

Боянівський В.П.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Трокоз Я.Є.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ЛАМІНАРНІЙ ПЛІВКОВІЙ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ ВСЕРЕДИНІ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ТРУБНИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ

Теплообмінні апарати в яких має місце плівкова конденсація в горизонтальних трубах знаходять використання в енергетиці, хімічній, харчовій промисловості, а також в техніці опріснення морської води. Інтенсифікація процесу теплообміну при конденсації може призвести до суттєвого зменшення металоемності і габаритних характеристик теплообмінних апаратів. Особливого значення набувають питання інтенсифікації теплообміну у випарних опріснювальних установках, оскільки в цих апаратах коефіцієнти тепловіддачі зі сторони конденсації та випаровування можуть мати близькі значення. Крім цього, в судових опріснювальних установках зниження ваги і габаритів опріснювача дозволить збільшити корисну вантажопідйомність судна і його автономність.

В даній роботі виконані експериментальні дослідження теплообміну при плівковій конденсації водяної пари всередині гладкої горизонтальної труби $d_{\text{вн}} = 16$ мм. Досліджувався вплив густини теплового потоку і швидкості течії пари на інтенсивність теплообміну. Область зміни густини теплового потоку на дослідній ділянці (за методом товстої стінки) складає $\bar{q}_0 = 40 - 260$ кВт/м² при відношенні $\frac{d_{\text{зовні}}}{d_{\text{вн}}} = 5,2$, на задаючій $\bar{q}_L = 0 - 250$ кВт/м² при довжині ділянки $L = 1,3$ м.

Представлено зміна α_0 при $Re_f = 30 - 86$ за умови збільшення швидкості пари w_v . Вплив w_v на інтенсивність теплообміну представлена у вигляді залежності локальних коефіцієнтів тепловіддачі від швидкості течії пари при різних питомих густинах теплового потоку $\alpha_0 = f(w_v; \bar{q}_0)$ і температури насичення $\alpha_0 = f(w_v; t_s)$ в діапазоні зміни швидкості течії пари $w_v = 16 - 64$ м/с.

Встановлена певна нерівномірність характеру розподілу локальних коефіцієнтів тепловіддачі у всьому представленому діапазоні змін густини теплового потоку та швидкості, унаслідок впливу сили тяжіння по периметру гладкої горизонтальної труби. Збільшення швидкості течії пари призводить до інтенсифікації процесу теплообміну. Збільшення питомої густини теплового потоку викликає збільшення поперечного потоку маси і призводить до збільшення дотичного напруження на границі розділу фаз.

Показано, що середні по периметру труби коефіцієнти тепловіддачі зменшуються по довжині і залежать від числового значення і розподілу питомої густини теплового потоку.

Ключові слова: водяна пара, плівкова конденсація, теплообмін, коефіцієнт тепловіддачі, густина теплового потоку, швидкість течії, горизонтальна труба.

Постановка проблеми. Теплообмін при конденсації пари всередині горизонтальних труб досліджений в меншій мірі чим на зовнішній поверхні горизонтальних та вертикальних труб. Із аналізу робіт по конденсації водяної пари всередині гладких горизонтальних труб випливає наступне:

1) на даний момент відсутнє єдине представлення про вплив густини теплового потоку на коефіцієнт тепловіддачі;

2) відсутні надійні рекомендації стосовно теплового розрахунку при конденсації водяної пари за умов низького тиску $P < 0,1$ МПа.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Постійний інтерес до дослідження особливостей теплообміну при конденсації всередині горизонтальних труб зумовлений необхідністю покращення конструктивних характеристик теплообмінних апаратів, покращенню енергетичної ефективності. Дуже важливим в даному питанні є розуміння впливу основних характеристик процесу на інтенсивність теплообміну.

Питанням дослідження процесу конденсації науковцями відомі ще із ХХ століття. На даний момент є достатньо опублікованих наукових

статей, де автори наводять результати власних експериментальних досліджень та виконали порівняння із роботами інших авторів. Для більш детального ознайомлення досліджень конденсації пари всередині труб варто звернутися до [1]–[3].

Враховуючи наявність достатньо великої кількості наукових публікацій по дослідженню плівкової конденсації в гладких горизонтальних трубах залишається потреба в необхідності розуміння особливостей протікання процесу в залежності від основних характеристик.

Автори опублікували статтю [4] про теоретичні та експериментальні дослідження конденсації в горизонтальних трубах. При чому в роботі цитуються оглядові наукові праці, хоча основний акцент приділений дослідженню конденсації фреонів. У другій частині публікації [5] наведений висновок про степінь впливу критеріїв Рейнольдса та Прантля на тепловіддачу у випадку кільцевого та асиметричного режиму течії, а також приведено графіки для датасету по водяній парі при атмосферному тиску.

Використання приведених в літературі моделей по визначенню коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації всередині плівкових горизонтальних теплообмінників призводить до неточності.

В останнє десятиліття значна частина науковців намагаються будувати моделі прогнозування теплообміну за допомогою штучних нейронних мереж (ШНМ). Для прикладу автори [6]–[9] дають початкове розуміння того, як потрібно здійснювати дослідження завдяки ШНМ. В 2023 році автори запропонували модель прогнозування коефіцієнта тепловіддачі при конденсації пари у присутності всередині труби повітря [10].

Варто відмітити той факт, що практично відсутні дослідження локального теплообміну, які могли б врахувати незалежний вплив на теплообмін основних режимних параметрів. Встановлення зв'язку між режимними параметрами і їх впливом на локальний теплообмін дозволить сформулювати більш повну картину по фізиці процесу і на цій основі доповнити наявні банки даних для прогнозування теплообміну з допомогою ШНМ.

Метою статті є визначення локальних по периметру труби коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації всередині горизонтальної труби та вивчити вплив на інтенсивність процесу густини теплового потоку, швидкості течії пари по довжині і периметру горизонтальної труби.

Виклад основного матеріалу дослідження. В умовах переважаючого впливу сили тяжіння на процес конденсації середні коефіцієнти тепловід-

дачі $\bar{\alpha}$ практично не залежать від швидкості пари w_v та масового паровмісту x .

Із зростанням швидкості течії пари негативний вплив збільшення питомої густини теплового потоку на інтенсивність тепловіддачі зменшується. При переважаючому впливі сил міжфазного тертя для даних умов і діаметру труби $d_{\text{вн}} = 16$ мм при $w_v \geq 25$ м/с має місце позитивний вплив збільшення \bar{q}_ϕ на закономірність зміни $\bar{\alpha}_\phi$.

Характер впливу \bar{q}_ϕ на інтенсивність тепловіддачі представлений на рис. 1 на якому показано зміна $\bar{\alpha}_\phi$ при $Re_f = 30 - 86$ за умови збільшення швидкості пари w_v . При значеннях $Re_f = 30 - 31$ результати дослідів показують, що має місце як позитивний так і негативний вплив \bar{q}_ϕ на закономірності зміни коефіцієнта тепловіддачі $\bar{\alpha}_\phi$.

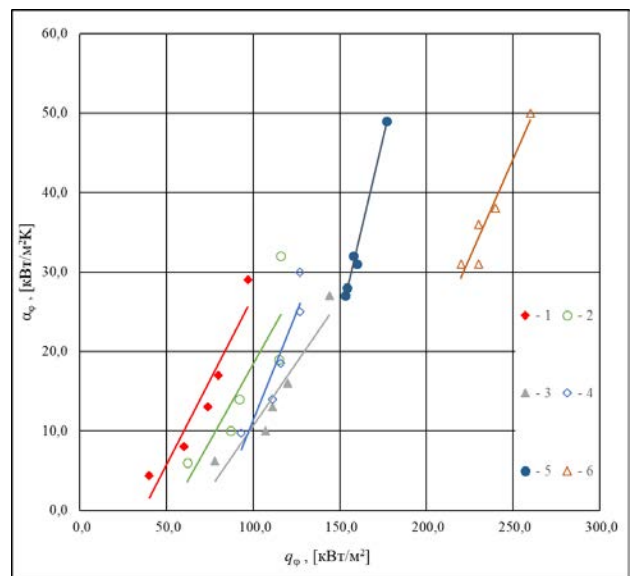


Рис. 1. Вплив теплового потоку q_ϕ на коефіцієнт тепловіддачі α_ϕ при $Re_f=30-86$ (1 – $w_v=16$ м/с; 2 – $w_v=20$ м/с; 3 – $w_v=25$ м/с; 4 – $w_v=48$ м/с; 5 – $w_v=52$ м/с; 6 – $w_v=64$ м/с)

Отримані дані дозволяють встановити, що наявні в літературі суперечливі відомості залежності $\alpha = f(q)$ являються наслідком впливу умов, при яких були виконані експериментальні дослідження і характеризують переважаючий вплив сили тяжіння чи сили міжфазного тертя по довжині дослідної труби. В залежності від співвідношення ділянок на яких переважали вище згадані сили, автори отримували різний характер і степінь впливу q на α .

Варто відмітити, що зростання \bar{q}_ϕ збільшує швидкість течії плівки по периметру труби. При настанні хвильового режиму течії плівки і впливу на теплообмін міжфазного тертя збільшення α_ϕ пов'язано із зниженням термічного опору плівки.

Зростання \bar{q}_φ сприяє не лише збільшенню α_φ (рис. 2), але і вирівнюванні α_φ по φ при всіх значеннях T_n (рис. 3).

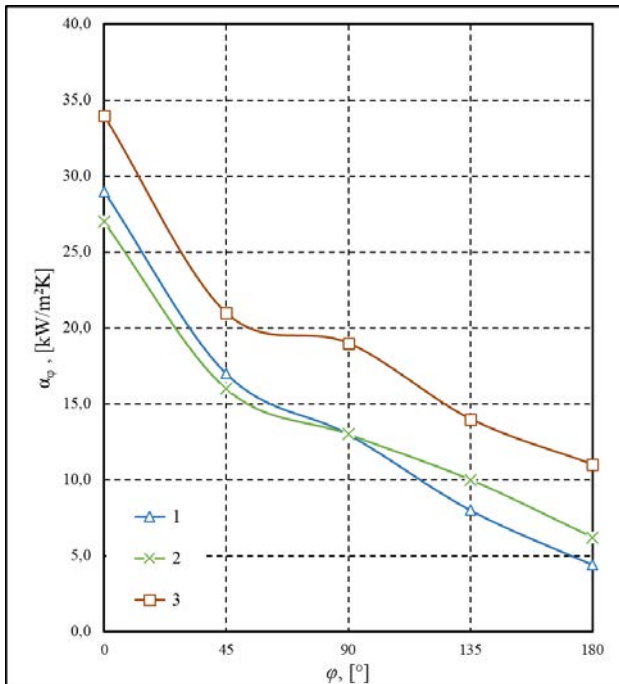


Рис. 2. Вплив теплового потоку q_φ на коефіцієнт тепловіддачі α_φ при $T_n=317$ К (1 – $q_\varphi=70,2$ кВт/м²; 2 – $q_\varphi=112$ кВт/м²; 3 – $q_\varphi=129$ кВт/м²)

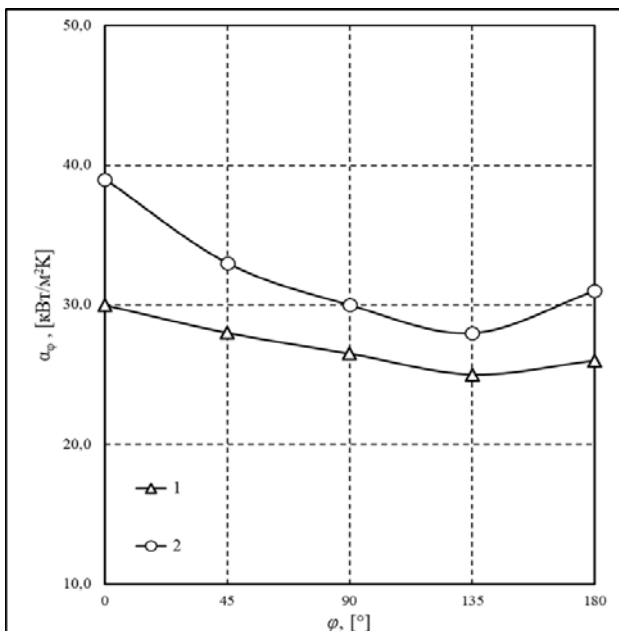


Рис. 3. Вплив теплового потоку q_φ на $\alpha = f(\varphi)$ при $w_v=48$ м/с та $T_n=333$ К (1 – $q_\varphi=121$ кВт/м²; 2 – $q_\varphi=160$ кВт/м²)

По мірі конденсації пари і збільшення кількості конденсату вплив швидкості течії пари проявля-

ється більш складним чином. Складний характер залежності визначається відношенням між термічним опором плівки конденсату, що стікає до низу труби та опором струмка конденсату. На перерозподіл товщин впливає коефіцієнт тертя, що залежить не тільки від w_v , але і від числового значення.

Збільшення швидкості течії пари при призводить до більш інтенсивного росту числових значень в нижній частині периметра труби внаслідок турбулентної течії плівки в зоні струмка конденсату. При цьому характер зміни по φ підтверджує наявність асиметричного ламінарно-хвильового режиму течії плівки конденсату. Згідно [11] наявність хвиль сприяє зриву і зносу капель рідини при $w_v \geq 20$ м/с. Дослідження по зносу рідини в паровий потік в даній роботі не проводилися і як наслідок оцінити вплив швидкості течії пари w_v на величину зносу рідини є неможливим.

Залежність середніх коефіцієнтів тепловіддачі $\bar{\alpha}_\varphi$ від швидкості течії пари w_v представлено на рис. 4. Як показують результати дослідження, з ростом швидкості коефіцієнт тепловіддачі збільшується у всіх перерізах горизонтальної труби. Характер зміни α_φ від w_v та Re_f при зміні температури насичення t_s , а також вплив t_s на числові значення α_φ представлено на рис. 4 та рис. 5.

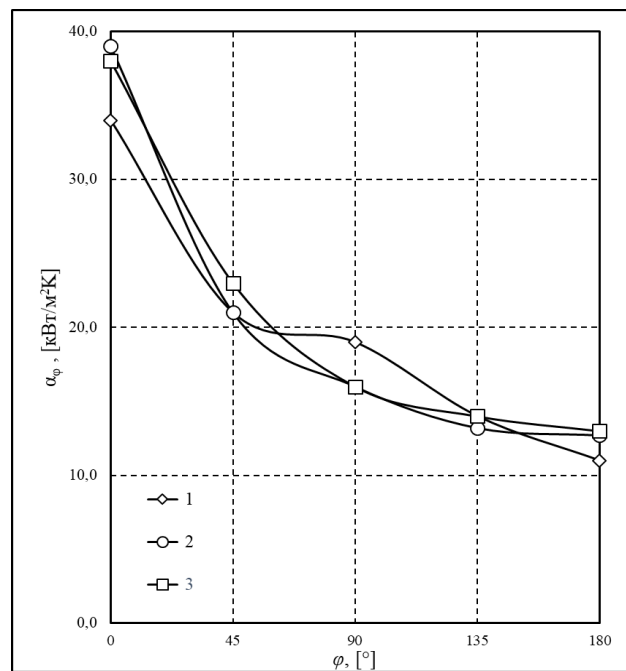


Рис. 4. Вплив температури насичення на локальні α_φ при $w_v=44$ м/с (1 – $T_n=313$ К; 2 – $T_n=334$ К; 3 – $T_n=336$ К)

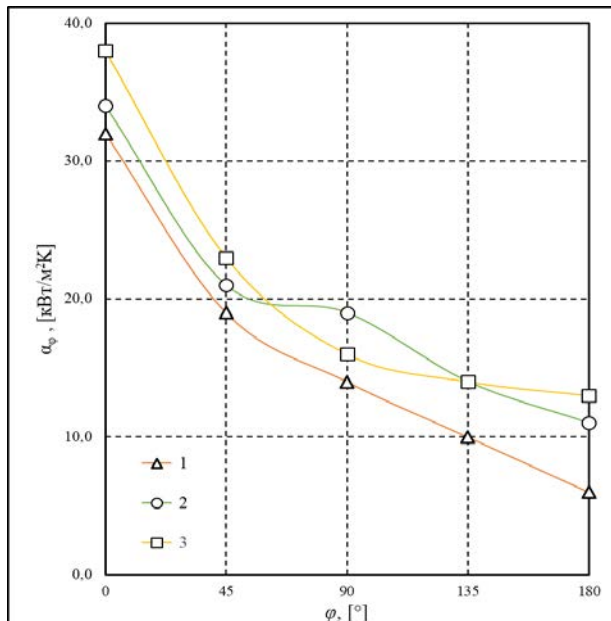


Рис. 5. Вплив w_v та Re_f на інтенсивність тепловіддачі по периметру труби при $T_n=317$ К (1 – $w_v=20$ м/с; $Re_f = 29,8$; 2 – $w_v=44$ м/с; $Re_f = 49$; 3 – $w_v=30$ м/с; $Re_f = 85$)

Висновки. Дослідження конденсації водяної пари проводили при низьких тисках з температурою насичення в межах ($t_s = 44-62^\circ\text{C}$) в середині гладкої труби $d_{\text{вн}} = 16$ мм в діапазоні параметрів величин: швидкість пари на вході в трубу $w_{\text{вх}} = 16-64$ м/с, масовий паровміст $x = 0,02-1,0$, густина теплового потоку $q=3,8-253$ кВт/м².

Проведені експериментальні дослідження теплообміну при конденсації водяної пари всередині горизонтальної труби дозволяють зробити наступні висновки:

- методика експериментальних досліджень дозволила встановити характер зміни інтенсивності теплообміну по довжині і периметру горизонтальної труби в достатньо широкому діапазоні зміни режимних параметрів процесу плівкової конденсації;
- досліджено та показано вплив на закономірності та інтенсивність теплообміну по периметру і довжині горизонтальної труби швидкості течії пари та питомої густини теплового потоку;
- за характером зміни локальних коефіцієнтів тепловіддачі встановлено, що внаслідок впливу сили тяжіння практично у всьому розглянутому діапазоні зміни режимних параметрів присутня нерівномірність інтенсивності теплообміну по периметру горизонтальної труби. Показано, що зростання швидкості пари інтенсифікує процес і призводить до зменшення нерівномірності теплообміну у всьому діапазоні зміни режимних параметрів. Збільшення питомої густини теплового потоку викликає збільшення поперечного потоку маси і призводить до збільшення дотичного напруження на границі розділу фаз;
- показано, що середні по периметру труби коефіцієнти тепловіддачі зменшуються по довжині і залежать від числового значення і розподілу питомої густини теплового потоку.

Список літератури:

1. A. S. Dalkilic and S. Wongwises, 'Intensive literature review of condensation inside smooth and enhanced tubes', *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 15–16, pp. 3409–3426, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.01.011.
2. J. Huang, J. Zhang, and L. Wang, 'Review of vapor condensation heat and mass transfer in the presence of non-condensable gas', *Appl. Therm. Eng.*, vol. 89, pp. 469–484, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.040.
3. O. García-Valladares, 'Review of In-Tube Condensation Heat Transfer Correlations for Smooth and Microfin Tubes', *Heat Transf. Eng.*, vol. 24, no. 4, pp. 6–24, Jul. 2003, doi: 10.1080/01457630304036.
4. V. Rifert and V. Sereda, 'Condensation inside smooth horizontal tubes: Part 1. Survey of the methods of heat-exchange prediction', *Therm. Sci.*, vol. 19, no. 5, pp. 1769–1789, 2015, doi: 10.2298/TSCI140522036R.
5. V. Rifert, V. Sereda, P. Barabash, and V. Gorin, 'Condensation inside smooth horizontal tubes: Part 2. Improvement of heat exchange prediction', *Therm. Sci.*, vol. 21, no. 3, pp. 1479–1489, 2017, doi: 10.2298/TSCI140815045R.
6. Liu, Yan, and Shao-feng Zhang, 'Local flow regime identification for boiling two-phase flow by BP neural networks approach', presented at the 2010 Sixth International Conference on Natural Computation, IEEE, 2010.
7. Z. Li, J. Huang, J. Wang, and M. Ding, 'Comparative study of meta-heuristic algorithms for reactor fuel reloading optimization based on the developed BP-ANN calculation method', *Ann. Nucl. Energy*, vol. 165, p. 108685, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.anucene.2021.108685.
8. M. Balcilar, A. S. Dalkilic, and S. Wongwises, 'Artificial neural network techniques for the determination of condensation heat transfer characteristics during downward annular flow of R134a inside a vertical smooth tube', *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 38, no. 1, pp. 75–84, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.10.009.
9. J. Cai, 'Applying support vector machine to predict the critical heat flux in concentric-tube open thermosiphon', *Ann. Nucl. Energy*, vol. 43, pp. 114–122, May 2012, doi: 10.1016/j.anucene.2011.12.029.

10. H. Cao, B. Cao, C. Xia, Z. Meng, H. Bian, and M. Ding, 'Prediction of heat transfer coefficients for steam condensation in the presence of air based on ANN method', *Int. J. Adv. Nucl. React. Des. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 77–85, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jandt.2023.07.001.

11. G. F. Hewitt and N. S. Hall-Taylor, *Annular two-phase flow*. Oxford: Pergamon Press, 1970.

Boianivskiy V.P., Trokoz Ya.Ye. INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER MECHANISMS DURING LAMINAR FILM CONDENSATION OF WATER VAPOR IN HORIZONTAL TUBE HEAT EXCHANGERS

Heat exchangers with film condensation in horizontal pipes are used in the energy, chemical, food industries, as well as in seawater desalination technology. Intensification of the heat exchange process during condensation can lead to a significant reduction in the metal consumption and overall characteristics of heat exchangers. Of particular importance is the intensification of heat transfer in evaporative desalination plants, since in these devices the heat transfer coefficients from the condensation and evaporation sides can have close values. In addition, in shipboard desalination plants, reducing the weight and dimensions of the desalination unit will increase the useful carrying capacity of the vessel and its autonomy.

In this work, experimental studies of heat transfer during film condensation of water vapor inside a smooth horizontal pipe $d_m = 16$ mm were performed. The influence of heat flux density and steam flow rate on the heat transfer intensity was studied. The range of change local heat flux in the experimental section (using the thick wall method) is $\bar{q}_\phi = 40 - 260$ kW/m² at a ratio of $\frac{d_{out}}{d_m} = 5.2$. The range of local heat flux in the determining section is $\bar{q}_L = 0 - 250$ kW/m² at the section length $L = 1.3$ m.

The change at the condition of increasing the steam velocity w_v is presented. The effect of w_v on the heat transfer intensity is presented in the form of the dependence of local heat transfer coefficients on the steam flow velocity at different specific heat flux densities and saturation temperature in the range of changes in the steam flow velocity $w_v = 16 - 64$ m/s.

A change is presented when the steam velocity w_v increases. The effect of w_v on the heat transfer intensity is presented as a dependence of local heat transfer coefficients on the steam velocity at different specific heat flux densities $\alpha_\phi = f(w_v; \bar{q}_\phi)$ and saturation temperature in the range $\alpha_\phi = f(w_v; t_s)$ of changing the steam velocity $w_v = 16 - 64$ m/s.

A determinate unevenness in the distribution of local heat transfer coefficients over the entire range of changes in heat flux density and velocity was found due to the influence of gravity along the perimeter of a smooth horizontal pipe. Increase of the steam flow rate leads to intensification of the heat transfer process. An increase in the heat flux density causes an increase in the transverse mass flow and causes an increase in the shear stress at the boundary.

It is demonstrated that the average heat transfer coefficients along the perimeter of the tube decrease along its length and depend on the numerical value and distribution of the specific local heat flux.

Key words: water steam, film condensation, heat transfer, heat transfer coefficient, local heat flux, flow velocity, horizontal tube.