

**В.В. Горін, ст.наук.сотр., канд. техн. наук**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*

**В.П. Квасніков, проф., д-р техн. наук**

*Національний авіаційний університет*

## Вплив режимних параметрів на процес конденсації всередині горизонтальної труби

В статі наведено експериментальні дані по впливу режимних факторів на процес конденсації хладонів в горизонтальних трубах.

**конденсація, теплообмін, режимні параметри, коефіцієнт тепловіддачі**

**Вступ.** Інтерес до дослідження процесів гідродинаміки і теплообміну при конденсації всередині горизонтальних труб постійно актуальний у зв'язку з необхідністю удосконалювання конструкції різних теплообмінників (конденсатори, горизонтально-трубні плівкові випарники опріснювальних установок, підігрівачі і конденсатори енергетичних установок і хімічного виробництва, теплові труби і термосифони).

В даний час розробляється багато нових альтернативних хладонів, які є екологічно безпечними, але для них у відкритій літературі обмежена інформація з коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні і конденсації у відповідних агрегатах холодильних установок. В зв'язку з цим виникає потреба проведення досліджень теплообміну у випарниках та конденсаторах холодильних установок. Найбільш інформативними є експериментальні дослідження, в яких визначаються локальні характеристики процесів.

### **Аналіз даних**

У монографіях [1] та [2] представлені експериментальні дані більше 60 робіт, опублікованих до 1998р., по конденсації пари різних рідин всередині гладких і оребрених труб. У цих роботах відсутній аналіз методів дослідження та порівняння дослідних даних з розрахунковими. В роботі [3] зіставлені розрахунки за розрахунковими залежностями різних (сім джерел) авторів з експериментами на хладону (6 типів) і показано, що деякі розрахунки мають розбіжність з дослідними до 100%.

В роботах [4-8] наведено уточнення карт режимів течії фаз при конденсації всередині гладких горизонтальних труб і з урахуванням отриманих даних наводяться нові розрахункові залежності, що відрізняються від наведених в [3] деякими доповненнями в безрозмірних комплексах, показниками ступеня при них. Порівняння нових залежностей з експериментальними також не дає доброго узгодження, а головне, відсутнє розуміння процесу і обґрунтування поданих розрахункових залежностей.

---

© В.В. Горін, В.П. Квасніков, 2011

### **Постановка задачі**

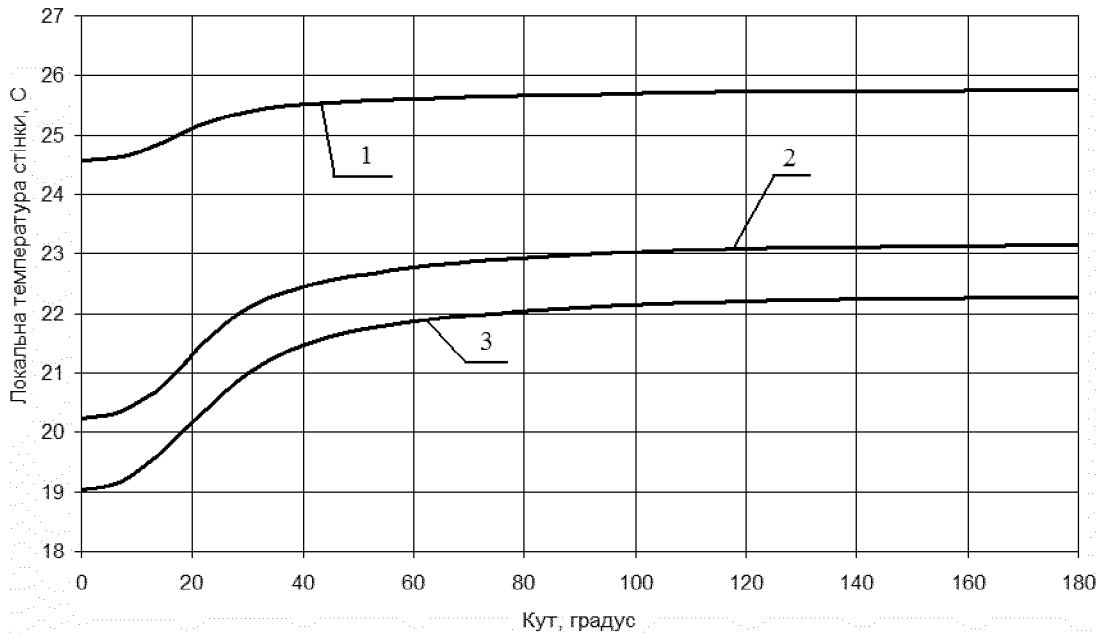
В даній роботі отримані експериментальні дані по впливу режимних факторів на процес конденсації хладонів в горизонтальних трубах.

### **Результати досліджень**

Для вивчення впливу режимних факторів на процес конденсації R22 в горизонтальних трубах були проведені серії дослідів на експериментальному стенді [9], в яких змінювався один із впливаючих факторів, при збереженні інших факторів на постійному рівні (класичний експеримент).

В результаті обробки первинних даних, за методикою викладеною в [1], знаходились розподіл температур та коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  по периметру поперечного перерізу робочої товстостінної ділянки. Деякі із характерних залежностей показані нижче.

На рис. 1 показано вплив середньої в поперечному перерізі густини теплового потоку  $q$  на розподіл температури поверхні теплообміну ( $t = \Phi(\varphi)$ ) в поперечному перерізі робочої ділянки ( на рис. 1:  $0^\circ$  - нижня , а  $180^\circ$  – верхня твірні робочої ділянки).

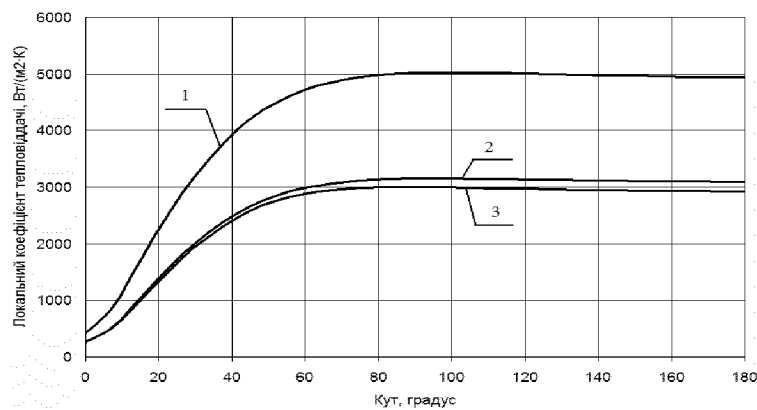


1 –  $q=4730 \text{ Вт/м}^2$ ; 2 -  $10148 \text{ Вт/м}^2$ ; 3 -  $11300 \text{ Вт/м}^2$

Рисунок 1 – Вплив густини теплового потоку на розподіл температури по периметру поперечного перерізу горизонтальної труби при температурі конденсації  $27^\circ\text{C}$  та  $q_{\text{зад}}=q_{\text{к}}=0$

Із рисунка видно, що зміна  $q$  веде до розшарування кривих  $t = \Phi(\varphi)$ . При цьому при більших  $q$  температура поверхні теплообміну зменшується.

В нижньому секторі горизонтальної робочої ділянки має місце суттєве зниження температури поверхні теплообміну. При збільшенні  $q$  цей сектор зростає з одночасним зростанням падіння температури. При  $q=4730 \text{ Вт/м}^2$  температура зменшується на 4%, а при  $q=11300 \text{ Вт/м}^2$  - на 13,6%, при цьому сектор, в якому спостерігається основне падіння температури, зростає від  $60^\circ$  до  $120^\circ$ . Подібний до розглянутого вигляд мають і залежності  $\alpha = \Phi(\varphi)$ , показані на рис. 2.



1 –  $q=4730 \text{ Вт/м}^2$ ; 2 -  $10148 \text{ Вт/м}^2$ ; 3 -  $11300 \text{ Вт/м}^2$

Рисунок 2 – Вплив густини теплового потоку на розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по периметру поперечного перерізу горизонтальної труби при температурі конденсації  $27^\circ\text{C}$  та  $q_{\text{зад}}=q_{\text{к}}=0$

Такий розподіл температури і тепловіддачі по периметру поперечного перерізу робочої ділянки пояснюється наявністю струмка конденсату в нижньому секторі робочої ділянки (розшарований режим течії двофазного паро-конденсатного потоку). Товщина плівки конденсату по периметру поперечного перерізу робочої ділянки при розшарованому режимі зростає від верхньої твірної до струмка конденсату. При ламінарному режимі течії плівки конденсату зростання її товщини веде до зменшення коефіцієнта тепловіддачі, що ілюструють залежності  $\alpha = \Phi(\varphi)$ , показані на рис. 2. Збільшення густини теплового потоку забезпечує зростання товщини плівки конденсату у відповідних точках, що, при ламінарному режимі течії плівки конденсату, також веде до зменшення коефіцієнта тепловіддачі у точках поверхні теплообміну з однаковими координатами (лінії 1, 2, 3, рис. 2).

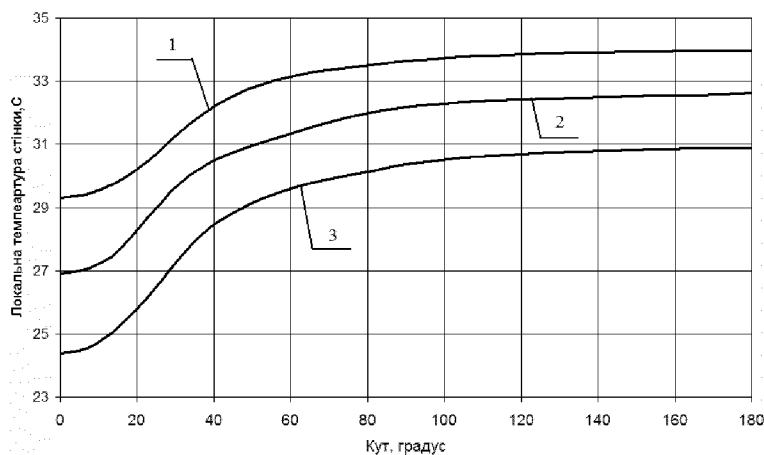
Візуальні спостереження за режимом течії конденсату на виході робочої ділянки однозначно підтвердили наявність, при таких режимних параметрах процесу конденсації, розшарованого режиму течії двофазного паро-конденсатного потоку. Характер ліній 1, 2, 3 в зоні  $0 - 60^\circ$  (рис. 2) свідчить про збереження ламінарного режиму течії конденсату і в струмку, в дослідженому діапазоні зміни густини теплового потоку.

Слід підкреслити, що дані, наведені на рис. 1, та рис 2 отримані на початковій ділянці горизонтальної труби, при швидкості пари, в перерізі, де проводились вимірювання, близькій до нуля.

Досліди при працюючій задаючій ділянці (моделювання «довгої» труби  $q_{зад} > 0$ ), показали якісно такі ж залежності  $t = \Phi(\varphi)$ , та  $\alpha = \Phi(\varphi)$ , але з більшим падінням температури поверхні по периметру поперечного перерізу на кінці «довгої» труби.

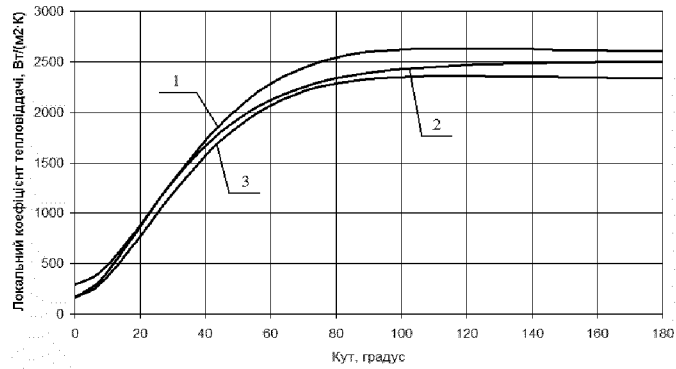
Для режимів, показаних на рис. 3, та рис. 4, падіння температури на нижній твірній труби досягало 21%, при одночасному розширенні сектора, в якому має місце основне падіння температури стінки. Пояснюється це збільшенням кількості конденсату у струмку в нижній частині труби при збереженні розшарованого режиму течії двофазного потоку, ламінарного режиму течії у струмку конденсату. Про це свідчать і візуальні спостереження.

Для дослідження впливу міжфазного тертя на розподіл по периметру поперечного перерізу робочої ділянки температури поверхні конденсації та коефіцієнта тепловіддачі, були проведені досліди при скиданні частини пари із робочої ділянки у кінцевий конденсатор. На рис. 5 показано вплив швидкості пари на  $t = \Phi(\varphi)$ , а на рис. 6 - на  $\alpha = \Phi(\varphi)$ .



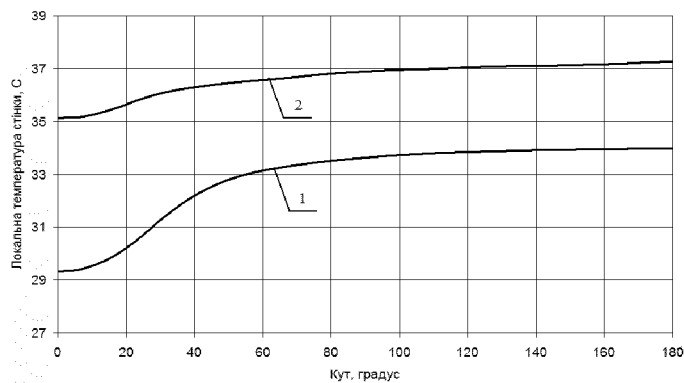
1 -  $q=13619 \text{ Вт/м}^2$ ; 2 -  $15810 \text{ Вт/м}^2$ ; 3 -  $17762 \text{ Вт/м}^2$

Рисунок 3 – Вплив густини теплового потоку на розподіл температури по периметру поперечного перерізу горизонтальної труби при температурі конденсації  $40^\circ\text{C}$  та  $q_k=0$ ,  $q_{зад}=1100 \text{ Вт}$



1 –  $q=13619 \text{ Вт/м}^2$ ; 2 -  $15810 \text{ Вт/м}^2$ ; 3 -  $17762 \text{ Вт/м}^2$

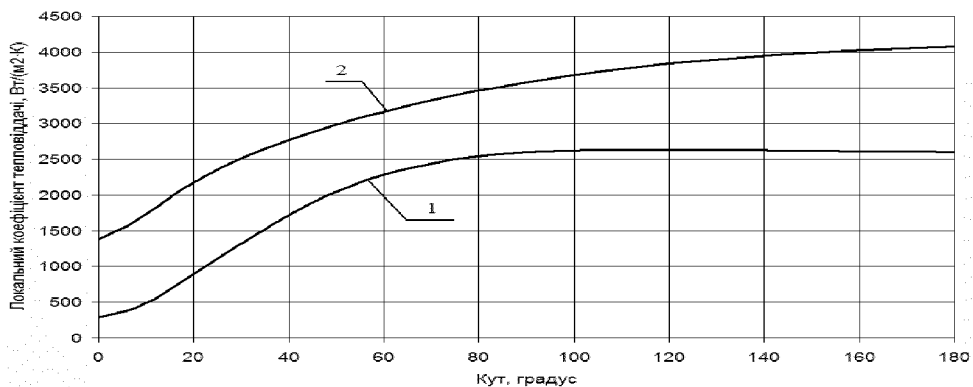
Рисунок 4 – Вплив густини теплового потоку на розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по периметру поперечного перерізу горизонтальної труби при температурі конденсації  $40^\circ\text{C}$  та  $q_k=0$ ,  $q_{\text{зад}}=1100 \text{ Вт}$



1 –  $W=0,27 \text{ м/с}$ ; 2 –  $W=1,6 \text{ м/с}$

Рисунок 5 – Вплив швидкості пари на розподіл температури по периметру поперечного перерізу горизонтальної труби при температурі конденсації  $40^\circ\text{C}$  та  $q_{\text{зад}}=900 \text{ Вт}$ ,  $q_{\text{роб}}=12800 \text{ Вт/м}^2$

Із даних, приведених на рис. 5 видно, що зростання швидкості парової фази (міжфазного тертя) сприяє вирівнюванню температури по периметру поперечного перерізу робочої ділянки. Це свідчить про перехід від розшарованого режиму течії конденсату (лінія 1), до асиметричного кільцевого (лінія 2). Цей висновок підтверджують і дані, приведені на рис.6.



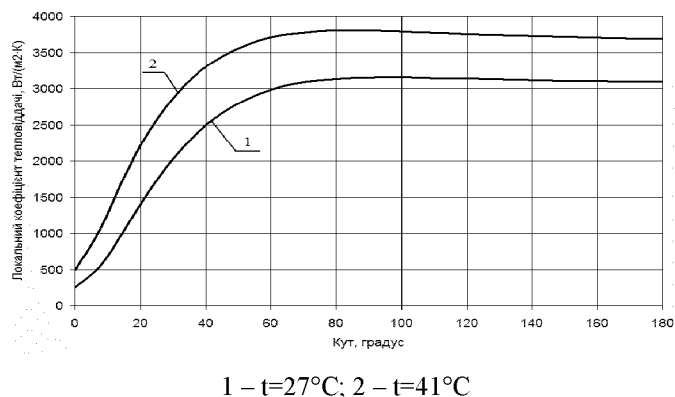
1 –  $W=0,27 \text{ м/с}$ ; 2 –  $W=1,6 \text{ м/с}$

Рисунок 6 – Вплив швидкості пари на залежність  $\alpha=f(\varphi)$  по периметру горизонтальної труби при температурі конденсації  $40^\circ\text{C}$  та  $q_{\text{зад}}=900 \text{ Вт}$ ,  $q_{\text{роб}}=12800 \text{ Вт/м}^2$

Різка падіння коефіцієнта тепловіддачі в зоні  $0 - 60^\circ$  при швидкості пари  $0,27 \text{ м/с}$  (лінія 1) свідчить про наявність в ній струмка конденсату. Монотонне зменшення

тепловіддачі від верхньої твірної до нижньої (лінія 2) свідчить про аналогічне монотонне зростання товщини плівки конденсату від верхньої твірної до нижньої, тобто асиметричний кільцевий режим течії конденсату.

Візуальні спостереження за режимами течії конденсату на виході із робочої ділянки підтверджують висновки, зроблені на основі аналізу даних, приведених на рис.5, рис.6. Рівень температури конденсації мало впливає на характер зміни локальних коефіцієнтів тепловіддачі по периметру поперечного перерізу робочої ділянки (рис. 7). Підвищення температури конденсації призводить до зростання коефіцієнтів тепловіддачі у відповідних точках.



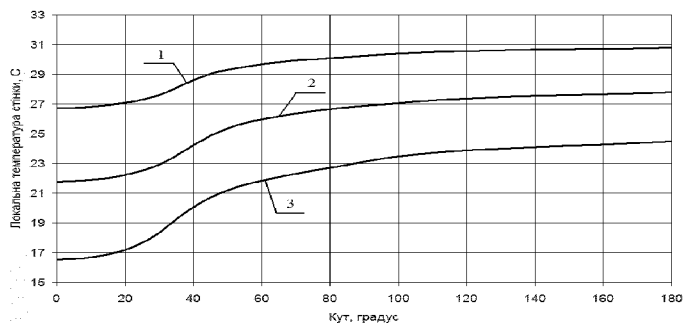
1 –  $t=27^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t=41^\circ\text{C}$

Рисунок 7 – Вплив температури на  $\alpha=f(\varphi)$  по периметру поперечного перерізу горизонтальної труби при  $q_{\text{зад}}=q_{\text{к}}=0$ ,  $q_{\text{роб}}=10160 \text{ Вт/м}^2$

В роботі також досліджувався вивчення вплив режимних параметрів на процес конденсації R407с в горизонтальних трубах.

На рис. 8 показано вплив середньої в поперечному перерізі густини теплового потоку  $q$  на розподіл температури поверхні теплообміну ( $t=\Phi(\varphi)$ ) в поперечному перерізі робочої ділянки ( на рис. 8:  $0^\circ$  - нижня, а  $180^\circ$  – верхня твірні робочої ділянки).

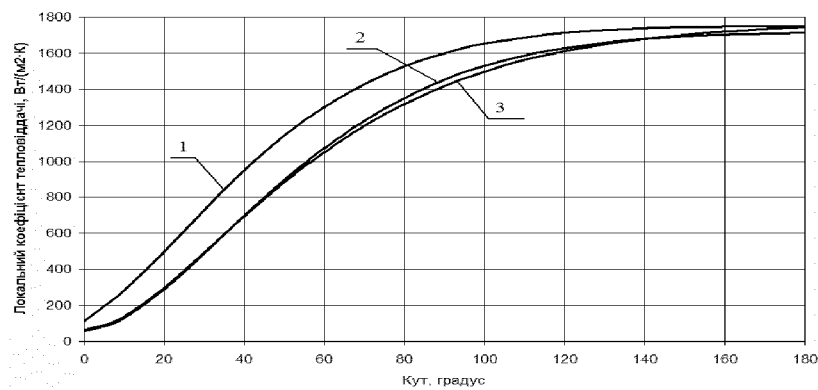
Із рисунка видно, що зміна  $q$  веде до розшарування кривих  $t = \Phi(\varphi)$ . При цьому при більших  $q$  температура поверхні теплообміну зменшується. В нижньому секторі горизонтальної робочої ділянки має місце суттєве зниження температури поверхні теплообміну. При збільшенні  $q$  цей сектор зростає з одночасним зростанням падіння температури. При  $q=7765 \text{ Вт/м}^2$  температура зменшується на 13%, при  $q=14064 \text{ Вт/м}^2$  - на 21,6%, а при  $q=15005 \text{ Вт/м}^2$  - на 32,7%. Подібний до розглянутого вигляд мають і залежності  $t = \Phi(\varphi)$ , отримані при конденсації хладона R22 (рис. 3).



1 –  $q=7765 \text{ Вт/м}^2$ ; 2 -  $14064 \text{ Вт/м}^2$ ; 3 -  $15005 \text{ Вт/м}^2$

Рисунок 8 – Вплив густини теплового потоку на розподіл температури по периметру поперечного перерізу горизонтальної труби при температурі конденсації  $37^\circ\text{C}$  та  $q_{\text{к}}=0$

На рис.9 показано розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по периметру поперечного перерізу горизонтальної труби при конденсації хладона R407с .



1 –  $q=7765 \text{ Вт/м}^2$ ; 2 -  $14064 \text{ Вт/м}^2$ ; 3 -  $15005 \text{ Вт/м}^2$

Рисунок 9 – Вплив густини теплового потоку на розподіл коефіцієнтів тепловіддачі по периметру поперечного перерізу горизонтальної труби при температурі конденсації  $37^\circ\text{C}$ ,  $q_s=400 \text{ Вт}$  та  $q_k=0$

Порівнюючи графіки на рис. 9 та рис. 4, можна зробити висновок про однаковий, якісний та близький кількісний характер залежностей  $\alpha = \Phi(\varphi)$  при близьких значеннях основних режимних параметрів. Цей факт можна пояснити близькістю ефективних фізичних властивостей хладона R407c (трёхкомпонентна суміш), до фізичних властивостей хладона R22 (однокомпонентний холодильний агент), а значить і однаковими режимами течії двофазного потоку в робочій ділянці стенда.

Слід відмітити, що така близькість значень коефіцієнтів тепловіддачі для хладонів, що порівнюються, має місце, коли коефіцієнт тепловіддачі при конденсації хладона R-407c віднесено до різниці температур плівки конденсату, та поверхні теплообміну (для хладона R407c температура конденсату в стані насичення не дорівнює температурі сухої насиченої пари).

## Список літератури

1. Webb R.L. Principles of Enhanced Heat Transfer. – N.Y.: John Wiley & Sons, 1994. – 556 p.
2. Rifert V.G., Smirnov H.G. Condensation Heat Transfer Enhancement. – Southampton, Boston.: WIT-Press, 2004. – 372 p.
3. Garcia-Valladares O. Review of In-Tube Condensation Heat Transfer Correlations for Smooth and Microfin Tubes // Heat Transfer Engineering. – 2003. – vol. 24(4). – P. 6-24.
4. Cavallini A., Censi G, Del Col D., et al. Condensation of refrigerants in smooth tubes: a new heat transfer model for heat exchanger design // 3<sup>rd</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. – 21-24 June 2004, Cape Town, South Africa.
5. Ei Hajal, Thome J.R., Cavallini A. Condensation in horizontal tubes. Part 1: Two-phase flow pattern map // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2003. – vol. 46. – P. 3349-3363.
6. Olivier J.A., Liebenberg L., Thome J.R., Meyer J.P. Heat transfer, pressure drop, and flow pattern recognition during condensation inside smooth, helical micro-fin, and herringbone tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – vol. 30. – P. 609-623.
7. Suliman R., Liebenberg L., Meyer J.P. Improved flow pattern map for accurate prediction of the heat transfer coefficients during condensation of R-134a in smooth horizontal tubes and within the low-mass flux range // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – vol. 52. – P. 5701-5711.
8. van Rooyen E., Christians M., Liebenberg L., Meyer J.P. Probabilistic flow pattern-based heat transfer correlation for condensing intermittent flow of refrigerants in smooth horizontal tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – vol. 53. – P. 1446-1460.
9. Вибір методики дослідження теплообміну при конденсації хладонів в горизонтальних трубах /В.В.Горин// Вимірювальна обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. - №1. – С. 211-214.

*В. Горин, В. Квасников*

**Влияние режимных параметров на процесс конденсации в середине горизонтальной трубы**

В статье приведены экспериментальные данные влияния режимных факторов на процесс конденсации хладонов внутри горизонтальных труб.

*V. Gorin, V. Kvasnikov*

**Influence of regime parameters on the process of condensation in the middle of horizontal pipe**

In article it is resulted experimental dates influence of regime factors on condensation process of Freon inside of horizontal-oriented even tubes.

Одержано 30.05.11