

В. В. ГОРІН

Одеська державна академія технічного регулювання та якості

В. В. СЕРЕДА

Національний університет водного господарства та природокористування

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПІД ЧАС КОНДЕНСАЦІЇ ХОЛОДОАГЕНТІВ У СЕРЕДИНІ МІНІКАНАЛІВ

У роботі наведено порівняння експериментальних даних різних авторів під час конденсації холодоагентів у середині мініканалів із різною внутрішньою геометрією. Порівняльний аналіз показав, що існує суттєва розбіжність у отриманих експериментальних значеннях коефіцієнтів тепловіддачі різних авторів під час конденсації різних холодоагентів у разі однакових режимних параметрів і геометричних розмірах мініканалів. Наведені результати розрахунків тепловіддачі під час конденсації різних холодоагентів у мініканалах за напівемпіричною залежністю, яка отримана для звичайних труб і заснована на теоретичній моделі турбулентної конденсації. Виявлено, що запропонована комплексна модель покращує опис експериментальних даних багатьох авторів у разі конденсації різних холодоагентів у середині мініканалів за умови, якщо число Re_l знаходиться у межах $Re_l = 2 \cdot 10^2 - 10^4$.

Ключові слова: конденсація в середині мініканалів, коефіцієнт тепловіддачі, холодоагент.

V. V. GORIN

Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality

V. V. SEREDA

National University of Water and Environmental Engineering

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENTS IN CONDENSING OF DIFFERENT FLUIDS INSIDE MINICHANNELS

Condensation inside minichannels occurs in evaporative systems of thermal desalinating plants, air conditioning systems, safety systems of reactors, heaters of power plants and condensers of cooling equipment. It is very important to have an exact knowledge of condensation heat transfer coefficients when their value is close to heat transfer from the side of cooling. Theoretical and experimental investigations of heat transfer coefficients in condensing of different fluids inside minichannels shown that accuracy of this prediction depends on the accuracy of volumetric vapour content and pressure drop at the interphase. The necessity of new studies concerning both local heat transfer coefficients and film condensation along perimeter and length of minichannels under annular, stratified and intermediate regimes of phase flow was substantiated. These characteristics being defined will allow determining more precisely the boundaries of the flow regimes and the methods of heat transfer prediction. In this paper the experimental data of different authors on condensation inside minichannels with different internal geometry (circular, semicircular, square and triangular) have been compared. Experimental investigations on condensation of freons R134a, R410A, R32, R22, R407C, R152a and propane R290 were carried out with the following parameters: hydraulic diameter $d_h = 1.1-1.3$ mm, mass velocity $G = 180-500$ kg/(m²s), liquid Reynolds numbers $Re_l = 2 \cdot 10^2 - 10^4$. It is obtained that there is a significant difference in the values of experimental heat transfer coefficients in the case of condensation with the same regime parameters and with the equal geometric parameters of the minichannels. The obtained results allowed suggest to use simple semiempirical dependence for heat transfer prediction in condensing inside minichannels. This dependence based on the theoretical model of turbulent condensation and were obtained for the case of condensation inside plane tubes. This model generalizes with sufficient accuracy (error $\pm 30\%$) all the experimental data on condensation inside minichannels. It should be taken into account one restriction while using the suggested relationship: Re_l must be within $2 \cdot 10^2 - 10^4$. Using this model for designing heat exchangers, which utilize such types of fluids will increase the efficiency of energy systems.

Keywords: condensation, fluid, heat transfer, minichannels.

Вступ

Застосування мініканалів і трубок є одним із способів інтенсифікації теплообміну у разі фазових перетворень та робить застосування мініканалів перспективним напрямом у створенні сучасних мініканальних конденсаторів холодильних агрегатів та автомобільних систем кондиціонування повітря. Використання мініканальних систем призводить до забезпечення високого рівня міцності апаратів, підвищення інтенсивності теплообміну та дозволяє зменшити кількість холодоагенту в них. У роботі [1] наведено результати наявних експериментальних досліджень теплообміну під час конденсації різних холодоагентів у середині мініканалів, а також наведено існуючі залежності щодо розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі у залежності від масового паровмісту за різними масовими швидкостями й тепловими потоками, показано вплив на тепловіддачу внутрішніх геометричних форм та розмірів мініканалів.

У запропонованій статті приведено порівняльний критичний аналіз результатів експериментальних досліджень різних авторів у разі конденсації різних холодоагентів у середині мініканалів за майже однаковими масовими швидкостями й геометричними розмірами у круглих та квадратних мініканалах, а також результати розрахунків тепловіддачі у мініканалах за напівемпіричною залежністю з роботи [2], яка отримана для звичайних труб і заснована на теоретичній моделі турбулентної конденсації.

Порівняльний аналіз результатів досліджень теплообміну у разі конденсації холодоагентів у середині мініканалів

На рис. 1–4 у графічному вигляді приведено порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень у разі конденсації холодоагентів R134a, R410A, R32 і R290 (пропане) у середині мініканалів із робіт [3–17] за майже однаковими масовими швидкостями й геометричними розмірами у круглих і квадратних мініканалах.

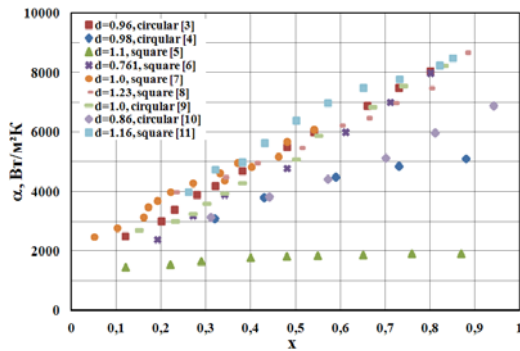


Рис. 1. Порівняння результатів досліджень у разі конденсації R134a у середині круглих і квадратних мініканалів із робіт [3 – 11] за $G = 350 - 450 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$

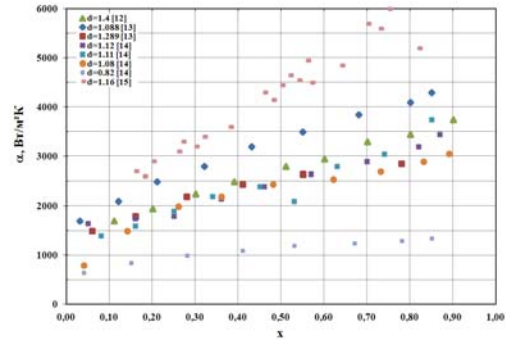


Рис. 1. Порівняння результатів досліджень у разі конденсації R410A у середині круглих мініканалів із робіт [12 – 15] за $G = 400 - 500 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$

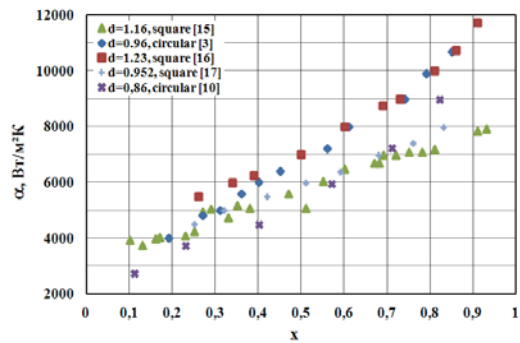


Рис. 3. Порівняння результатів досліджень у разі конденсації R32 у середині круглих і квадратних мініканалів із робіт [3, 10, 15 – 17] за $G = 390 - 475 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$

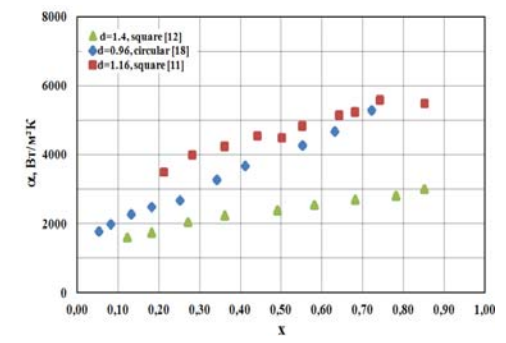


Рис. 4. Порівняння результатів досліджень у разі конденсації R290 (пропан) у середині круглих і квадратних мініканалів із робіт [8, 12, 15] за $G = 180 - 200 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$

Порівняльний аналіз експериментальних досліджень різних авторів із рис. 1–4 свідчить про те, що існує суттєва розбіжність у значеннях експериментальних коефіцієнтів тепловіддачі для кожного з холодоагентів у разі практично однакових масових швидкостей і геометричних параметрах.

Така ж тенденція спостерігається й під час конденсації у середині мініканалів холодоагентів R22, R407C, R152a та ін.

Розрахунок тепловіддачі за напівемпіричною кореляцією з [2]

У висновках праць [4, 15] стосовно дослідження конденсації холодоагентів у мініканалах стверджується, що впродовж змінювання всього діапазону масового паровмісту коефіцієнти тепловіддачі для труби малого діаметра перевищують дані для труби зі звичайним діаметром приблизно на $\pm(10 - 25)\%$. За думкою авторів праць, це означає, що у разі зменшення діаметра труби ($d < 3 \text{ мм}$), у мініканалах відбуваються незначні зміни характеристик та структури потоку.

Тому, враховуючи порівняльний аналіз результатів досліджень тепловіддачі з рис. 1–4, а також висновки з зазначених вище робіт [4, 15] стосовно незначних змін характеристик і структур потоків під час конденсації речовин у середині мініканалів та невеликі відхилення отриманих результатів у порівнянні з розрахунками тепловіддачі за відомими кореляціями для звичайних труб, нами, за однакових робочих речовин, внутрішніх геометричних розмірів каналів і режимних параметрів, були проведені порівняльні розрахунки тепловіддачі за напівемпіричною залежністю (1) з роботи [2] для розрахунку конденсації у середині звичайних труб, яка заснована на теоретичній моделі турбулентної конденсації:

$$Nu_f = 0.0144 Fr_i^{0.36} Pr_i^{0.43} \quad (1)$$

У якості даних для розрахунку тепловіддачі, були обрані експериментальні дані досліджень теплообміну під час конденсації різних речовин у середині мініканалів з відомих робіт: [3] - конденсація R134a і R32 у круглих каналах; [4] – конденсація R134a, R404A та R407C у круглих каналах; [7] конденсація R134a у квадратному, трикутному і напівкруглому каналах; [12] - конденсація R22, R410A та пропану (R290) у круглих каналах; [13] - конденсація R22, R410A і R407C у круглих каналах; [15] - конденсація R32 у круглому каналі; [18] - конденсація R290 (пропан) у круглому каналі та ін.

Розрахунки тепловіддачі під час конденсації у середині мініканалів за залежністю (1) у порівнянні з експериментальними даними щодо конденсації холодоагентів R410A, R32, R290, R22 і R407C із робіт різних авторів за різною внутрішньою геометрією каналів приведені на рис. 5–8.

Аналіз рис. 5–8 свідчить, що запропонована комплексна модель (1), яка заснована на теоретичній моделі турбулентної конденсації, покращує опис експериментальних даних багатьох авторів у разі конденсації різних холодоагентів у середині мініканалів за умови, якщо число Re_l знаходиться у межах $Re_l = 2 \cdot 10^2 - 10^4$.

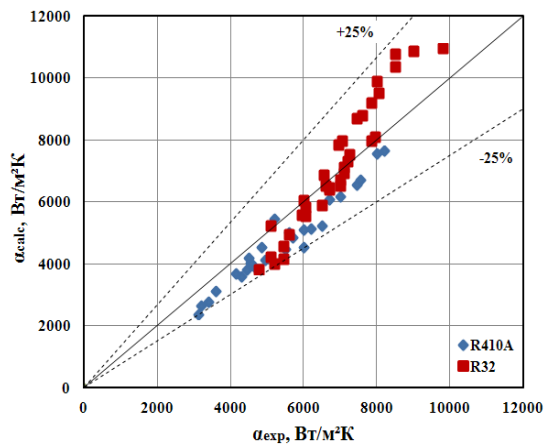


Рис. 5. Результати розрахунків за залежністю (1) даних [15] під час конденсації R410A і R32 у середині мініканалів із гідравлічним діаметром $d_h = 1,16$ мм

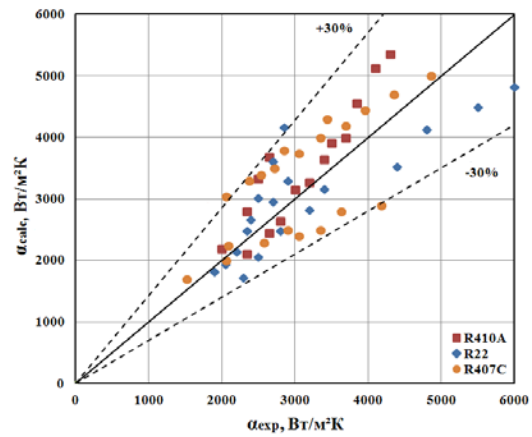


Рис. 6. Результати розрахунків за залежністю (1) даних [13] під час конденсації R410A, R22 і R407C у середині трубок із внутрішніми діаметрами $d_i = 1,088$ мм і $d_i = 1,289$ мм

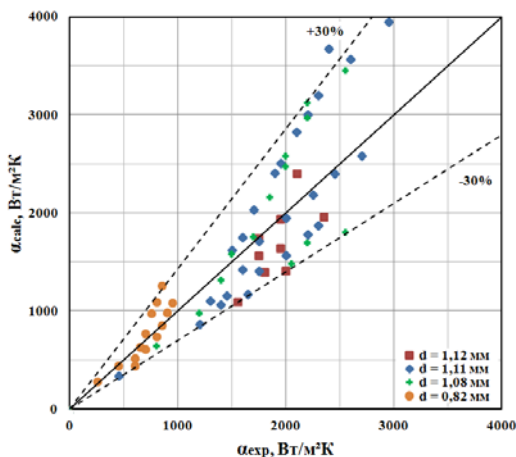


Рис. 7. Результати розрахунків за залежністю (1) даних із роботи [14] під час конденсації R410A у середині мініканалів із гідравлічними діаметрами $d_h = 0,82; 1,08; 1,11; 1,12$ мм

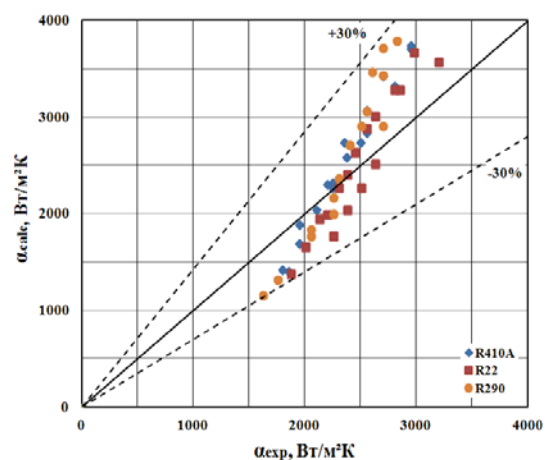


Рис. 8. Результати розрахунків за залежністю (1) даних із роботи [12] під час конденсації R410A, R22 і R290 у середині мініканалів із гідравлічним діаметром $d_h = 1,4$ мм

Висновки

1. Критичний аналіз експериментальних досліджень різних авторів під час конденсації холодоагентів R134a, R410A, R32 і R290 (propane), R22, R407C, R152a та ін. свідчить про те, що існує суттєва розбіжність у значеннях експериментальних коефіцієнтів тепловіддачі для кожного з холодоагентів у разі практично однакових масових швидкостей потоку і геометричних параметрах мініканалів.

2. Розрахунок тепловіддачі за напівемпіричною кореляцією (1) свідчить, що ця комплексна модель, яка заснована на теоретичній моделі турбулентної конденсації, покращує опис експериментальних даних багатьох авторів у разі конденсації різних холодоагентів у середині мініканалів за умови, якщо число Re_l знаходиться у межах $Re_l = 2 \cdot 10^2 - 10^4$.

3. У подальшому необхідно виконати порівняльні розрахунки за наявними теоретичними та емпіричними методами розрахунку теплообміну під час конденсації в середині мініканалів з метою виявлення загальної методики розрахунку тепловіддачі з урахуванням впливу режимів течії фаз, теплового потоку, а також границь її використання.

Література

1. Горін В. В. Теплообмін при конденсації всередині мініканалів / В. В. Горін // Холодильна техніка та технологія. – 2017. – № 5(53). – С. 21–26.
2. Rifert V. G. Substantiation and the range of application of a new method for heat transfer prediction in condensing inside plain tubes / V. G. Rifert, V. V. Sereda, V. V. Gorin, P. A. Barabash, A.S. Solomakha // ENERGETIKA: Scientific Journal of the Lithuanian Academy of Sciences. – 2018. – Vol. 64. – № 3. – P. 146–154.
3. Matkovic M. Experimental study on condensation heat transfer inside a single circular minichannel / M. Matkovic, A. Cavallini, D. Del Col, L. Rossetto // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2009. – Vol. 52. – P. 2311–2323.
4. Bohdal T. Heat transfer during condensation of refrigerants in tubular minichannels / T. Bohdal, H. Charun, M. Sikora // Archives of Thermodynamics, 2016. – № 4. – P. 3–18.
5. Sakamatapan K. Condensation heat transfer characteristics of R-134a flowing inside themultiport minichannels / K. Sakamatapan, J. Kaew-On, A. S. Dalkilic, O. Mahian, S. Wongwises // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – № 64. – P. 976–985.
6. Bandhauer T. M. Measurement and Modelling of Condensation Heat Transfer Coefficients in Circular

Microchannels / T. M. Bandhauer, A. Agarwal, S. V. Garimella // *J. of Heat Tran. T. ASME*. – 2006. – Vol. 128. – P. 1050–1059.

7. Derby M. Condensation heat transfer in square, triangular, and semicircular mini-channels. / M. Derby, H. J. Lee, Y. Peles, Michael, M. K. Jensen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012 – Vol. 55. – P. 187–197.

8. Col Del D. Minichannel condensation in downward, upward and horizontal configuration / D. Del Col, M. Bortolato, S. Bortolin, M. Azzolin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2012. – Paper 395. – P. 1–8.

9. Riva E. The Importance of T turbulence during Condensation in a Horizontal Circular Minichannel / E. Da Riva, D. Del Col, S. V. Garimella, A. Cavallini // *CTRC Research Publications*. – 2011. – Paper 172. – P. 1 – 36.

10. Li M. Research on condensation heat transfer characteristics of R447A, R1234ze, R134a and R32 in multi-port micro-channel tubes / M. Li, Q. Guo, J. Lv // *12th IEA Heat Pump Conference*. – 2017. – P. 1–8.

11. Lopez Belchi A. Characterisation of heat transfere and pressure drop in condensation processes within minichannel tubes with last generation of the refrigerant fluids : dys. ... Ph. D. : Lopez Belchi Alejandro D. – Cartagena, 2014. – 167 p.

12. Park K. J. Flow Condensation Heat Transfer Coefficients of R22, R410A and Propane in Aluminium Multi-Channel Tube / K. J. Park, K. J. Lee, D. Jung // *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*. – 2005. – Vol. 17. – № 7. – P. 649–658.

13. Zhang H.-Y. Experimental investigation of condensation heat transfer and pressure drop of R22, R410A and R407C in mini-tubes / H.-Y. Zhang, J.-M. Li, N. Liu, B.-X. Wang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – Vol. 55. – P. 3522–3532.

14. Vu P. Q. Condensation heat transfer using R410A in multiport minichanel tubes // *Proceedings of the Asian Conference on Thermal Sciences, 1st ASTC March 26-30, (2017)*, pp. 1–6/

15. Lopez-Belchi A. R32 Heat Transfer Coefficient During Condensation In A Mini-Channel Multiport Tube. / A. Lopez-Belchi, F. Illan-Gomez, J.-R. Garcia-Cascales, F. Vera-Garcia // *15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, July 14–17. – 2014. – 2488. – P. 1–10.

16. Bortolato M. Two-phase heat transfer inside minichannels: fundamentals and applications in refrigeration and solar technology : dys. ... Ph. D. : Bortolato Matteo. – Padova, 2014. – 182 p.

17. Liu N. Numerical simulation of R32 condensation heat transfer in horizontal circular microchannels / N. Liu, J. Li // *CIESC Journal*. – 2014. – Vol. 65. – P. 4246–4253.

18. Del Col, D., et al., Condensation Heat Transfer and Pressure Drop with Propane in a Minichannel, *International Refrigeration and Air Conditioning Conference, (2012)*, 2572, p. 1–9.

References

1. Horin V. V. Teploobmin pry kondensatsii vsередnyi minikanaliv / V. V. Horin // *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia*. – 2017. – № 5(53). – S. 21–26.

2. Rifert V. G. Substantiation and the range of application of a new method for heat transfer prediction in condensing inside plain tubes / V. G. Rifert, V. V. Sereda, V. V. Gorin, P. A. Barabash, A.S. Solomakha // *ENERGETIKA: Scientific Journal of the Lithuanian Academy of Sciences*. – 2018. – Vol. 64. – № 3. – P. 146–154.

3. Matkovic M. Experimental study on condensation heat transfer inside a single circular minichannel / M. Matkovic, A. Cavallini, D. Del Col, L. Rossetto // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2009. – Vol. 52. – P. 2311 – 2323.

4. Bohdal T. Heat transfer during condensation of refrigerants in tubular minichannels / T. Bohdal, H. Charun, M. Sikora // *Archives of Thermodynamics*, 2016. – № 4. – P. 3–18.

5. Sakamatapan K. Condensation heat transfer characteristics of R-134a flowing inside themultiport minichannels / K. Sakamatapan, J. Kaew-On, A. S. Dalkilic, O. Mahian, S. Wongwises // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2013. – № 64. – P. 976–985.

6. Bandhauer T. M. Measurement and Modelling of Condensation Heat Transfer Coefficients in Circular Microchannels / T. M. Bandhauer, A. Agarwal, S. V. Garimella // *J. of Heat Tran. T. ASME*. – 2006. – Vol. 128. – P. 1050–1059.

7. Derby M. Condensation heat transfer in square, triangular, and semicircular mini-channels. / M. Derby, H. J. Lee, Y. Peles, Michael, M. K. Jensen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012 – Vol. 55. – P. 187–197.

8. Col Del D. Minichannel condensation in downward, upward and horizontal configuration / D. Del Col, M. Bortolato, S. Bortolin, M. Azzolin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2012. – Paper 395. – P. 1–8.

9. Riva E. The Importance of T turbulence during Condensation in a Horizontal Circular Minichannel / E. Da Riva, D. Del Col, S. V. Garimella, A. Cavallini // *CTRC Research Publications*. – 2011. – Paper 172. – P. 1 – 36.

10. Li M. Research on condensation heat transfer characteristics of R447A, R1234ze, R134a and R32 in multi-port micro-channel tubes / M. Li, Q. Guo, J. Lv // *12th IEA Heat Pump Conference*. – 2017. – P. 1–8.

11. Lopez Belchi A. Characterisation of heat transfere and pressure drop in condensation processes within minichannel tubes with last generation of the refrigerant fluids : dys. ... Ph. D. : Lopez Belchi Alejandro D. – Cartagena, 2014. – 167 p.

12. Park K. J. Flow Condensation Heat Transfer Coefficients of R22, R410A and Propane in Aluminium Multi-Channel Tube / K. J. Park, K. J. Lee, D. Jung // *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*. – 2005. – Vol. 17. – № 7. – P. 649–658.

13. Zhang H.-Y. Experimental investigation of condensation heat transfer and pressure drop of R22, R410A and R407C in mini-tubes / H.-Y. Zhang, J.-M. Li, N. Liu, B.-X. Wang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2012. – Vol. 55. – P. 3522–3532.

14. Vu P. Q. Condensation heat transfer using R410A in multiport minichanel tubes // *Proceedings of the Asian Conference on Thermal Sciences, 1st ASTC March 26-30, (2017)*, pp. 1–6/

15. Lopez-Belchi A. R32 Heat Transfer Coefficient During Condensation In A Mini-Channel Multiport Tube. / A. Lopez-Belchi, F. Illan-Gomez, J.-R. Garcia-Cascales, F. Vera-Garcia // *15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, July 14–17. – 2014. – 2488. – P. 1–10.

16. Bortolato M. Two-phase heat transfer inside minichannels: fundamentals and applications in refrigeration and solar technology : dys. ... Ph. D. : Bortolato Matteo. – Padova, 2014. – 182 p.

17. Liu N. Numerical simulation of R32 condensation heat transfer in horizontal circular microchannels / N. Liu, J. Li // *CIESC Journal*. – 2014. – Vol. 65. – P. 4246–4253.

18. Del Col, D., et al., Condensation Heat Transfer and Pressure Drop with Propane in a Minichannel, *International Refrigeration and Air Conditioning Conference, (2012)*, 2572, p. 1–9.

Рецензія/Peer review : 2.2.2019 р. Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Волощук В. А.