations. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(6), 1049–1059.
- Jones, B.J., i Garimella, S. V. (2009). Surface roughness effects on flow boiling in microchannels. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 1, No. 041007, 9 pages.
- Kaczmarczyk, O., i Mikielewicz, J. (2015). Studies on the micro heat exchangers coupling into integral heat exchanger. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 17, 485–506.
- Kakac, S., i Bon, B. (2007). A review of two-phase flow dynamic instabilities in tube boiling systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 399–433.
- Kalawa, W., Wojcik, T. M., i Piasecka, M. (2017). Heat transfer research on enhanced heating surfaces in pool boiling. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 143, No. 02048, 6 pages.
- Kandlikar, S.G. (2002). Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(2–4), 389–407.
- Kandlikar, S.G., i Grande, W.J. (2003). Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology. *Heat Transfer Engineering*, 24(1), 3–17.

- Kaniowski, R.M. (2011). *Analiza struktur przepływu dwufazowego w minikanale asymetrycznie ogrzewanym*. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Płock.
- Kaniowski, R., Piasecka, M., i Poniewski, M.E. (2016). Flow boiling in minichannels. W *Encyclopedia of Two-Phase Heat Transfer and Flow I, Fundamentals and Methods, vol. 4: Special Topics in Pool and Flow Boiling*, Chapter IV, 75–105, Thome J.R. (Red.), World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Kew, P.A., i Cornwell, K. (1997). Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small diameter channels. *Applied Thermal Engineering*, 17(8–10), 705–715.
- Klugmann, M., Dabrowski, P., i Mikielewicz, D. (2018). Pressure drop related to flow maldistribution in a model minichannel plate heat exchanger. *Archives of Thermodynamics*, 39(2), 123–146.
- Kuczyński, W. (2013a). Modeling of the propagation of a pressure wave during the condensation process of R134a refrigerant in a pipe minichannel under the periodic conditions of hydrodynamic disturbances. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 56(1–2), 715–723.
- Kuczyński, W. (2013b). *Niestabilności hydrodynamiczne podczas skraplania czynników chłodniczych w minikanałach*, Monografia naukowa, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- Kuczyński, W. (2019a). Experimental research on condensation of R134a and R404A refrigerants in mini-channels during impulsive instabilities. Part I. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 728–738.
- Kuczyński, W. (2019b). Experimental research on condensation of R134a and R404A refrigerants in tubular mini-channels during impulsive instabilities. Part II. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 773–782.
- Kuczyński, W., Bohdal, T., i Charun, H. (2013). Impact of periodically generated hydrodynamic disturbances on the condensation efficiency of R134a refrigerant in pipe mini-channels. *Experimental Heat Transfer*, 26(1), 64–84.
- Kuczyński, W., Charun, H., i Bohdal, T. (2017). Modeling of temperature instabilities during condensation of R134a refrigerant in pipe minichannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111, 83–93.
- Lazarek, G.M., i Black, S.H. (1982). Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube with R-113. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 25(7), 945–960.
- Lee, C.Y., Bhuiya M.M.H., i Kim, K.J. (2010). Pool boiling heat transfer with nano-porous surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(19–20), 4274–4279.
- Li, H.Y., i Leong, K.C. (2011). Experimental and numerical study of single and two-phase flow and heat transfer in aluminum foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4904–4912.

- Litak, G., Górska, G., Mosdorff, R., i Rysak, A. (2017). Study of dynamics of two-phase flow through a minichannel by means of recurrences. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 89, 48–57.
- Liu, Z., i Winterton, R.H.S. (1991). A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli based on a nucleate pool boiling equation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34, 2759–2766.
- Maciąg, A. (2009). *Funkcje Trefftza dla wybranych prostych i odwrotnych zagadnień mechaniki*. Monografie, studia, rozprawy, nr M10, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- Maciejewska, B., Błasiak, S., i Piasecka, M. (2017a). Determination of the temperature distribution in a minichannel using ANSYS CFX and a procedure based on the Trefftz functions. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 143, No. 02071, 5 pages.
- Maciejewska, B., Łabędzki, P., Piasecki, A., i Piasecka, M. (2017b). Comparison of FEM calculated heat transfer coefficient in a minichannel using two approaches: Trefftz base functions and ADINA software. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 143, 02070, 5 pages.
- Maciejewska, B., i Piasecka, M. (2016). A study of unsteady flow boiling heat transfer in a minichannel. *Proc. 16th Int. Conf. on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy HTRSE-2016, 10-13.09.2016, Międzyzdroje, Poland*, 207–214.
- Maciejewska, B., i Piasecka, M. (2017a). A numerical solution to an inverse unsteady-state heat transfer problem involving the Trefftz functions. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 143, No. 02069, 5 pages.
- Maciejewska, B., i Piasecka, M. (2017b). An application of the non-continuous Trefftz method to the determination of heat transfer coefficient for flow boiling in a minichannel. *Heat and Mass Transfer*, 53, 1211–1224.
- Maciejewska, B., i Piasecka, M. (2017c). Trefftz function-based thermal solution of inverse problem in unsteady-state flow boiling heat transfer in a minichannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107, 925–933.
- Maciejewska, B., i Piasecka, M. (2018a). Heat transfer coefficient determination using the FEM with time-dependent Trefftz-type basis functions in subcooled flow boiling in a minichannel. *MATEC Web of Conferences*, 240, No. 01024, 4 pages.
- Maciejewska, B., i Piasecka, M. (2018b). Transient heat transfer coefficient determination by the FEM with Trefftz-type basis functions in flow boiling in a minichannel. *Proc. 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer, 12-15.03.2018, Nagasaki, Japan*, No. 2253, 2 pages.
- Maciejewska, B., i Piasecka, M. (2019). Time-dependent study of boiling heat transfer coefficient in a vertical minichannel. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, w druku.

- Maciejewska, B., Strąk, K., i Piasecka, M. (2016a). Determination of the heat transfer coefficient from IRT measurement data using the Trefftz method. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 114, 02068, 5 pages.
- Maciejewska, B., Strąk, K., i Piasecka, M. (2016b). The solution of a two-dimensional inverse heat transfer problem using the Trefftz method. *Procedia Engineering*, 157, 82–88.
- Maciejewska, B., Strąk, K., i Piasecka, M. (2018). The solution of a two-dimensional inverse heat transfer problem using two methods: the Trefftz method and the Beck method. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 28(1), 206–219.
- Madejski, J. (1998). *Teoria wymiany ciepła*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin.
- Mancin, S., Diani, A., Doretti, L., i Rossetto, L. (2014). Liquid and flow boiling heat transfer inside a copper Foam. *Procedia Materials Science*, 4, 346–351.
- Mancin, S., Zilio, C., Cavallini, A., i Rossetto, L. (2010). Heat transfer during air flow in aluminum foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 4976–4984.
- Mehendale, S.S., Jacobi, A.M., i Shah, R.K. (2000). Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design. *Applied Mechanics Reviews*, 53(7), 175–193.
- Meola, C. (2012). *Infrared Thermography recent advances and future trends*. EBooks, Bentham.
- Michalski, D., Strąk, K., i Piasecka, M. (2017). Comparison of two surface temperature measurement using thermocouples and infrared camera. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 143, No. 02075, 6 pages.
- Michalski, D., Strąk, K., i Piasecka, M. (2018). Estimating uncertainty of temperature measurements for studies of flow boiling heat transfer in minichannels. *Proc. International Conference on Experimental Fluid Mechanics 2018, 13-16.11.2018, Prague Planetarium, Czech Republic*, 385–391.
- Mikielewicz, D., Andrzejczyk, R., Jakubowska, B., i Mikielewicz, J. (2016a). Analytical model with nonadiabatic effects for pressure drop and heat transfer during boiling and condensation flows in conventional channels and minichannels. *Heat Transfer Engineering*, 37(13–14), 1158–1171.
- Mikielewicz, D., Andrzejczyk, R., Jakubowska, B., i Mikielewicz, J. (2016b). Comparative study of heat transfer and pressure drop during flow boiling and flow condensation in minichannels. *Archives of Thermodynamics*, 35(3), 17–37.
- Mikielewicz, D., Gliński, M., i Wajs, J. (2007a). Krytyczny strumień ciepła podczas wrzenia w przepływie w kanałach. *Technika chłodnicza i klimatyzacyjna*, 2, 54–59.
- Mikielewicz, D., Klugmann, D., i Wajs, J. (2013a). Flow boiling intensification in minichannels by means of mechanical flow turbulising inserts. *International Journal of Thermal Sciences*, 65, 79–91.

- Mikielewicz, D., Klugmann, M., i Wajs, J. (2012). Experimental investigation of M-shape heat transfer coefficient distribution of R123 flow boiling in small-diameter tubes. *Heat Transfer Engineering*, 33(7), 584–595.
- Mikielewicz, D., i Mikielewicz, J. (2010). A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP. *Applied Thermal Engineering*, 30(16), 2357–2362.
- Mikielewicz, D., Mikielewicz, J., i Tesmar, J. (2007b). Improved semi-empirical method for determination of heat transfer coefficient in flow boiling in conventional and small diameter tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(19–20), 3949–3956.
- Mikielewicz, D., Stasiuk, J., i Bońca, Z. (2010). Katedra Techniki Cieplnej: 1945 – 2010. *Technika chłodnicza i klimatyzacyjna*, 17, 221–227.
- Mikielewicz, D., i Wajs, J. (2015). Wybrane zagadnienia projektowania mikrostrugowych wymienników ciepła. Wydawnictwa Instytutu Maszyn Przepływoowych PAN, Gdańsk.
- Mikielewicz, D., i Wajs, J. (2017). Possibilities of heat transfer augmentation in heat exchangers with minichannels for marine applications. *Polish Maritime Research*, 24(1), 133–140.
- Mikielewicz, D., Wajs, J., Andrzejczyk, R., i Klugmann, M. (2016c). Pressure drop of HFE7000 and HFE7100 during flow condensation in minichannels. *International Journal of Refrigeration*, 68, 226–241.
- Mikielewicz, D., Wajs, J., Gliński, M., i Zrooga, A.B.R.S. (2013b). Experimental investigation of dryout of SES 36, R134a, R123 and ethanol in vertical small diameter tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 556–564.
- Mikielewicz, J. (1974). Semi-empirical method of determining the heat-transfer coefficient for subcooled, saturated boiling in a channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 17, 1129–1134.
- Mikielewicz, J. (2010). Micro heat and power plants working in organic Rankine cycle. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19(3), 499–50.
- Mikielewicz, J., i Mikielewicz, D. (2012). Thermal-hydraulic issues of flow boiling and condensation in organic Rankine cycle heat exchangers. *Archives of Thermodynamics*, 33(1), 41–66.
- Mikielewicz, J., i Mikielewicz, D. (2018). A simplified energy dissipation based model of heat transfer for post-dryout flow boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 60–268.
- Mosdorf, R., i Górska, G. (2015). Detection of two-phase flow patterns using the recurrence network analysis of pressure drop fluctuations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 64, 14–20.
- Mosdorf, R., i Górska, G. (2016). Identification of two-phase flow patterns in minichannel based on RQA and PCA analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 96, 64–74.

- Movahedian, B., Boroomand, B., i Soghrati, S. (2013). A Trefftz method in space and time using exponential basis functions: application to direct and inverse heat conduction problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 37, 868–883.
- Musiał, T., i Piasecka, M. (2015). Wyznaczanie naprężeń cieplnych w pierścieniowym wymienniku ciepła z miniprzestrzenią. *TTS Technika Transportu Szynowego*, 12/2015, 2759–2762.
- Musiał, T., i Piasecka, M. (2016). A study of the flow boiling heat transfer and thermal stress in a rectangular heat exchanger with a minichannel. *Proc. 16th International Conference on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy HTRSE-2016, Międzyzdroje, Poland*, 215–222. Wydawnictwo Uczelniane ZUT, Szczecin.
- Musiał, T., Piasecka, M., i Hożejowska, S. (2017). A study of the flow boiling heat transfer in an annular heat exchanger with a mini gap. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 143, No. 02077, 4 pages.
- Nedaei, M., Mottezakker, A.R., Zeybek, M.C., Sezen, M., Ince, O., i Kosar, A. (2017). Subcooled flow boiling heat transfer enhancement using polyperfluorodecylacrylate (pPFDA) coated microtubes with different coating thicknesses. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 86, 130–140.
- Orzechowski, T. (2003). *Wymiana ciepła przy wrzeniu na żebrach z mikropowierzchnią strukturalną*. Monografie, studia, rozprawy, nr 39, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- Orzechowski, T. (2009). Boiling heat transfer on the fin with laser beam modified surface. *Proc. Int. Symp. on Convective Heat and Mass Transfer in Sustainable Energy - Conv-09, 26.04-1.05.2009, Hammamet, Tunisia*, No. 223, 14 pages.
- Orzechowski, T., i Tyburczyk, A. (2011). Efektywność dwufazowego chłodzenia na przykładzie żebra z pokryciem siatkowym. *Przegląd Elektrotechniczny*, 87(7), 48–51.
- Orzechowski, T., Tyburczyk, A., i Ziętala, K. (2014). Wymiana ciepła przy wrzeniu na żebrze z pokryciem metalowo-włóknistym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 31(86, 2/2014), 231–238.
- Ozer, A.B., Oncel, A.F., Hollingsworth, D.K., i Witte, L.C. (2011). A method of concurrent thermographic-photographic visualization of flow boiling in a minichannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(8), 1522–1529.
- Özisik, M.N., i Orlande, H.R.B. (2000). *Inverse heat transfer: fundamentals and applications*. Taylor i Francis, New York.
- Pastuszko, R. (2012). *Wymiana ciepła przy wrzeniu w tunelach podpowierzchniowych*. Monografie, studia, rozprawy, nr M33, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- Pastuszko, R., i Piasecka, M. (2012). Pool boiling on surfaces with mini-fins and micro-cavities. *Journal of Physics: Conference Series*, 395, No. 012137, 7 pages.

- Pastuszko, R., i Poniewski, M.E. (1999). Wymiana ciepła przy wrzeniu na żebrze dwuwarstwowym z pokryciem porowatym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej*, 70, 25–38.
- Pastuszko, R., i Poniewski, M.E. (2005). Enhancement of boiling heat transfer on double extended surfaces with narrow tunnels. *Proc. 4th International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems HEAT'2005, 26-30.06.2005, Gdańsk, Poland*, 427–432.
- Pastuszko, R., i Wójcik, T.M. (2015). Experimental investigations and a simplified model for pool boiling on micro-fins with sintered perforated foil. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 63, 34–44.
- Piasecka, M. (2002). *Teoretyczne i eksperymentalne badania wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie przez wąski kanał*. Rozprawa doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Kielce.
- Piasecka, M. (2004). Investigations on flow boiling heat transfer in minichannels. *Turbulence*, 10, 111–122.
- Piasecka, M. (2006). Eksperymentalne badania wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie płynu chłodniczego przez pionowy minikanał. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 6s, 186–187.
- Piasecka, M. (2012). An investigation into the influence of different parameters on the onset of boiling in minichannels. *Archives of Thermodynamics*, 33(4), 67–90.
- Piasecka, M. (2013a). An application of enhanced heating surface with mini-recesses for flow boiling research in minichannels. *Heat and Mass Transfer*, 49, 261–271.
- Piasecka, M. (2013b). Determination of the temperature field using Liquid Crystal Thermography and analysis of two-phase flow structures in research on boiling heat transfer in a minichannel. *Metrology and Measurement Systems*, 20(2), 205–216.
- Piasecka, M. (2013c). Heat transfer mechanism, pressure drop and flow patterns during FC-72 flow boiling in horizontal and vertical minichannels with enhanced walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, 472–488.
- Piasecka, M. (2014a). Flow boiling heat transfer in a minichannel with enhanced heating surface. *Heat Transfer Engineering*, 35(10), 903–912.
- Piasecka, M. (2014b). Heat transfer research on enhanced heating surfaces in flow boiling in a minichannel and pool boiling. *Annals of Nuclear Energy*, 73, 282–293.
- Piasecka, M. (2014c). Laser texturing, spark erosion and sanding of the surfaces and their practical applications in heat exchange devices. *Advanced Material Research*, 874, 95–100.
- Piasecka, M. (2014d). *Wrzenie w przepływie na rozwiniętych powierzchniach minikanalów*. Monografie, studia, rozprawy, nr 61, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.

- Piasecka, M. (2015a). Correlations for flow boiling heat transfer in minichannels with various orientations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, 114–121.
- Piasecka, M. (2015b). Impact of selected parameters on refrigerant flow boiling heat transfer and pressure drop in minichannels. *International Journal of Refrigeration*, 56, 198–212.
- Piasecka, M. (2016). Sposób wytwarzania struktur porowatych na powierzchni wyrobów metalowych, Patent RP nr PL 225512 B1.
- Piasecka, M., Błasiak, S., i Musiał, T. (2016a). Numerical calculations of the thermal deformations of the rectangular minichannel walls. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 114, No. 02096, 6 pages.
- Piasecka, M., i Depczyński, W. (2013). Struktura intensyfikująca wymianę ciepła przy wrzeniu. Patent RP nr PL 217287 B1.
- Piasecka, M., Hożejowska, S., i Musiał, T. (2017a). Modelling of flow boiling heat transfer in a cylindrical annulus mini gap. *E3S Web of Conferences*, 13, No. 02002, 4 pages.
- Piasecka, M., Hożejowska, S., i Musiał, T. (2018a). Trefftz method in identification of the heat transfer in flow boiling of refrigerants in an annular gap. *Proc. 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer, 12-15.03.2018, Nagasaki, Japan*, No. 2252, 2 pages.
- Piasecka, M., Hożejowska, S., i Piasecki, A. (2017b). Cooling liquid flow boiling heat transfer in an annular minigap. *Proc. 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 12-15.06.2017, Iguazu Falls, Brazil*, 8 pages.
- Piasecka, M., Hożejowska, S., i Poniewski, M. E. (2003). Determination of local flow boiling heat transfer coefficient in narrow channel. *Archives of Thermodynamics*, 24(2), 55–67.
- Piasecka, M., Hożejowska, S., i Poniewski, M. E. (2004). Experimental evaluation of flow boiling incipience of subcooled fluid in a narrow channel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 25, 159–172.
- Piasecka, M., i Maciejewska, B. (2012). The study of boiling heat transfer in vertically and horizontally oriented rectangular minichannels and the solution to the inverse heat transfer problem with the use of the Beck method and Trefftz functions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 38, 19–32.
- Piasecka, M., i Maciejewska, B. (2013). Enhanced heating surface application in a minichannel flow and the use of the FEM and Trefftz functions for the solution of inverse heat transfer problem. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 23–33.
- Piasecka, M., i Maciejewska, B. (2014a). Heat transfer coefficient determination for flow boiling in vertical and horizontal minichannels. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 67, No. 02094, 8 pages.

- Piasecka, M., i Maciejewska, B. (2014b). Impact of variable spatial orientation on the heat transfer coefficient during flow boiling in a minichannel with an enhanced surface. *Proc. 5th Int. Conf. Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale 2014*. 22-25.04.2014 Marseilles, France, No. P-44, 6 pages.
- Piasecka, M., i Maciejewska, B. (2015). Heat transfer coefficient during flow boiling in a minichannel at variable spatial orientation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 459–467.
- Piasecka, M., Michalski, D., i Strąk, K. (2016b). Comparison of two methods for contactless surface temperature measurement. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 114, No. 02094, 9 pages.
- Piasecka, M., Musiał, T., i Blasiak, S. (2016c). Badania wymiany ciepła i odkształceń termicznych w wymiennikach ciepła z miniprzestrzeniami o różnych geometriach. W *Wybrane problemy w mechatronice i inżynierii materiałowej*. Monografie, studia, rozprawy, Seria: Nauki Techniczne - Budowa i Eksploatacja Maszyn, nr M80, 335–346, Radek N. i Sladek A. (Red.), Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- Piasecka, M., Musiał, T., i Piasecki, A. (2018b). Cooling liquid flow boiling heat transfer in an annular minigap with an enhanced wall. *Proc. International Conference on Experimental Fluid Mechanics 2018*, 13-16.11.2018, Prague Planetarium, Czech Republic, 433–440.
- Piasecka, M., Piasecki, A., i Hożejowska, S. (2017c). Study on flow boiling heat transfer in a minichannel heat sink. W Bury T. i Szlek A. (Red.), *We Współczesne problem termodynamiki*, 1017–1027. Wydawnictwo Instytutu Techniki Cieplnej, Gliwice.
- Piasecka, M., Piasecki, A., Hożejowska, S., i Malecha, K. (2017d). Flow boiling heat transfer in a minichannel heat sink. *Proc. 9th World Conference on Experimental Heat Transfer ExHFT-9, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, 12-15.06.2017, Iguazu Falls, Brazil, No. PT231, 3 pages.
- Piasecka, M., i Poniewski, M.E. (2003). The onset of refrigerant R-123 flow boiling in a narrow vertical channel. *Archives of Thermodynamics*, 24(2), 19–35.
- Piasecka, M., i Poniewski, M.E. (2004a). Flow boiling incipience in minichannels. *Proc. International Symposium on Two-phase Flow Modelling and Experimentation*, 22-25.09.2004, Pisa, Italy, No. mt-13, 8 pages.
- Piasecka, M., i Poniewski, M.E. (2004b). Hysteresis phenomena at the onset of subcooled nucleate flow boiling in microchannels. *Heat Transfer Engineering*, 25(3), 44–51.
- Piasecka, M., i Poniewski, M.E. (2004c). Influence of selected parameters on boiling heat transfer in minichannels. *Proc. 2nd International Conference on Microchannels and Minichannels ICMM2004*, 17–19.06.2004, Rochester, New York, USA, 515–522.
- Piasecka, M., i Poniewski, M.E. (2008). Zastosowanie termografii ciekłokrystalicznej do badań wrzenia w przepływie przez minikanał. W *Wybrane zagadnienia*

- nia przepływu płynów i wymiany ciepła*, 241–256, Suchecki W. (Red.), Politechnika Warszawska, Szkoła Nauk Technicznych i Społecznych w Płocku, Warszawa.
- Piasecka, M., i Poniewski, M.E. (2016). Heat transfer and pressure drop in minichannels with microstructured surface and various orientation. W *Encyclopedia of Two-Phase Heat Transfer and Flow I, Fundamentals and Methods*, vol. 4: *Special Topics in Pool and Flow Boiling*, Chapter V, 107–130, Thome J.R. (Red.), World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Piasecka, M., Poniewski, M.E., Hożejowska, S., i Hożejowski, L. (2005). Various models and numerical procedures of boiling heat transfer calculations in minichannels. *Proc. Euromech Colloquium 472 on Microfluidics and Transfer*, 6-8.09.2005, Grenoble, France, 4 pages.
- Piasecka, M., i Strąk, K. (2016). Effect of the heating surface enhancement on the heat transfer coefficient for a vertical minichannel. *The European Physical Journal Web of Conferences*, (114), No. 02095, 9 pages.
- Piasecka, M., i Strąk, K. (2019). Influence of the surface enhancement on the flow boiling heat transfer in a minichannel. *Heat Transfer Engineering*, 40(13–14), 1–14.
- Piasecka, M., Strąk, K., i Grabas, B. (2017e). Vibration-assisted laser surface texturing and electromachining for the intensification of boiling heat transfer in a minichannel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(4), 1983–1990.
- Piasecka M., Strąk K., Maciejewska B, i Grabas B. (2016d). A study of the flow boiling heat transfer in a minichannel for a heated wall with surface texture produced by vibration-assisted laser machining. *Journal of Physics: Conference Series* (745), No. 032123, 8 pages
- Piasecka, M., Strąk, K., i Maciejewska, B. (2017f). Calculations of flow boiling heat transfer in a minichannel based on Liquid Crystal and Infrared Thermography data. *Heat Transfer Engineering*, 38(3), 332–346.
- Piasecka, M., Strąk, K., i Maciejewska, B. (2018). The flow boiling heat transfer coefficient determination in a minichannel used the FEM combined with Trefftz functions. *MATEC Web of Conferences*, 240, No. 01033, 4 pages.
- Piasecka, M., Piasecki, A., i Hożejowska, S. Research on boiling heat transfer during FC-72 flow in a minichannel heat sink. *Archives of Thermodynamics*, w recenzji.
- Piasecki, A., Łabędzki, P., Hożejowska, S., i Piasecka, M. (2016). Wymiana ciepła podczas wrzenia FC-72 w przepływie przez wymiennik ciepła z minikanałem modelowana funkcjami Trefftza i z wykorzystaniem programu ADINA. *TTS Technika Transportu Szynowego*, 12/2006, 186–190.
- Poniewski, M.E. (2001). *Wrzenie pęcherzykowe na rozwiniętych mikropowierzchniach*. Monografie, studia, rozprawy, nr 23, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.

- Poniewski, M.E., Wiśniewski, M.Ł., i Wójcik, T.M. (1998). Modelowanie wymiany ciepła przy wrzeniu w cienkościennych strukturach porowatych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej*, 53, 737–744.
- Poniewski, M.E., Wójcik, T.M., i Wiśniewski, M.Ł. (1999). Badania eksperymentalne i teoretyczne histerezy wymiany ciepła przy wrzeniu w warstwie porowej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej*, 70, 71–94.
- Pranoto, I., i Leong, K.C. (2014). An experimental study of flow boiling heat transfer from porous foam structures in a channel. *Applied Thermal Engineering*, 70(1), 100–114.
- Ramaswamy, C., Joshi, Y., Nakayama, W., i Johnson, W.B. (2002). High-speed visualization of boiling from an enhanced structure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(24), 4761–4771.
- Reutskiy, S.Y. (2004). A Trefftz type method for time-dependent problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 28(1), 13–21.
- Ruspini, L.C., Marcel, C.P., i Clausse, A. (2014). Two-phase flow instabilities: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 521–548.
- Seo, H., Chu, J.H., Kwon, S.Y., i Bang, I.C. (2015). Pool boiling CHF of reduced graphene oxide, graphene, and SiC-coated surfaces under highly wettable FC-72. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, 490–502.
- Seo, S.B.I.N., i Bang, I.N.C. (2015). Effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles deposition on critical heat flux of R-123 in flow boiling heat transfer. *Nuclear Engineering and Technology*, 47, 398–406.
- Shah, R.K. (1981). Classification of Heat Exchangers. W *Heat Exchangers: Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design*, 9–46, Kakac S., Bergles A.E., i Mayinger F. (Red.), Hemisphere, New York.
- Shojaeian, M., i Koşar, A. (2015). Pool boiling and flow boiling on micro- and nanostructured surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 63, 45–73.
- Sobierska, E., Kulenovic, R., Mertz, R., i Groll, M. (2006). Experimental results of flow boiling of water in a vertical microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31, 111–119.
- Sommers, A.D., i Yerkes, K.L. (2013). Using micro-structural surface features to enhance the convective flow boiling heat transfer of R-134a on aluminum. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 1053–1063.
- Song, L., S., i Chang, H. S. (2015). An experimental study on CHF enhancement of wire nets covered surface in R-134a flow boiling under high pressure and high mass flux conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90, 761–768.
- Stasiak, J., Mikielewicz, D., Mikielewicz, J., i Collins, M.W. (1997). A new method of heat transfer coefficient measurements by liquid crystal and digital processing. *Chemical Engineering Research & Design*, 75(A7), 657–662.

- Strąk, D., Strąk, K., i Piasecka, M. (2018a). Enhanced surfaces used in research on flow boiling heat transfer in minichannels. *Materials Research Proceedings*, 5, 154–159.
- Strąk, K. (2019). *Badania intensyfikacji wrzenia podczas przepływu przez minikanały prostokątne*. Rozprawa doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Kielce.
- Strąk K., Piasecka M., i Strąk D. (2018). Przegląd powierzchni rozwiniętych stosowanych w badaniach wymiany ciepła w minikanałach. W: Wybrane zagadnienia w inżynierii mechanicznej, Monografie, studia, rozprawy, seria Nauki Techniczne – Budowa i Eksplotacja Maszyn, nr M102, Radek N., Sladek A. i Hlavaty I. (Red.), 318–333, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- Strąk, K., Maciejewska, B., i Piasecka, M. (2018b). The heat transfer coefficient determination with the use of the Beck-Treffitz method in flow boiling in a minichannel. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 180, No. 02099, 6 pages.
- Strąk, K., i Piasecka, M. (2018b). Impact of different thickness of the smooth heated surface on flow boiling heat transfer. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 180, No. 02098, 6 pages.
- Strąk, K., i Piasecka, M. (2015a). A study of flow boiling heat transfer in a rectangular minichannel using liquid crystal and infrared thermography. *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery*, 128, 97–118.
- Strąk, K., i Piasecka, M. (2015b). Badanie wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie FC-72 w minikanałach przy użyciu termowizji i termografii ciekłokrystalicznej. *TTS Technika Transportu Szynowego*, 12/2015, 1449–1453.
- Strąk, K., i Piasecka, M. (2016a). Badanie wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie czynników roboczych - FC-72 i wody destylowanej w minikanałach. *TTS Technika Transportu Szynowego*, 12/2016, 239–245.
- Strąk, K., i Piasecka, M. (2016b). Flow boiling heat transfer for different spatial orientations of a minichannel with an enhanced surface. *Proc. 16th Int. Conf. on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy HTRSE-2016, 10-13.09.2016, Międzyzdroje, Poland*, 253–260.
- Strąk, K., i Piasecka, M. (2017). Boiling heat transfer during flow of distilled water in an asymmetrically heated rectangular minichannel. *The European Physical Journal Web of Conferences*, 143, No. 02116, 7 pages.
- Strąk, K., i Piasecka, M. (2018a). Effect of spatial orientation of an enhanced surface minichannel and study on flow boiling heat transfer of cooling liquids. *Proc. 10th Int. Conf. on Boiling and Condensation Heat Transfer, 12-15.03.2018, Nagasaki, Japan*, No. 2237, 2 pages.
- Strąk, K., i Piasecka, M. (2018c). Impact of selected thermal and flow parameters on flow boiling heat transfer in a minichannel. *Proc. International Conference on Experimental Fluid Mechanics 2018, 13-16.11.2018, Prague Planetarium, Czech Republic*, 535–540.

- Strąk, K., i Piasecka, M. (2018d). Research on flow boiling heat transfer for vertical upward and downward flows along a minichannel with a smooth heated surface. *E3S Web of Conferences*, 70, No. 02014, 6 pages.
- Strąk, K., Piasecka, M., i Depczyński, W. (2016a). Zastosowanie struktur porowatych wytworzonych na bazie proszków Fe w badaniach wymiany ciepła podczas wrzenia w minikanałach. W *Wybrane problemy w mechatronice i inżynierii materiałowej*, Monografie, studia, rozprawy, nr M80, Radek N. i Sladek A. (Red.), 425–439, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- Strąk, K., Piasecka, M., i Grabas, B. (2016b). Zastosowanie teksturowania laserowo-wibracyjnego do intensyfikacji procesu wrzenia w przepływie w minikanałach o przekroju prostokątnym. *Mechanik*, 12, 1831–1835.
- Strąk, K., Piasecka, M., i Maciejewska, B. (2017a). Effect of spatial orientation of an enhanced surface minichannel on flow boiling heat transfer of cooling liquids. *Proc.9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics ExHFT-9 12-15.06.2017, Iguazu Falls, Brazil*, No. PT53, 11 pages.
- Strąk, K., Piasecka, M., i Maciejewska, B. (2017b). Study on flow boiling heat transfer and two-phase flow structures in a minichannel. We *Współczesne problemy termodynamiki*, 1017–1027, Bury T. i Szlek A. (red.), Wydawnictwo Instytutu Techniki Cieplnej, Gliwice.
- Strąk, K., Piasecka, M., i Maciejewska, B. (2018c). Spatial orientation as a factor in flow boiling heat transfer of cooling liquids in enhanced surface minichannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117, 375–387.
- Sujith Kumar, C.S., Suresh, S., Yang, Q., i Aneesh, C.R. (2014). An experimental investigation on flow boiling heat transfer enhancement using spray pyrolysed alumina porous coatings. *Applied Thermal Engineering*, 71(1), 508–518.
- Sun, L., i Mishima, K. (2009). An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5323–5329.
- Treffitz, E. (1926). Ein Gegenstück zum Ritzschen Verfahren. W *International Kongress für Technische Mechanik*, 131–137. Zürich.
- Triplett, K.A., Ghiaasiaan, S.M., Abdel-Khalik, S.I., i Sadowski, D.L. (1999). Gas–liquid two-phase flow in micro-channels, Part 1: two-phase flow patterns. *International Journal of Multiphase Flow*, 25, 377–394.
- Wajs, J., i Mikielewicz, D. (2016). Influence of metallic porous microlayer on pressure drop and heat transfer of stainless steel plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 93, 1337–1346.
- Wajs, J., Mikielewicz, D., i Jakubowska, B. (2018). Performance of the domestic micro ORC equipped with the shell-and-tube condenser with minichannels. *Energy*, 157, 853–861.

- Warrier, G.R., Dhir, V.K., i Momoda, L.A. (2002). Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26, 53–64.
- Wilk, J. (2009). Experimental investigation of convective mass/heat transfer in short minichannel at low Reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 267–272.
- Wilk, J. (2012). Convective mass/heat transfer in the entrance region of the short circular minichannel. *Experimental Thermal Fluid Science*, 38, 107–114.
- Wilk, J. (2014). A review of measurements of the mass transfer in minichannels using the limiting current technique. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57, 242–249.
- Wójcik, T.M. (2005). Pool boiling heat transfer on horizontal tubes with metal, fibrous porous coverings. *Proc. 4th International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems HEAT'2005, 26-30.06.2005, Gdańsk, Poland*, 535–542.
- Wójcik, T.M. (2010). *Inicjacja wrzenia i histereza wymiany ciepła na pokryciach porowatych*. Rozprawy, monografie, nr 204, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Zeng, J., Chen, C., Tang, Y., Wang, X., Zhang, L., Zhang, S., Chen, J. (2016). Effect of powder size on capillary and two-phase heat transfer performance for porous interconnected microchannel nets as enhanced wick for two-phase heat transfer devices. *Applied Thermal Engineering*, 104, 668–677.
- Ziętala, K., i Piasecka, M. (2014). Bezkontaktowe metody pomiaru temperatury powierzchni stosowane w badaniach wymiany ciepła w minikanałach. *Logistyka*, 6/2014, 11784–11793.

# **WYMIANA CIEPŁA PODCZAS WRZENIA W PRZEPŁYWIE W MINIPRZESTRZENIACH O ZRÓŻNICOWANEJ GEOMETRII**

## **S t r e s z c z e n i e**

Wzrost wymagań energetycznych przy jednoczesnej tendencji do miniaturyzacji nowoczesnych urządzeń jest związany z postępem technologicznym. Stale poszukiwane są metody pozwalające na intensyfikację wymiany ciepła, przy czym wymiana ciepła przebiegająca ze zmianą fazy zwiększa efektywność procesu. W monografii przedstawiono wyniki badań otrzymanych w ciągu kilku ostatnich lat wraz z uwzględnieniem stosowanych w obliczeniach metod matematycznych. Omówiono konstrukcję stanowisk badawczych, których najważniejszym elementem jest moduł testowy o zróżnicowanej geometrii: z minikanałami o przekroju prostokątnym, z miniprzestrzenią o przekroju pierścieniowym oraz z zestawem minikanałów o przekroju prostokątnym. W module przewidziano jedną lub kilka miniprzestrzeni o zmiennej orientacji przestrzennej, wzdłuż których następował przepływ płynu roboczego (płyny chłodnicze, woda destylowana) podgrzewanego przez grzejnik. Eksperymenty przeprowadzano w warunkach ustalonych oraz zmiennych w czasie. Pomiar temperatury grzejnika odbywał się kilkoma metodami: termografią ciekłokrystaliczną, termowizją oraz za pomocą termopar, symultanicznie rejestrowano struktury przepływu dwufazowego. Celem eksperymentów było zgromadzenie danych, które przy zastosowaniu zaproponowanych modeli i metod matematycznych umożliwiły wyznaczenie lokalnych wartości współczynnika przejmowania ciepła na styku: powierzchnia grzejna–ciecz wrząca przepływająca wzdłuż miniprzestrzeni. Przeprowadzano analizę zgromadzonych wyników, których celem było określenie intensywności przebiegu wymiany ciepła oraz rozpoznanie wpływu istotnych czynników na inicjację i rozwój wrzenia. Do wybranych czynników należały: rozwinięcie powierzchni grzejnika, położenie przestrzenne miniprzestrzeni, strumień masy przepływu płynu i jego ciśnienie, czynnik wrzący oraz parametry geometryczne modułu testowego. Omówiono wybrane metody rozwiązań zagadnień jedno- i dwuwymiarowych stosowanych dotychczas w obliczeniach. Scharakteryzowano zaobserwowane struktury przepływu dwufazowego i występowanie niestabilności przepływu i ciśnienia. Zastosowano wybrane elementy analizy statystycznej do walidacji wyników, w tym do określenia dokładności pomiaru temperatury i wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła. Przeprowadzono analizę porównawczą wyników pomiarów temperatury powierzchni otrzymanych wybranymi metodami. Porównano wartości współczynnika przejmowania ciepła wyznaczonego za pomocą modeli 1D i 2D, a także wyniki uzyskane z obliczeń metodą Trefftza oraz programami ADINA i ANSYS CFX. Rezultaty z eksperymentów posłużyły do obliczeń zgodnie z równaniami kryterialnymi przyjętymi z literatury. W analizie ujęto własną zależność na wyznaczenie liczby Nusselta dla wrzenia przechłodzonego podczas przepływu w minikanałach.

## **FLOW BOILING HEAT TRANSFER IN MINISPACES WITH VARIED GEOMETRY**

### **A b s t r a c t**

Stricter energy performance requirements combined with the continuing trend towards miniaturization have made thermal management a key issue in engineering research. As a result, increasingly advanced methods are employed to intensify heat transfer. Phase change heat transfer is known to raise the efficacy of the process. This monograph reports the results of research conducted over the last few years and discusses the mathematical methods used in the calculations. The test stands, thoroughly described further in the work, include test modules with varied geometries such as minichannels with rectangular cross sections, minigaps with annular cross sections and a set of minichannels with rectangular cross sections. The modules have one or more minispaces with a variable spatial orientation. Working fluids (refrigerant, distilled water) flowing through them are heated by the heater. The experiments were carried out in stationary and time-dependent conditions. The temperature of the heater was measured by several methods: liquid crystal thermography, thermovision and thermocouples. Two-phase flow structures were simultaneously recorded. The aim of the experiments was to collect data which, using the proposed models and mathematical methods, enabled the determination of local heat transfer coefficients at the interface between the heated surface and the boiling liquid flowing through a minispace. The results were analysed with the aim to provide the intensity of the heat transfer process and define the impact of important factors on boiling initiation and development. These factors were: the enhanced surface of the heater, spatial position of the minispace, mass flux of the fluid and its pressure, working fluid and geometrical parameters of the test module. Selected methods of solving one- and two-dimensional problems were employed for the calculations. The observed two-phase flow structures and flow and pressure instabilities were characterized. Selected elements of statistical analysis were used to validate the results for the accuracy of temperature measurement and the heat transfer coefficient calculation. A comparative analysis of the results of surface temperature measurements obtained by selected methods was carried out. The values of the heat transfer coefficient determined using the 1D and 2D models were compared, and the results obtained from calculations using the Trefftz method and the ADINA and ANSYS CFX programs were collated. Results from the experiments were the basis for calculations according to correlations adopted from the literature. The analysis included an original relationship for determining the Nusselt number for subcooled boiling during fluid flow in minichannels.