ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 536.423.4

М.К.БЕЗРОДНИЙ, А.І.ДЕЙНЕКО, П.О.БАРАБАШ

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ КОНДЕНСАЦІЇ ХЛАДОНІВ

Вступ

Стійка тенденція глобальних змін кліматичних умов негативно впливає на флору і фауну нашої планети. Основною причиною таких змін вважається техногенний вплив господарчої діяльності людини на навколишнє середовище. Одним із чинників такого впливу є широке використання традиційних хладонів - розповсюджених теплоносіїв холодильної техніки, пари яких, потрапляючи в навколишнє середовище, призводять до руйнування озонового прошарку атмосфери.

Розроблені останнім часом нові альтернативні хладони не мають негативного впливу на озоновий шар атмосфери, але використання їх стримується, в тому числі, відсутністю в літературі інформації про закономірності теплообміну в апаратах, де теплоносіями є такі хладони.

В зв'язку з відзначеним, актуальними є дослідження процесів теплообміну в елементах теплообмінних апаратів, у яких теплоносіями є нові робочі тіла. Одержані результати забезпечать створення методики розрахунку перспективних, екологічно безпечних холодильних установок.

Аналітично розв'язати систему диференційних рівнянь, що описують рух плівки конденсату та теплообмін, який при цьому відбувається, внаслідок складності процесів, у цей час практично неможливо. При експериментальному дослідженні впливу на процес конденсації якої-небудь однієї величини решту потрібно зберігати незмінними, що не завжди вдається досягти через велику кількість змінних. Крім того, при цьому необхідно бути впевненим, що результати отримані з допомогою будь-якої конкретної установки (моделі), можна перенести на інші процеси (зразки). В деяких випадках вирішити такі труднощі допомагають методи теорії подібності.

В літературних джерелах [1-5] розглядають проблеми гідродинамічної, теплової та термодинамічної подібності.

В цій роботі зроблена спроба використати теорію термодинамічної подібності при дослідженні теплообміну під час конденсації пари альтернативних хладонів в трубах.

Основи теорії термодинамічної подібності

Розглянемо рівняння Ван-дер-Ваальса [5].

$$\left(p+\frac{a}{\upsilon^2}\right)\left(\upsilon-b\right)=RT\,, \qquad (1)$$

де a та b - константи, які сумісно з газовою постійною характеризують індивідуальні властивості речовин.

Якщо в рівнянні термічні параметри (p, υ, T) віднести до значень цих величин в критичній точці, то отримаємо приведені тиск, питомий об'єм та температуру:

$$\pi=\frac{p}{p_{кр}},\quad \omega=\frac{\upsilon}{\upsilon_{кр}},\quad \tau=\frac{T}{T_{кр}}, \qquad (2)$$

а рівняння буде мати вигляд:

$$\left(\pi+\frac{3}{\omega^2}\right)\left(3\omega-1\right)=8\tau\,. \qquad (3)$$

Рівняння Ван-дер-Ваальса у вигляді (3) має цікаву особливість: воно не містить ні однієї константи, яка була б пов'язана з індивідуальними властивостями речовини. Звідси випливає так званий закон відповідних станів: якщо дві речовини, стан яких описується рівнянням Ван-дер-Ваальса, або будь-яким іншим рівнянням стану в безрозмірному вигляді, мають однакові значення двох з трьох приведених параметрів стану (π, ω або τ), то значення третього приведеного параметра буде для них також однаковим. Стани двох речовин, в яких вони мають однакові значення π, ω та τ, прийнято називати відповідними. Речовини, що підпорядковуються законові відповідних станів, називаються термодинамічно подібними.

Можливість використання методу термодинамічної подібності є заманливою. Якщо дві речовини є термодинамічно подібними, то за відомими теплофізичними властивостями однієї з речовин можна знайти властивості іншої

речовини, достатньо лише знати критичні параметри цієї речовини [1-5].

Але питання про термодинамічну подібність речовин не таке просте, як це може здатися на перший погляд. Причина цього полягає в наступному. В математиці доводиться, що до безрозмірного вигляду можуть бути приведені тільки такі рівняння, в яких число констант не більше числа незалежних рівнянь, що описують властивості даної поверхні.

У випадку реальних газів рівняння стану (наприклад, рівняння Майера-Боголюбова), має число констант значно більше трьох [1]:

$$p\upsilon = RT\left(1-\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k}{k+1}\frac{\beta_k}{\upsilon^k}\right), \qquad (4)$$

де β_k - коефіцієнти, що залежать тільки від температури (віріальні коефіцієнти). Звідси можна зробити висновок, що рівняння стану реального газу в загальному вигляді не може бути приведене до безрозмірного вигляду. Тому закон відповідних станів, що строго виконується для ідеальних речовин, не дійсний для реальних середовищ, тобто, термодинамічно подібних речовин не існує.

Одначе досвід показує, що закон відповідних станів наближено виконується і для ряду реальних середовищ.

Для застосування закону відповідних станів до реальних речовин використовується метод розрахунку за узагальненими даними. Суть цього методу полягає в наступному. Встановлено, що закон відповідних станів для речовин виконується тим точніше, чим ближче ці речовини одна до одної за своїми фізико-хімічними властивостями. Як чинники, що визначають ступінь близькості властивостей речовин, звичайно вибираються:

I. Речовини, що відносяться до одного і того ж типу хімічних сполук [4]:

1) важкі інертні гази (Ar, Kr, Xe);

2) легкі інертні гази (Ne, He);

3) двоатомні речовини з неполярними або майже полярними молекулами (N_2, O_2, CO);

4) двоатомні речовини з неполярними молекулами, що мають меншу молекулярну вагу порівнянно з речовинами третьої групи (H_2);

5) речовини з неполярними, симетричними та молекулами, що слабо поляризуються (CO_2);

6) речовини з неполярними, високосиметричними молекулами, що не поляризуються (CCl_4);

7) речовини з неполярними, несиметричними молекулами, що поляризуються (CS_2);

8) речовини з слабо полярними та нескладними молекулами (COS, $CHCl_3$);

9) речовини, молекули яких мають більш сильну полярність (складні ефіри);

10) речовини з сильно полярними молекулами (азотні об'єднання);

11) речовини з молекулами з водневим зв'язком (H_2O);

12) речовини з хімічно активними молекулами (NO_2).

II. Речовини, у яких близькі значення критичних коефіцієнтів:

$$z_{кр} = \frac{p_{кр}\upsilon_{кр}}{RT_{кр}}. \qquad (5)$$

III. Можливі інші варіанти.

Необхідно звернути увагу на те, що для речовин, стан яких описується рівнянням Ван-дер-Ваальса, величина критичного коефіцієнта [5] дорівнює:

$$z_{кр} = \frac{3}{8} = 0{,}375. \qquad (6)$$

Значення $z_{кр}$ для деяких речовин наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Речовина	$z_{кр}$	Речовина	$z_{кр}$
Гелій	0,320	Ксенон	0,278
Водень	0,330	Вода	0,224
Азот	0,293	Бензин	0,267
Аргон	0,292	Оцтова кислота	0,200
Кисень	0,293	Метиловий спирт	0,219

Як видно з цієї таблиці, критичні коефіцієнти реальних речовин відрізняються від Ван-дер-Ваальсового значення $z_{кр}$=0,375 досить суттєво.

Використання теорії подібності при дослідженні процесів конденсації

Актуальні фактори, що визначають закономірності тепловіддачі при конденсації, обумовлюються режимом течії двофазного пароконденсатного потоку. При конденсації в горизонтальній трубі цей режим визначається:

а) дотичним напруженням (конденсація швидко рухомої пари);

б) силою тяжіння (конденсація пари, що рухається з помірною швидкістю, або конденсація практично нерухомої пари);

в) проміжний випадок, коли суттєво впливають обидва фактори.

Варіант *а)* реалізується при інтенсивному охолодженні труби, а варіант *б)* має місце при мало інтенсивному охолодженні.

В літературі дослідники виділяють ряд режимів плину потоків при конденсації пари в горизонтальній трубі. Зокрема на рис. 1 показано поділ режимів, запропонований в [6], а на рис. 2 - в роботі [7].

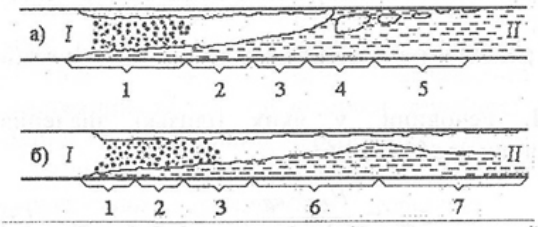

Рис. 1. Зміна режимів течії при конденсації пари в горизонтальній трубі [6]:

а) швидко рухомий потік пари;

б) потік пари з помірною швидкістю або нерухома пара;

I - однофазний потік перегрітої пари;

II - однофазний потік рідини;

1 - дисперсно-кільцевий;

2 - кільцевий;

3 - напівкільцевий;

4 - сильні хвилі;

5 - пробковий;

6 - хвильовий;

7 - стратифікований.

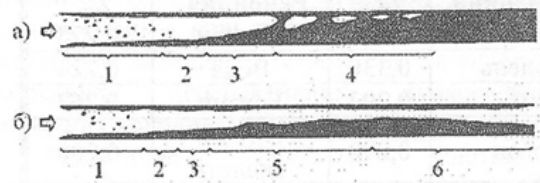

Рис. 2. Зміна режимів при конденсації в горизонтальній трубі [7]:

а) швидко рухомий потік пари;

б) потік пари з помірною швидкістю;

1 - туманно-кільцевий;

2 - кільцевий;

3 - кільцевий з великою стратифікацією;

4 - уповільнений потік з витягнутими бульками;

5 - хвильовий;

6 - стратифікований.

Вивчення плівкової конденсації базується на узагальненні експериментальних даних методами теорії подібності з отриманням критеріальних залежностей виду:

$$Nu = f(B_i), \qquad (7)$$

де B_j - безрозмірні комплекси (числа подіб-ності).

Враховуючи викладене вище, можна зробити висновок, що конкретний вигляд залежності (7) визначається суб'єктивним впливом конкретного автора та об'єктивними факторами - гідродинамічним режимом пароконденсатного потоку.

Деякі залежності для розрахунку тепловіддачі при конденсації хладонів в горизонтальних трубах наведені в роботі [8]. Режим та геометричні умови проведення цих досліджень показані в таблиці 2.

Результати обчислення коефіцієнтів тепловіддачі за формулами ряду авторів [8] для хладону R-134a представлені на рис.3.

Як видно з цього рисунка, між результатами розрахунку за формулами різних авторів спостерігається значна розбіжність. Основною причиною цього є складність гідродинамічних та теплових процесів, що супроводжують плівкову конденсацію, та не дають можливості побудови точної математичної моделі процесу і, як наслідок, поява суб'єктивного фактора під час аналізу та узагальнення результатів досліджень.

Використання нових робочих речовин (особливо в холодильній техніці), та відсутність надійних даних про їх теплофізичні властивості створює додаткові труднощі при спробі використання відомих розрахункових залежностей в цих умовах.

Враховуючи відзначене, автори [1, 3] запропонували при розгляді конкретних задач теплообміну, крім рівнянь переносу, включити в математичну модель аналітичні умови, які забезпечують подібність параметрів стану системи (p, T) та фізичних властивостей робочих тіл. Такий підхід дозволив зробити висновок, що критеріальна залежність (7) буде справедливою для різних теплоносіїв лише у відповідних точках, що визначаються для лінії насичення умовою $p/p_{кр}$=idem .

За такого підходу рівняння (7) для випадку конденсації в трубах може бути записане у вигляді:

$$\alpha = f(q, l, d, M, R, g, T_{кр}, p_{кр}, F(p/p_{кр})), \qquad (8)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі;

μ - молекулярна маса речовини;

g - прискорення вільного падіння;

$T_{кр}$ - температура в критичній точці;

$p_{кр}$ - тиск в критичній точці;

R - універсальна газова постійна;

$F(p/p_{кр})$ - універсальна функція для термодинамічно подібних речовин, що характеризує вплив тиску на тепловіддачу.

Таблиця 2

Дослідник (рік)	Речовини	Внутрішній діаметр, мм	Масовий потік, кг/(м²·с)	Додаткові умови
1	2	3	4	5
Jaster та Kosky (1976)	Водяна пара	12,5	12,6…145	$5< x_g <60\%$
Shah (1979)	Вода, R11, R12, R22, R113, метанол, етанол, бензол, толуол, трихлоретилен	7…40	10,83… 210,55	$5< x_g <60\%$ $21< t_н <310°C$ $0,158<q<1893$ кВт/м² $1< Pr_{рід} <13$ $100<Re_{рід} <63000$ $0,002< P/P_{кр} <0,44$
Tang та ін. (2000)	R22, R134a, R410A	8,81	250…810	$35< t_н <45°C$ $5,5< q <37$ кВт/м² $0,2< P/P_{кр} <0,53$ $Fr_{so} >7$
Bivens та Yokozeki (1994)	R22, R502, R32/R134a, R32/R125/R134a	10	175…650	$10< x_g <99\%$ $20< t_н <40°C$ $0,35< q <30,9$ кВт/м²
Tandon та ін. (1995)	R12, R22			
Dobson та ін. (1994) Dobson і Chato (1998)	R12, R22, R134a, R32/R125 (50/50%), R32/R125 (60/40%)	3,14… 7,04	25…800	$10< x_g <90\%$ $35< t_н <45°C$ $5< q <15$ кВт/м² $0,21< P/P_{кр} <0,57$
Fujii (1995) Cavallini та ін. (2001)	R22, R134a, R123 R22, R134a, R125, R236ea, R32, R410A	8,4 8	100…750	$15< x_g <85\%$ $30< t_н <50°C$

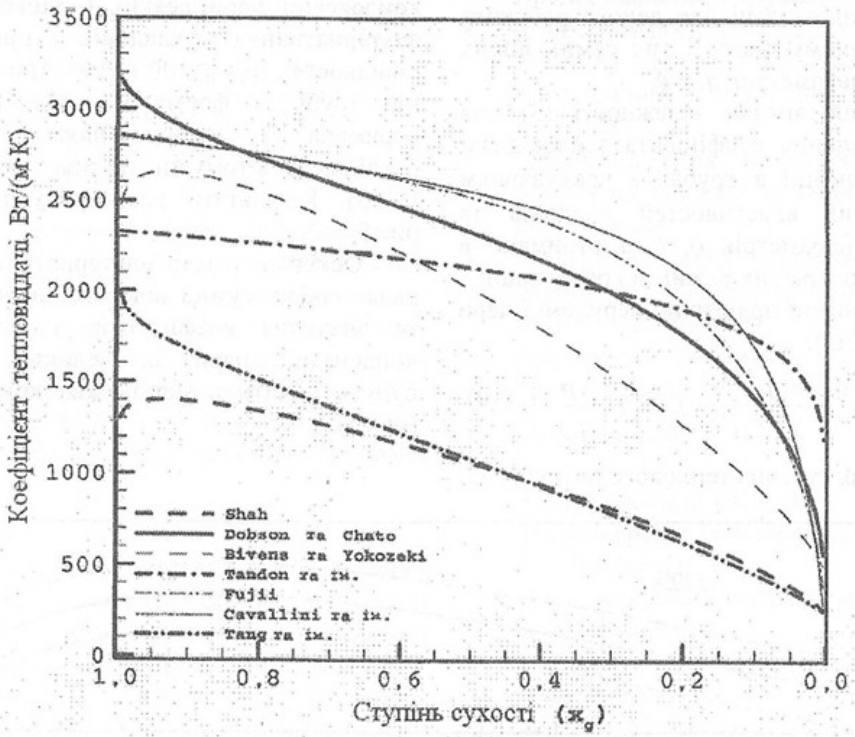

Рис. 3. Залежність середнього коефіцієнта тепловіддачі від ступеня сухості при хвильовому режимі за масового потоку 74,6 кг/(м²·с) для R-134a [8]

Для визначення характеру впливу тиску при узагальненні дослідних даних пропонується використовувати залежність:

$$\alpha_p / \alpha_{p^*} = F(p / p_{кр}) \qquad (9)$$

де α_p - коефіцієнт тепловіддачі при тиску p;
α_{p^*} - коефіцієнт тепловіддачі при реперному тиску p^*.

Аналітичний вигляд залежності (9) визначається на основі обробки дослідних даних для деяких із групи термодинамічно подібних теплоносіїв при конкретному значенні реперного тиску p^*.

В роботі [3] приведені результати обробки дослідних даних по конденсації в трубах ряду авторів у координатах α_p/α_{p^*}, $p/p_{кр}$ при значенні реперного тиску $p^*=0{,}12p_{кр}$. Відповідна залежність наведена на рис.4. Вона отримана на основі узагальнення дослідних даних для великої кількості речовин (R-12, R-22, R-142, N_2, Ar, O_2, NH_3, вода, бензол, толуол та ін.) і, як видно, для групи термодинамічно подібних речовин має досить фундаментальний характер.

Отримана таким шляхом залежність забезпечить розрахунок прогнозних значень коефіцієнта тепловіддачі при використанні теплоносіїв із тієї ж групи термодинамічно подібних, але досліди на яких не проводились.

Використання залежності (9) в практичних розрахунках передбачає наявність значення коефіцієнта тепловіддачі для даного робочого тіла при реперному тиску і тих самих інших визначальних параметрах q, l, d.

Розгорнутий вигляд залежності (8) для середнього значення коефіцієнта тепловіддачі $\overline{\alpha}$ при конденсації в трубах з урахуванням термодинамічних властивостей хладонів та визначальних параметрів q, l, d отримано в роботах [1, 3] для різних режимів конденсації:

1) для конденсації практично нерухомої пари ($\rho_п w_п \le 20$ кг/(м^2·с)):

$$\overline{\alpha} = 1{,}2\cdot 10^4 (\overline{q})^{-1/3} \frac{p_K^{4/3}}{T_K^{1/3}\mu^{2/3}} L^{-1/3} F\left(\frac{p}{p_{кр}}\right), \qquad (10)$$

де $\overline{q}$ - середня густина теплового потоку,

L - довжина труби.

2) для конденсації пари, що рухається з помірною швидкістю ($20 \le \rho_п w_п \le 100$ кг/(м^2·с)):

$$\overline{\alpha} = 1{,}3\cdot 10^2 (\overline{q})^{0,5} \frac{p_K^{0,5}}{T_K^{0,75}\mu^{0,25}} \times$$

$$\times (L/d)^{0,25} F\left(\frac{p}{p_{кр}}\right). \qquad (11)$$

3) для конденсації пари, що рухається з великою швидкістю ($\rho_п w_п \ge 100$ кг/(м^2·с)):

$$\overline{\alpha} = 0{,}8\cdot (\overline{q})^{0,8} \frac{p_K^{0,2}}{T_K^{0,9}\mu^{0,1}} \times$$

$$\times (L/d)^{0,8} F\left(\frac{p}{p_{кр}}\right) \qquad (12)$$

Залежності (10), (11), (12) узагальнюють результати експериментальних досліджень тепловіддачі широко використовуваних теплоносіїв при конденсації в трубах [1, 3] з похибкою, що не перевищує ±30%.

Порівнюючи значення приведених критичних коефіцієнтів традиційного хладону R-22 та альтернативних хладонів (таблиця 3) можна припустити, що наведені в таблиці 3 альтернативні хладони належать до групи термодинамічно подібних із хладоном R-22. На основі такого припущення були проведені розрахунки коефіцієнта тепловіддачі при конденсації пари деяких (однокомпонентних) альтернативних хладонів при великих швидкостях ($\rho_п w_п \ge 100$ кг/(м^2·с)) в горизонтальній трубі за формулою (12). Ця формула отримана з використанням результатів досліджень, в тому числі і при конденсації R-22 [1, 3]. Результати розрахунку приведені на рис.5.

Оскільки решта альтернативних хладонів являє собою суміш відомих хладонів (табл.3), то значення коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації пари за великих швидкостей будуть лежати в межах між кривими 1 та 5 (рис.5).

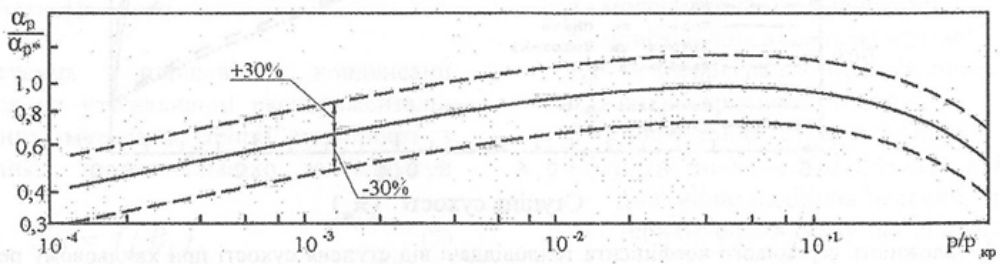

Рис.4. Функція $F(p/p_{кр})$

Таблиця 3

Склад та порівняльні значення приведених критичних коефіцієнтів традиційних та альтернативних хладонів* [9]

Речовина	Склад	$P_{кр}$, бар	$\upsilon_{кр}$, м³/кг	$T_{кр}$, К	$z_{кр}$
R-22	$CHClF_2$	49,90	0,0019091	369,3	0,274
R-134a	C_2HF_4	40,59	0,0019535	374,21	0,260
R-152a	$C_2H_4F_2$	45,17	0,0027174	386,41	0,252
R-114	$C_2Cl_2F_4$	32,57	0,0017241	418,83	0,276
R-123	$C_2HCl_2F_3$	36,32	0,0018182	456,83	0,267
R-401a	R-22/R-152a/R-124	-	-	-	-
R-402b	R-125/пропан/R-22	-	-	-	-
R-404a	R-125/R-143a/R-134a	-	-	-	-
R-405a	R-22/R-152a/R-142b/RC-318	-	-	-	-
R-407a	R-32/R-125/R-134a	-	-	-	-
R-407c	R-32/R-125/R-134a	-	-	-	-
R-507a	R-125/R-143a	-	-	-	-

* - хладони розташовані за зростанням температури кипіння.

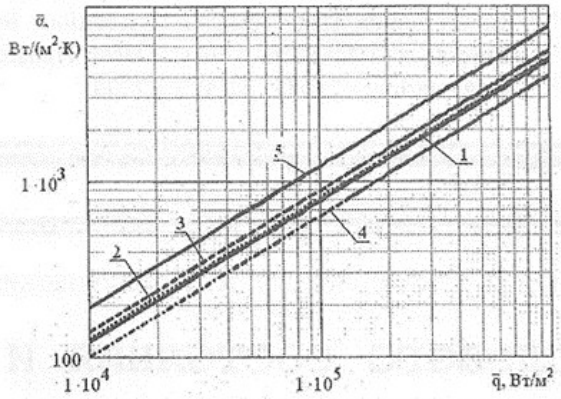

Рис.5. Залежність середнього коефіцієнта тепловіддачі від середнього питомого теплового потоку при конденсації швидкорухомої пари альтернативних хладонів за атмосферного тиску при L/d=100:

1 - R-14; 2 - R-116; 3 - R-152a;
4 - R-134a; 5 - R-114.

Таким чином, наявна інформація з досліджень теплообміну при конденсації хладонів в трубах (вертикальних та горизонтальних) дозволяє проводити прогнозні розрахунки середньої тепловіддачі при конденсації альтернативних хладонів за умови універсальності функції впливу тиску $F(p/p_{кр})$ та достовірності границь основних режимів конденсації.

Висновки

Традиційні та альтернативні хладони можна вважати термодинамічно подібними речовинами, що мають близькі за значенням критичні коефіцієнти та приведені параметри.

За допомогою відомих формул, знаючи термічні параметри в критичній точці, можна розраховувати значення коефіцієнтів тепловіддачі нових теплоносіїв в залежності від виду конденсації, при цьому можна очікувати, що похибка розрахунку не перевищуватиме 30%.

Для ефективного використання теорії термодинамічної подібності при конденсації альтернативних хладонів в горизонтальних трубах необхідно провести:

- обґрунтування віднесення конкретних альтернативних хладонів до певної групи термодинамічно подібних теплоносіїв;
- визначення меж характерних гідродинамічних режимів при конденсації альтернативних хладонів у трубах;
- отримання дослідних даних при реперному тиску та перевірка універсального характеру впливу тиску на альтернативних хладонах;
- розповсюдження узагальнюючих залежностей на випадок наявності транзитного потоку пари;
- експериментальну перевірку залежностей, отриманих на основі теорії термодинамічної подібності з використанням результатів досліджень для традиційних теплоносіїв на альтернативних хладонах.

Позначення

d - діаметр, м;
p - абсолютний тиск, Па;
R - універсальна газова постійна, Дж/(кг·К);
T - термодинамічна температура, К;
k - константа;
t - температура, °С;
x - паровміст;
w - швидкість, м/с;
Nu - число Нуссельта;
Pr - число Прандтля;

Re - число Рейнольдса;
Fr - число Фруда;
ρ - густина, кг/м^3;
υ - питомий об'єм, м^3/кг.

Індекси:

g - газ;
кр - критичний;
н - насичення;
п - пара;
рід - рідина.

Література

1. Новиков И.И., Боришанский В.М. Теория подобия в термодинамике и теплопередаче. - М.: Атомиздат, 1979. - 184с.
2. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассообмена. - М.: Высшая школа, 1974. - 328с.
3. Боришанский В.М., Волков Д.И., Кректунов О.П., Иващенко Н.И. Применение метода термодинамического подобия для обобщения опытных данных по пленочной конденсации // Труды ЦКТИ. - 1975. - № 131. - С.45 - 57.
4. Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. - М.: Машиностроение, 1972. - 672с.
5. Кирилин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. - М.: Энергия, 1974. - 448с.
6. Кректунов О.П., Савус А.С. Процессы конденсации и конденсаторы масложирового производства. - Санкт-Петербург: АООТ «НПО ЦКТИ», 1998. - 495с.
7. John R. Thome. On Recent Advances in Modeling of Two-Phase Flow and Heat Transfer // Heat Transfer Engineering. - 2003. - 24(6). - P. 46-59.
8. O.Garc´ia-Valladares. Review of In-Tube Condensation Heat Transfer Correlations for Smooth and Microfin Tubes // Heat Transfer Engineering. - 2003. - 24(4). - P.6-24.