

УДК 536.423.3

Вт. В. Горін¹, Вл. В. Горін¹, Я. Є. Трокоз², В. В. Горін³, д.т.н.¹Компанія «АППЕК «Бородянка», м. Бородянка, Київська обл.²НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ³Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса**МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМІВ
ТЕЧІЇ ДВОФАЗОВИХ ПОТОКІВ УСЕРЕДИНІ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТРУБ**

У роботі проведено дослідження процесів кипіння двофазового газорідного потоку холодоагенту R22 усередині горизонтальної гладкої труби. Застосування і впровадження метрологічних норм та правил, конструкторських рішень у розробках необхідного устаткування, виготовлення, впровадження та використання необхідних засобів задля отримання необхідної точності вимірювання фізичних величин дозволило здобути достовірні дані щодо процесів кипіння робочої речовини у теплообмінній трубі. Дослідна ділянка складалася з мідної теплообмінної труби з внутрішнім діаметром $d_{in} = 17$ мм, двох ділянок відбору тиску та двох секцій візуалізації потоку з такими ж внутрішніми діаметрами, які були розташовані на вході та виході з труби. У стінку труби дослідної ділянки було зачеканено дев'ять хромель-копелевих термомпар із розрахунку по три термомпари за трьома перерізами труби, що дозволяло вимірювати середні температури стінки труби у кожному з трьох перерізів та локальні коефіцієнти тепловіддачі вздовж труби. Метод візуалізації режимів течії фаз усередині труби полягав у використанні швидкісної камери, яка фіксувала режими потоку через секції візуалізації. Дослідження тепловіддачі під час кипіння холодоагенту проводились за наступними режимними параметрами: температура насичення холодоагенту $t_s = 13,8\text{--}23,2$ °C, густина теплового потоку $q = 5, 10$ та 15 кВт/(м²К), масова швидкість $G = 92\text{--}450$ кг/(м²с), локальне значення масового паровмісту $x = 0,04\text{--}0,64$.

Результати експериментальних досліджень були оброблені за відповідною методикою розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, теплообмін, візуалізація, карта режимів.

Vt. V. Gorin, Vl. V. Gorin, Ya. E. Trokoz, V. V. Gorin², DSc**METROLOGICAL SUPPORT OF MEASUREMENTS OF FLOW REGIME
PARAMETERS IN TWO-PHASE FLOWS INSIDE HORIZONTAL PIPES**

This study investigates the boiling processes of a two-phase gas-liquid flow of refrigerant R22 inside a horizontal smooth tube. The application and implementation of metrological standards and rules, as well as engineering solutions in the development of the required equipment, manufacturing, and utilization of appropriate instruments to achieve the necessary measurement accuracy of physical quantities, enabled the acquisition of reliable data on the boiling processes of the working fluid in the heat exchange tube. The experimental section consisted of a copper heat exchange tube with an inner diameter of $d_{in}=17$ mm, two pressure tapping points, and two visualization sections with the same inner diameters located at the inlet and outlet of the tube. Nine chromel-copel thermocouples were embedded into the wall of the experimental tube section, arranged as three thermocouples at each of three cross-sections, allowing measurement of the average wall temperatures at each section and determination of local heat transfer coefficients along the tube. The visualization method of flow regimes inside the tube involved the use of a high-speed camera that recorded flow patterns through the visualization sections. Heat transfer investigations during refrigerant boiling were carried out under the following operating parameters: saturation temperature of the refrigerant $t_s = 13.8\text{--}23.2$ °C, heat flux density $q = 5, 10$, and 15 kW/(m²K), mass flux $G = 92\text{--}450$ kg/(m²s), and local vapor quality $x = 0.04\text{--}0.64$. The results of the experimental studies were processed using the appropriate methodology for calculating heat transfer coefficients. The obtained results were compared with existing empirical and theoretical flow regime maps.

Keywords: metrological support, heat transfer, visualization, flow regime map.

DOI 10.32684/2412-5288-2025-2-27-63-70

Постановка проблеми. Умови роботи випарників у складі холодильних машин та установок обумовлені невеликими температурними напорами між середовищами ($\Delta t = 6-8$ °C), що призводить до зменшення густини теплового потоку та, у кінцевому рахунку, до збільшення поверхні, яка передає тепло, загальної маси та габаритних розмірів випарників.

Найбільш дієвим способом зменшення розмірів випарників холодильних машин, підвищити їх енергетичну та економічну ефективність є інтенсифікація процесів теплообміну під час кипіння робочих речовин усередині труб.

Одним із шляхів підвищення інтенсифікації теплообміну є застосування труб із внутрішнім подовжнім або спіральним ребренням, застосування внутрішніх вставок, пористого покриття тощо. Однак, з метою порівняння ефективності ступеня розвитку внутрішньої поверхні теплообміну, необхідно провести дослідження процесів кипіння та гідродинаміки під час течії двофазного потоку усередині гладких труб. Порівняння результатів досліджень кипіння та гідродинаміки усередині гладкої труби з дослідженнями для труб з розвиненими внутрішніми поверхнями надасть змогу визначити оптимальний шлях у подальшому використанні таких труб у випарниках.

Відомо, що теплообмін під час кипіння речовин усередині труб взаємопов'язаний з гідродинамікою потоку. У рідині, що кипить у процесі руху вздовж труби, безперервно збільшується масовий паровміст x суміші за рахунок зменшення фази рідини, що призводить до змін гідродинамічної структури потоку вздовж труби.

У зв'язку з цим, однією з найважливіших задач у дослідженнях процесів кипіння усередині труб стають засоби метрологічного забезпечення вимірювань багатьох режимних параметрів. Такі заходи передбачають вимірювання температур поверхні труби та внутрішнього середовища за допомогою термопар, виміру масової витрати рідини об'ємним способом, вимірюванню тиску тощо. Надійні результати вимірювань режимних параметрів потоку сприяють достовірному визначенню режимів течії фаз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У наявній сучасній літературі існує велика кількість досліджень гідродинаміки та процесів кипіння робочих речовин усередині труб. У цих працях автори [1–7], на підставі отриманих результатів досліджень, пропонують або модифіковані карти режимів, або карти, для яких притаманні тільки ті умови (режимні параметри потоку, геометричні характеристики труб, робочі

речовини), для яких проводились дослідження.

Слід додати, що під час дослідження режимів течії двофазних потоків усередині горизонтальних труб використовуються різні методи, а саме: метод візуалізації режимів течії з вимірюванням витратних параметрів потоку, резистивні та лазерні методи тощо. Однак, з усіх відомих методів досліджень режимів, тільки метод візуалізації потоку разом з високошвидкісною фото- і відеозйомкою можна вважати методом прямих вимірювань. Існуючі інші методи визначення режимів є непрямими методами, а тому потребують уточнення або перевірки.

Мета дослідження: метрологічне забезпечення вимірювань параметрів режимів течії двофазових потоків усередині горизонтальних труб з метою визначення режимів течії насиченого потоку під час кипіння холодоагенту R22 усередині гладких теплообмінних труб.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Схема експериментального стенду та дослідного випарника, методика проведення досліджень та обробки отриманих результатів наведено у працях [8, 9]. Принципова відмінність полягає у тому, що у цьому дослідженні нагрів теплообмінної труби здійснювався електричним обігрівачем, методика дозволяла визначати локальні за довжиною труби коефіцієнти тепловіддачі.

Принципова схема експериментального стенду приведена на рис. 1.

Установка складалася з робочого контуру, електричного пульту управління, системи аварійного відключення живлення, системи збору та обробки інформації. Робочий контур установки було виконано замкнутим, а у якості робочої речовини використовувався холодоагент R22.

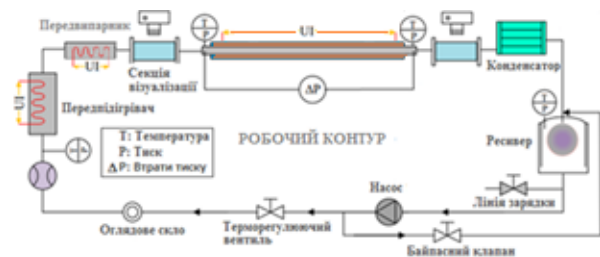


Рисунок 1 – Схема експериментального стенду

Електричний передпідігрівач був обладнаний двома електричними нагрівальними елементами (ТЕН), одиничною потужністю 2,5 кВт. Задля визначення температури холодоагенту до та після передпідігрівача в схемі були встановлені термометричні гільзи, у яких були введені протаровані хромель-копелеві термопари та встановлені лабораторні термометри типу ТЛ-4.

У ресивері та мірнику було встановлено оглядові вікна для визначення рівня рідини холодоагенту. Також, ресивер був обладнаний реле тиску для того, щоб у разі значень тиску, більш ніж допустимі, автоматично відключалися через регулятори напруги (РНО), ТЕН'и у передпідігрівнику та електричному нагрівачу передвипарника. У робочий контур складовою одиницею входив дослідний випарник, у який входили: передвипарник, дослідна ділянка, дві ділянки відбору тиску та дві секції візуалізації потоків. Секції візуалізації двофазового потоку являли собою скляні оглядові трубки також внутрішнього діаметру, що й експериментальна труба, які разом із ділянками відбору тиску встановлювалися між передвипарником і дослідною ділянкою та після неї.

Така конструкція дозволяла проводити спостереження за зміною гідравлічних режимів течії двофазового потоку на вході та виході з вимірювальної ділянки та мати можливість вимірювати втрати тиску.

Контур відбору тиску призначався для визначення перепаду тиску на дослідній ділянці та з'єднувався з ділянкою відбору тиску імпульсними трубками з $d_y = 3$ мм. Дослідна ділянка (рис. 2) нагрівалася ізольованим електричним обігрівачем та представляла собою мідну трубу, на яку був нанесений електроізоляційний матеріал – слюда. На шар слюди укладалася витками, в керамічних ізоляторах, ніхромовий дріт діаметром 0,8 мм.

У якості дослідної мідної труби використовувалися декілька видів труб: з гладкою внутрішньою поверхнею та з внутрішнім подовжнім і спіральним оребренням.

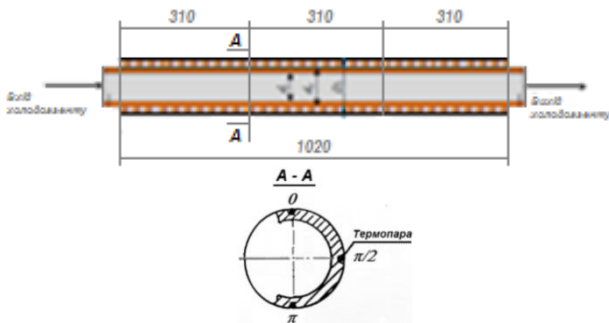


Рисунок 2 – Схема дослідної ділянки

У стінку труби дослідної ділянки було зачekanено дев'ять хромель-копелевих термопар із розрахунку по три термопари за трьома перерізами труби (рис. 2).

Така конструкція дозволяла вимірювати середні температури стінки труби у кожному з

трьох перерізів та локальні коефіцієнти тепловіддачі вздовж труби. Діаметр труби з гладкою внутрішньою поверхнею дослідної ділянки склав $d = 20 \times 1,5$ мм.

Термопари виготовлялися з хромелевого та копелевого дротів діаметром $d_{др} = 0,1$ мм. У стінку труби термопари зачеканювалися на глибину 0,35 мм за загальноприйнятою методикою. Термопари тарувалися у термостаті типу СЖМЛ-19/2.5, температура у якому контролювалася ртутним термометром з ціною поділу $0,1$ °С. Дані тарування за всіма термопарами методом найменших квадратів [10] апроксимувалися поліномами другого ступеня виду:

$$t = aE^2 + bE + c. \quad (1)$$

Передвипарник мав електричний нагрівач із ніхромової проволочки потужністю 1,0 кВт, плавна зміна потужності якого, у діапазоні від 0 до 1,0 кВт, забезпечувалось регулятором напруги типу РНО 250-10.

При течії двофазних потоків у трубах можливі широкий діапазон конфігурацій границь розділу фаз, але уявлення про паро-рідинні потоки до деякої міри спрощують, виконуючи класифікацію типів розподілу фаз, за відношенням один до одного у ряд категорій, які отримали назву режимів течії.

З усієї безлічі допустимих режимів течії виділяються типові режими, які узагальнено описують усю структуру течії двофазних потоків під час конденсації у трубах.

У двофазових потоках можуть існувати різні режими течії, але ж єдиної загальноприйнятої класифікації цих режимів не існує. Авторами багатьох праць використовується різна візуальна класифікація можливих структур і режимів течії.

Для наочності приведемо характеристику типових режимів течії за довжиною труби, у залежності від швидкості потоку, які розглянуті у [11] та наведені на рис. 3.

Досить велика кількість карт режимів течії потоків різних авторів була побудована за допомогою візуальних спостережень та на основі аналізу дослідних даних. Однак, усі ці карти режимів не в повній мірі враховують реальні умови роботи горизонтальних випарників, тому що були отримані, як правило, під час дослідження адиабатних потоків водо-повітряних та паро-водяних сумішей.

Наявні карти режимів, які призначені для процесів випаровування, дозволяють визначати режими течії потоків за відомими значеннями масових швидкостей, геометричних розмірів труб і фізичних властивостей робочих речовин.



Рисунок 3 – Характерні режими течії фаз у горизонтальній трубі [11]

Сучасні методи вимірювання дозволяють отримувати нові експериментальні дані, які більш ретельно ураховують межі переходу режимів течії від одного до іншого, що призводить до створення нових модифікованих карт режимів. У цій праці дослідження тепловіддачі під час кипіння холодоагенту R22 усередині горизонтальних труб проводились за наступними режимними параметрами: температура насичення холодоагенту $t_s = 13,8\text{--}23,2$ °С, густина теплового потоку $q = 5, 10$ та 15 кВт/(м²К), масова швидкість $G = 92\text{--}450$ кг/(м²с), локальне значення масового паровмісту $x = 0,04\text{--}0,64$.

У цій праці, для співставлення експериментальних даних режимів течії фаз з наявними картами режимів, були обрані діаграми течії фаз із відомих праць [12–14]. Для цього співставлення отримані дослідні дані оброблялися за відповідними кореляціями відповідної карти режимів.

Автори праці [12] розробили теоретичну карту режимів течії двофазного потоку усередині труб. Авторами праці був запропонований зв'язок між силами, що впливають на фази, а саме: підйомна сила, поверхневий натяг та перепад тиску. За допомогою цих сил вони створили безрозмірні параметри, які використовували в якості координат щодо формування течій у горизонтальних та нахилених трубах.

При цьому використовувалися наступні величини:

- приведені швидкості рідини та газу:

$$U_l = (1 - x)G / \rho_l \quad (2)$$

$$U_g = xG / \rho_g \quad (3)$$

- співвідношення втрат напору на тертя, яке представлено параметром Локарта-Мартінеллі X [15]:

$$X = \left[\frac{(dp/dx)_l}{(dp/dx)_g} \right]^{1/2} \quad (4)$$

де $(dp/dz)_l$ та $(dp/dz)_g$ – градієнти тиску через тертя для фаз рідини або газу відповідно, за умови, що у трубі тече тільки рідина або газ.

$$(dp/dx)_k = - \frac{2f_k G_k^2}{\rho_k D} \quad (5)$$

$$f_k = 16 / \text{Re}_k, \quad \text{Re}_k < 2000 \quad (6)$$

$$f_k = 0,079 / \text{Re}_k^{1/4}, \quad \text{Re}_k > 2000 \quad (7)$$

де k позначає тільки рідину ($k = l$) або тільки газ ($k = g$).

Граничні криві між режимами потоку проходять вздовж ординати різних функцій.

Для переходу між хвильовою течією та кільцевою відповідна крива визначає межу залежно від функції F :

$$F = \sqrt{\frac{\rho_g}{(\rho_l - \rho_g)}} \frac{U_g}{\sqrt{Dg \cos \alpha}} \quad (8)$$

Функція F представляє добуток відносної густини фаз на число Фруда, α – кут нахилу труби відносно горизонталі.

Підйом хвиль, що починається у стратифікованому потоці, виражений функцією K :

$$K = \left[\frac{\rho_g U_g^2 U_l}{(\rho_l - \rho_g) g v_l \cos \alpha} \right]^{1/2} \quad (9)$$

У залежність (5) введена кінематична в'язкість рідини ν_l , оскільки утворення хвиль викликається силами напруги зсуву між газом та рідиною.

Межа між бульбашковим потоком і стратифікованим визначається величиною втрат напору внаслідок тертя $(dp/dz)_l$ тільки фази рідини (умовно у трубі тече тільки рідина) та підйомом газу $(\rho_l - \rho_g)g$:

$$T = \left[\frac{|(dp/dx)_l|}{(\rho_l - \rho_g) g \cos \alpha} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Для переходу від кільцевої течії до бульбашкової та перехідної течій автори знайшли дуже простий критерій, що знаходиться вздовж $X = \text{const}$.

Задля з'ясування режимів течії фаз під час кипіння холодоагенту R22 у гладкій трубі, нами були оброблені результати досліджень цієї роботи за відповідними формулами (2)–(10) [12] та проведено співставлення отриманих експериментальних даних з картою режимів (рис. 4).

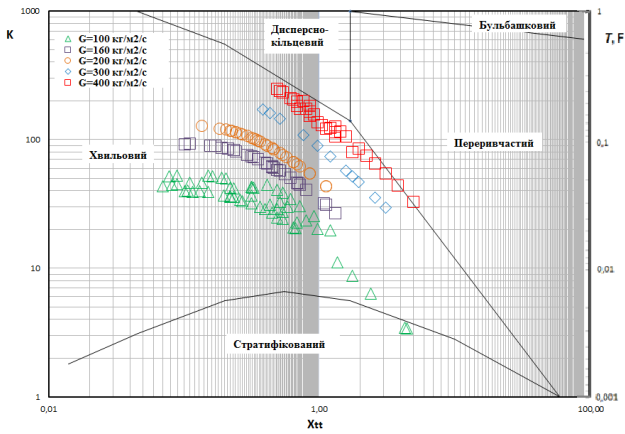


Рисунок 4 – Режими течії холодоагенту R22 усередині труби у відповідності до [12]

Наведена карта відрізняється великою гнучкістю і різноманітністю параметрів процесу, що впливають на режими течії, однак ця карта отримана для випадку течії двофазного адіабатного потоку.

Автор експериментальної роботи [13] представив карту режимів течії двофазових потоків щодо випарників холодильних установок. У роботі досліджувалось кипіння холодоагенту R12, який протікав в одиночному горизонтальному змійовику з внутрішнім діаметром труби $d_{in} = 26$ мм.

У роботі запропонована карта режимів течії, де за віссю ординат карти знаходиться комплекс величин у вигляді:

$$Aw_v = [Fr_v Re_v (\rho_v / \rho_l)]^{1/3}, \quad (11)$$

$$A = [\rho_g / (\rho_l g v_g)]^{1/3}$$

де $Fr_v = w_v^2 / (g d_{in})$ – число Фруда для пари;

$Re_v = w_v d_{in} / \nu_v$ – число Рейнольдса для пари;

w_v – приведена швидкість пари;

ρ_v, ρ_l – густина пари та рідини відповідно.

За віссю абсцис знаходиться комплекс величин, який визначається наступним рівнянням:

$$B(w_v w_l)^{1/3} = [We(v_v / \nu_l)(w_v / w_l)]^{1/3}, \quad (12)$$

$$B = [(v_l / \nu_g)(d_{in} \rho_v / \sigma)]^{1/3}$$

де $We = (w_v d_{in} \rho_v) / \sigma$ – число Вебера;

w_l – приведена швидкість рідини;

ν_v та ν_l – кінематичні коефіцієнти в'язкості пари та рідини відповідно;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

Карта режимів дозволяє простежити послідовність змін зазначених комплексів (11) і (12)

за різних значень швидкостей пари та рідини.

На рис. 5 нанесені експериментальні дані цієї роботи при кипінні холодоагенту R22 у гладкій трубці, які були обчислені за відповідними формулами (11) і (12) та проведено співставлення таких результатів із картою режимів течії з роботи [13].

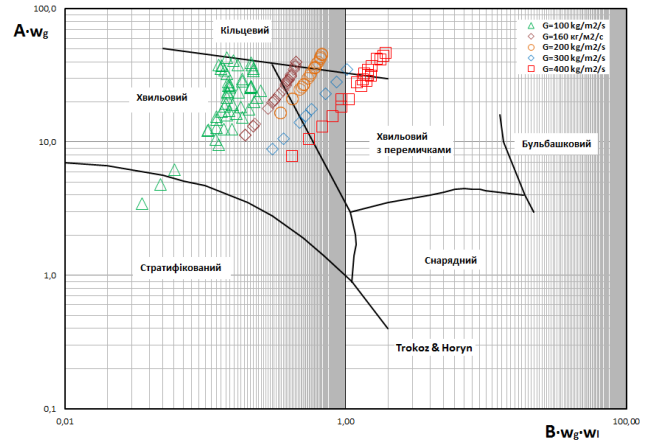


Рисунок 5 – Режими течії холодоагенту R22 усередині труби у відповідності до [13]

Достовірність запропонованої карти режимів течії фаз для горизонтальної труби недостатньо обґрунтована автором, тому що течія потоку усередині змійовика, особливо за нижньої подачі холодоагенту, відрізняється від горизонтальної труби.

Авторами іншої експериментальної праці [14] (продовження дослідження [16]) представлено карту двофазного паро-рідинного потоку у горизонтальних трубах у координатах j_l (поверхнева швидкість течії рідини) та j_g (поверхнева швидкість течії пари), основа якої побудована на базі даних з 5935 спостережень за горизонтальними режимами течії.

Слід зазначити, що більшість даних було використано у разі течії повітря-вода, а тому авторами праці було застосовано корекції щодо фізичних властивостей інших речовин з метою отримання більш широкого діапазону значень параметрів у разі використання карти режимів (табл. 1).

На карті режимів [14] виділено шість режимів течії: стратифікований, бульбашковий, корковий, хвильовий, кільцевий та дисперсний.

Нами, для співставлення експериментальних даних за режимами течії, було нанесено дані з цієї роботи на карту режимів течії двофазового потоку [14] у відповідності до її координат (рис. 6).

Таблиця 1 – Обмеження карти режимів та фізичні властивості експерименту [14]

Параметр	Діапазон
Внутрішній діаметр труби d_{in} ,	12,7–165,1
Густина рідини ρ_l , кг/м ³	704,8–1009
Густина газу ρ_g , кг/м ³	0,8–50,5
К-т динамічної в'язкості рідини μ_l , Па·с	$3 \cdot 10^{-4}$ –0,09
К-т динамічної в'язкості пари μ_g , Па·с	10^{-5} – $2,2 \cdot 10^{-5}$
К-т поверхневого натягу σ , Н/м	$24 \cdot 10^{-3}$ –0,1
Поверхнева швидкість рідини j_l , м/с	$9 \cdot 10^{-4}$ –7,32
Поверхнева швидкість пари j_g , м/с	0,043–170,7

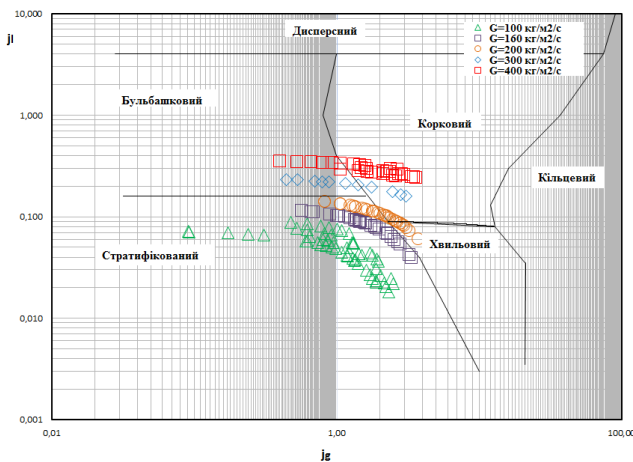


Рисунок 6 – Режими течії холодоагенту R22 усередині труби у відповідності до [14]

Використання методу візуалізації режимів течії двофазового потоку на виході з дослідної ділянки, фото та відеофіксація відповідних режимів, показало наступне.

У разі невеликих значень теплового потоку $q = 5$ кВт/м², масової швидкості $G = 100$ кг/(м²с) та малих значень масового паровмісту x спостерігався стратифікований режим течії фаз.

Із збільшенням масової швидкості $G > 160$ кг/(м²с) та для усіх значень масового паровмісту x при $q > 10$ кВт/м² починається хвильовий режим. Подальше збільшення масової швидкості призводить до появи хвильового з перемичками режиму течії та, у подальшому, до утворення хвильового з перемичками - напівкільцевого режиму. Слід зазначити, що у дослідженні, за всіх параметрів потоку, кільцевий режим течії фаз не спостерігався.

За всіх значень густини теплового потоку q та масового паровмісту x , внаслідок зростання швидкості парового потоку w_v та кількості пари, зростає винесення рідини з парою.

Така тенденція сприяє покращенню змочування рідиною верхньої частини труби навіть у разі стратифікованого та хвильового режимів течії фаз. Тому, навіть на виході з труби, тобто достатньо далеко від входу двофазного потоку в трубу, спостерігалось стікання плівки рідини з верхньої твірної труби вниз під деяким кутом до твірної труби.

Аналіз режимів течії фаз у співставленні з розглянутими у роботі карт режимів показав наступну картину. Згідно з теоретичною картою режимів течії фаз [12] (рис. 4) майже всі нанесені на карту дослідні дані показують хвильовий режим течії фаз.

У разі великих значень теплового потоку $q = 15$ кВт/м² та масової швидкості $G \geq 400$ кг/(м²с) хвильовий режим наближається до хвильового з перемичками. Стратифікований режим спостерігається тільки за малих значень теплового потоку $q = 5$ кВт/м² та масової швидкості $G = 100$ кг/(м²с).

Експериментальна карта режимів [13] показує стратифікований та хвильовий режим тільки малих значень теплового потоку $q = 5$ кВт/м² та масової швидкості $G = 100$ кг/(м²с). У разі збільшення масової швидкості $G \geq 160$ кг/(м²с) спостерігаються три режими течії фаз, а саме: хвильовий, хвильовий з перемичками та, при $q = 15$ кВт/м², кільцевий. При цьому стратифікований потік не спостерігається.

Аналіз експериментальної карти режимів [14] свідчить, що стратифікований режим спостерігається тільки при двох значеннях масової швидкості 100 і 160 кг/(м²с) та за всіх значень теплового потоку. У разі $G = 200$ кг/(м²с) режими течії позиціонуються як стратифікований, корковий та хвильовий. При $G \geq 300$ кг/(м²с) спостерігається бульбашковий та корковий режими течії.

Висновки та перспективи подальших наукових досліджень

1. Застосування і впровадження метрологічних норм та правил, конструкторських рішень, виготовлення, впровадження та використання необхідних засобів задля отримання необхідної точності вимірювання фізичних величин дозволило здобути достовірні дані щодо процесів кипіння робочої речовини у теплообмінній трубі.

2. Метод візуалізації двофазного потоку під час кипіння холодоагенту R22 дозволив визначити наявні режими течії фаз за різних значень режимних параметрів.

3. Порівняння результатів візуалізації режимів з інформацією, яку надають зазначені у

роботі карти режимів показало, що найкраще описує результати досліджень теоретична карта режимів з праці [12]. Експериментальна карта режимів з роботи [13] показала хороший збіг з результатами візуалізації режимів. Однак, у разі великих значень теплових, карта показує кільцевий режим течії, що у експериментах не спостерігалось.

4. Ймовірна причина неточності карти режимів з праці [14] полягає в тому, що у неї в якості координат були використані витратні параметри, які при певних значеннях фізичних властивостей речовин, геометричних розмірів труб, умов проведення експерименту тощо, втрачають фізичний сенс, що призводить до значних похибок.

5. Важливим напрямом подальших досліджень процесів кипіння речовин усередині труб є створення більш універсальних карт режимів течії на основі узагальнення великого масиву дослідних даних з використанням більшого спектру робочих речовин та удосконалення методів досліджень.

Список використаних джерел

1. Cheng, L., Ribatski, G., Wojtan, L., Thome J. R. (2006). New flow boiling heat transfer model and flow pattern map for carbon dioxide evaporating inside horizontal tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 4082–4094. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.04.003>.
2. Sassi, P., Pallares, J., Stiriba, Y. (2020). Visualization and measurement of two-phase flows in horizontal pipelines. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2 (1), 41–51. <https://doi.org/10.1007/s42757-019-0022-1>.
3. Kattan, N., Thome, J. R., Favrat, D. (1998). Flow boiling in horizontal tubes. Part 1: Development of a diabatic two-phase flow pattern map. *Journal of Heat Transfer*, 120 (1), 140–147. <https://doi.org/10.1115/1.2830037>.
4. Kattan, N., Thome J. R., Favrat, D. (1998). Flow Boiling in Horizontal Tubes: Part 3: Development of a New Heat Transfer Model Based on Flow Pattern. *Journal of Heat Transfer*, 120 (1), 156–165. <https://doi.org/10.1115/1.2830039>.
5. Yang, Ch.-M., Hrnjak, P. (2020). A new flow pattern map for flow boiling of R410A in horizontal micro-fin tubes considering the effect of the helix angle. *International Journal of Refrigeration*. 109, 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.09.013>.
6. Wojtan, L., Ursenbacher, T., Thome, J. R. (2005). Investigation of flow boiling in horizontal tubes: part I – a new diabatic two-phase flow pattern map. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (14), 2955–2969. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.012>.
7. Lecardonnel, A., Falsetti, C., Tempesti, C., Laboureur, D. (2025). About two-phase flow distribution improvement in the header of a simplified evaporator: A multi-factorial study with the help of a Design of Experiment technique. *Applied Thermal Engineering*, 279, Part D., 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128034>.
8. Горін Вт.В., Горін Вл.В., Трокоз Я.Є., Горін В.В. Теплообмін під час кипіння холодоагенту усередині оребрених труб. *Збірник тез 18 Міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2025)»* (20-21 травня 2025 р., Київ), Київ, 2025. С. 222–224.
9. Трокоз Я. Є., Горін В. В., Горін Вт. В., Горін Вл. В. Дослідження теплообміну під час кипіння холодоагентів усередині профільованих труб. *Збірник наукових праць ОДАТРЯ*. 2025. Вип. 1(26). С. 135–142. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2025-1-26-135-142>.
10. Корн Г., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Наука: 1970. 720 с.
11. Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J., Crawford, T. (1979). Effects of Fluid Properties and Pipe Diameter on Two-Phase Flow Patterns in Horizontal Lines. *International Journal of Multiphase Flow*, 5, 437-462.
12. Taitel, Y., Dukler, A.E. (1976). A Model for Predicting Flow Regime Horizontal and near Horizontal Transitions Horizontal Gas-Liquid Flow. *AIChE Journal*, 22, 47-55. <https://doi.org/10.1002/aic.690220105>.
13. Ван дер Ягт М. Ф. Г. Двухфазный поток в испарителе. *Холодильная техника*. 1976. № 7. С. 42–43.
14. Mandhame, J. M., Gregory, G. A., Aziz, K. (1974). A flow pattern map for-liquid flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1 (4), 537–553.
15. Lockhart, R.W., Martinelli, R.C. (1949). Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes. *Chemical Engineering Progress*, 45 (1), 38-48.
16. Govier G.W., Aziz K. The Flow of Complex Mixtures in Pipes. Van Nostrand Reinhold Co. New York: 1972. 792 p.

References

1. Cheng, L., Ribatski, G., Wojtan, L., Thome J. R. (2006). New flow boiling heat transfer model and flow pattern map for carbon dioxide evaporating inside horizontal tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 4082–4094. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.04.003>.
2. Sassi, P., Pallares, J., Stiriba, Y. (2020). Visualization and measurement of two-phase flows in horizontal pipelines. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2 (1), 41–51. <https://doi.org/10.1007/s42757-019-0022-1>.
3. Kattan, N., Thome, J. R., Favrat, D. (1998). Flow boiling in horizontal tubes. Part 1: Development of a diabatic two-phase flow pattern map. *Journal of Heat Transfer*, 120 (1), 140–147. <https://doi.org/10.1115/1.2830037>.
4. Kattan, N., Thome J. R., Favrat, D. (1998). Flow Boiling in Horizontal Tubes: Part 3: Development of a New Heat Transfer Model Based on Flow Pattern. *Journal of Heat Transfer*, 120 (1), 156–165. <https://doi.org/10.1115/1.2830039>.
5. Yang, Ch.-M., Hrnjak, P. (2020). A new flow pattern map for flow boiling of R410A in horizontal micro-fin tubes considering the effect of the helix angle. *International Journal of Refrigeration*, 109, 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.09.013>.
6. Wojtan, L., Ursenbacher, T., Thome, J R. (2005). Investigation of flow boiling in horizontal tubes: part I – a new diabatic two-phase flow pattern map. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (14), 2955–2969. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.012>.
7. Lecardonnell, A., Falsetti, C., Tempesti, C., Laboureur, D. (2025). About two-phase flow distribution improvement in the header of a simplified evaporator: A multi-factorial study with the help of a Design of Experiment technique. *Applied Thermal Engineering*, 279, Part D., 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128034>.
8. Horin Vt. V., Horin Vl. V., Trokoz Ya. E., Horin V. V. Teploobmin pid chas kypinnya kholodoagentu useredyni orebrenykh trub. Zbirka tez 18 Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii “Intehrovani intelektualni robototekhnichni kompleksy” (IIRTK-2025)» (20-21 travnya 2025 r., Kyiv), Kyiv, 2025. S. 222-224.
9. Horin Vt. V., Horin Vl. V., Trokoz Ya. E., Horin V. V. Doslidzennya teploobmenu pid chas kypinnya kholodoagentiv useredyni prophiliovanykh trub. *Zbirnik naukovih prac' Odes'koï derzhavnoï akademii tehničnogo regulivannâ ta âkosti*. 2025. Vup. 1(26). S. 135-142. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2025-1-26-135-142>.
10. Korn G, Korn T.M. Spravochnik po matematike dkyâ nauchnyh rabotnikov i ingenerov. Nauka: 1970. 720 s.
11. Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J., Crawford, T. (1979). Effects of Fluid Properties and Pipe Diameter on Two-Phase Flow Patterns in Horizontal Lines. *International Journal of Multiphase Flow*, 5, 437-462.
12. Taitel, Y., Dukler, A.E. (1976). A Model for Predicting Flow Regime Horizontal and near Horizontal Transitions Horizontal Gas-Liquid Flow. *AIChE Journal*, 22, 47-55. <https://doi.org/10.1002/aic.690220105>.
13. Van der Jagt M.F.G. Dvuhfaznyi potok v isparitele. *Kholodilnaya tehnika*. 1976. № 7. S. 42-43.
14. Mandhame, J. M., Gregory, G. A., Aziz, K. (1974). A flow pattern map for-liquid flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1 (4), 537–553.
15. Lockhart, R.W., Martinelli, R.C. (1949). Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes. *Chemical Engineering Progress*, 45 (1), 38-48.
16. Govier G.W., Aziz K. The Flow of Complex Mixtures in Pipes. Van Nostrand Reinhold Co. New York: 1972. 792 p.

Надійшла до редакції 09.11.2025