



ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБНИХ ТА ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

УДК 532.529:536.633:544.431.12.012

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РЕЛАКСАЦІЙНОГО ПАРОУТВОРЕННЯ У
ПРЯМОСНИХ КАНАЛАХ*Арсеньєв Вячеслав Михайлович к.т.н., професор**Прокопов Максим Геннадійович к.т.н.**Чех Олег Юрійович аспірант**Сумський державний університет**Arseniev V.**Prokopov M.**Chekh O.**Sumy State University*

Анотація: наведено результати CFD моделювання, засновані на узагальнених даних експериментальних досліджень процесу пароутворення в адіабатному потоці скипаючої рідини яка прискорюється. Процес реалізується у каналі, що розширюється, активного сопла струменевого компресора. Математична модель течії враховує релаксаційний характер пароутворення у скипаючому потоці, що в свою чергу дає можливість знизити час і капітальні витрати на дослідження експериментального зразка.

Ключові слова: тепловий насос, струменевий термокомпресорний модуль, рідинно-паровий струменевий компресор, скипаючий потік, релаксаційне пароутворення, CFD моделювання, ефективність теплового насоса, режимні характеристики.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями

У наш час велика увага приділяється пошуку шляхів підвищення енергоефективності термотрансформаторів, які працюють на високотемпературних робочих речовинах. Одним з перспективних напрямів підвищення енергоефективності таких термотрансформаторів, які працюють на високотемпературних робочих речовинах і особливо на двоокисі вуглецю є використання кінетичної енергії двофазного потоку після дроселювання з достатньо високого рівня тиску, що має місце у вуглекислотних холодильних машинах і теплових насосах [1,2]. У подібних схемах термотрансформаторів ежектор виконує функцію попередньої ступені компресії з метою зниження навантаження на стиснення робочої речовини в основному компресорі (рис.1.1)

Розроблений на кафедрі технічної теплофізики СумДУ спосіб струменевої термокомпресії для термотрансформації тепла низькопотенційних джерел [3] у якості активного потоку передбачає використовувати скипаючу при течії у каналах що розширюються недогріту до насичення рідку фазу робочої речовини. У вихідному перерізі сопла формується надзвуковий робочий струмінь дрібнодисперсної парокрапельної структури. Стиснутий у струменевому компресорі (ежекторі) пар пасивного потоку з випарника після сепарації прямує в контур конденсатор-дросель-випарник, а насичена рідина відбирається насосом у циркуляційний контур і після підігріву у теплообміннику надходить в активне сопло ежектора (рис. 1).

Головні переваги термотрансформатора зі струменевим термокомпресорним модулем складаються з наступного:

- СТК-модуль виконує функції компресора (стиснення пари після випарника до p_K);
- підвищення тиску пасивного потоку (після випарника) від p_B до p_K забезпечується за рахунок роботи РПСК зі споживанням енергоресурсу у вигляді:
 - електричної потужності на привід насосу циркуляційного контуру;
 - потоку теплоносія від зовнішнього джерела;
 - відсутня необхідність змазування;
 - у якості активного середовища у РПСК використовується скипаюча недогріта до насичення рідка фаза робочої речовини;
 - дана схема дозволяє реалізувати теплонасосний режим на H_2O з підігрівом середовища у конденсаторі більш ніж $65^\circ C$.

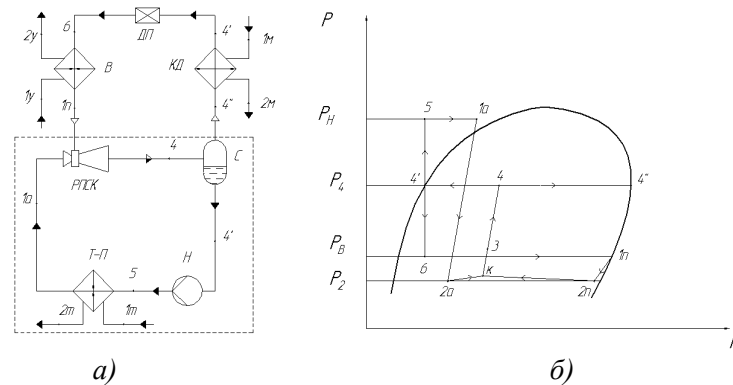


Рис. 1. Парова термотрансформаторна установка (UA 28398 10.12.2007). а – принципова схема; б – процеси у p, h – діаграмі. Н – циркуляційний насос, Т-П – технічний підігрівач, РПСК - рідинно-паровий струменевий компресор, С – сепаратор, КД – конденсатор, ДП – дросельний пристрій, В – випарник. На принциповій схемі пунктирною лінією позначений комплекс струменевого термокомпресорного модуля (СТК - модуль)

Задачі дослідження

На основі математичної та розрахункової моделі визначення режимних і геометричних параметрів СТК-модуля, для термотрансформатора у режимі теплового насосу [3], необхідно створити розрахункову модель теплових і енергетичних характеристик:

$$\dot{Q}_T = f(t_{1y}, t_{2m})$$

$$\dot{Q}_B = f(t_{1y}, t_{2m})$$

$$\dot{Q}_{ТП} = f(t_{1y}, t_{2m})$$

$$N_H = f(t_{1y}, t_{2m})$$

$$COP = f(t_{1y}, t_{2m})$$

Для струменевого термокомпресорного модуля перераховані залежності базуються на наступних параметрах СТК-модуля:

$$u = \frac{\dot{m}_n}{\dot{m}_a} - \text{коефіцієнт інжекції};$$

$$\psi_4 = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_n} - \text{коефіцієнт перевиробництва пари};$$

$$P_{II} = \frac{P_K}{P_B} - \text{підвищення тиску пасивного потоку}.$$

Для знаходження залежностей $u = f(t_{1y}, t_{2m})$, $\psi_4 = f(t_{1y}, t_{2m})$, $P_{II} = f(t_{1y}, t_{2m})$ при фіксованій геометрії РПСК застосовується моделювання з використанням CFD програмних комплексів.

Мета роботи

Розробити розрахункову модель зміни параметрів струменевого компресора при фіксованій геометрії апарату в залежності від варіативності навантажень на основні елементи термотрансформатора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [2] було розглянуто транскритичний вуглецевий цикл теплового насосу, та виконане моделювання у програмному продукті ANSYS Fluent двофазного ежектора який працює на двоокисі вуглецю. Порівнюючи між собою гомогенну та гетерогенну моделі руху рідини з експериментальними даними, були досліджені основні параметри потоку у ежекторі (тиск, масовий паровміст, швидкість).

Наразі ще не склалася загальноприйнята точка зору на механізм течії, що супроводжується формуванням критичних режимів і структурних переходів у двофазних потоках скипаючої рідини, що прискорюється. Відсутність достовірного кількісного опису цього процесу гальмує використання скипаючих потоків у якості енергоефективних робочих тіл, насамперед у струменевих нагнітачах різного призначення, включаючи струменеві термонасоси (пароводяні інжектори) [4] і термокомпресори [5].

У роботі [6] зроблена спроба уточнити опис течії рідини, яка самовипаровується у каналі сопла, що розширюється шляхом ділення його на окремі характерні зони. Аналіз матеріалів експериментальних



досліджень авторів [6] і дослідних даних, наведених у роботах [4, 7], свідчить про те, що одним з основних критеріїв, що визначають інтенсивність пароутворення у каналі є відносний початковий недогрів рідини до стану насичення: $(1 - \varepsilon_{s0}) = (p_0 - p_{s0})/p_0$. Вплив цього комплексу, пояснюється особливостями механізму скипання метастабільної перегрітої рідини в районі мінімального перетину сопла і переважно динамічним характером росту парових бульбашок в об'ємі потоку рідини [4, 5, 6].

Найбільша концентрація рідкої фази має місце у центральній області потоку, що обумовлено початковим зародженням парової фази у пристінній області потоку і дією інерційних сил. Визначальний вплив на умови зародження парової фази і структуру потоку справляє температура і початковий недогрів рідини, який характеризує віддаленість початкового стану рідини на вході у канал від стану насичення [8].

Результати математичного моделювання

При створенні твердотільної моделі були використані геометричні характеристики експериментального зразка РПСК [8]. Результати фізичного експерименту вказаного струменевого компресора з робочим середовищем – водою, були покладені у основу верифікації розрахунків за допомогою програмного комплексу Ansys CFX.

На (рис. 2) наведене порівняння експериментальних та розрахованих у програмному продукті даних з розподілу статичного тиску у частині сопла що розширюється. Задача вирішувалася у осесиметричній постановці, кавітаційна модель Релея – Плессета, k-ε модель турбулентності. Експериментальне сопло сформовано як сопло Лаваля з діаметром у горловині $d_f = 1,8$ мм, кут розкриття $\alpha_k = 16^\circ$, та відносна довжина $\bar{l} = 30,6$.

Виходячи з отриманих даних про розподіл статичного тиску та об'ємний паровміст у досліджуваному соплі, можна зробити висновок про задовільну збіжність експерименту та розрахунку.

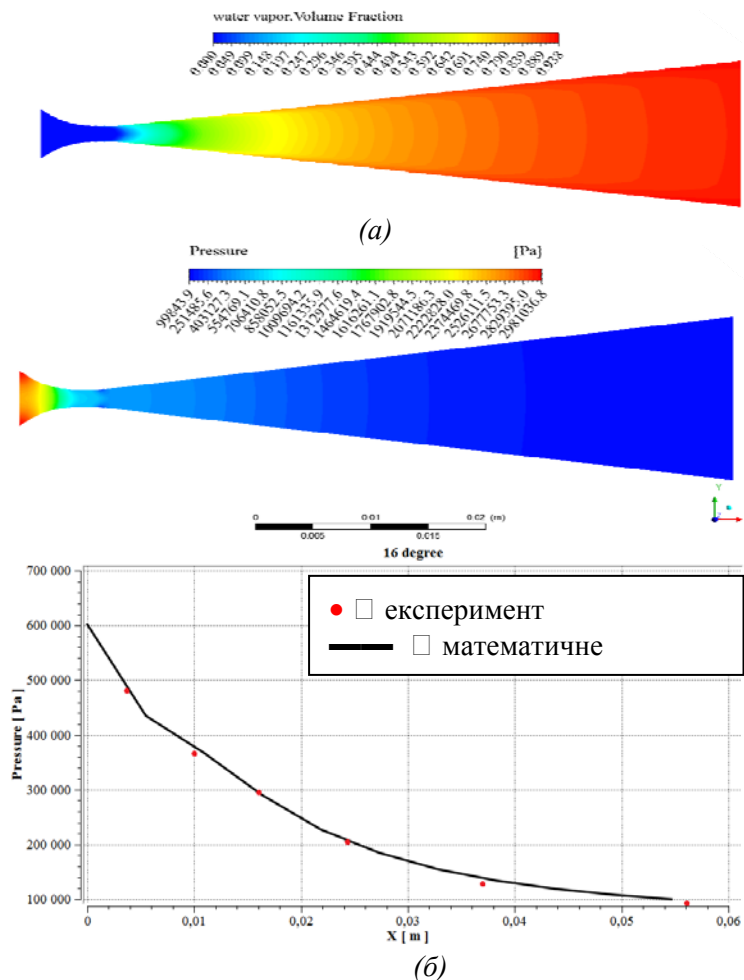


Рис. 2. Об'ємний паровміст (а), та розподіл статичного тиску (б) у потоці рідини, що закипає при $p_0=3\text{МПа}$; $p_n=0,1\text{МПа}$, $t_0=160^\circ\text{C}$, $\alpha_k=16^\circ$

Для визначення режиму роботи РПСК в залежності від величини підвищення тиску пасивного



потіку Π , необхідно знати, крім розподілу тиску, величину масової витрати пасивного потоку \dot{m}_m , та величину коефіцієнта інжекції u . У (табл. 1, рис. 3) представлені результати розрахунку коефіцієнта інжекції для різних режимів роботи струменевого компресора, в залежності від величини Π .

Сопло активного потоку сформовано як сопло Лавалю з кутом розкриття $\alpha_k = 8^\circ$. Пасивний потік підводиться до перерізу активного потоку через коаксіальний канал. Камера змішення виконана з конічної та циліндричної частини, дифузор прямоосний, з кутом розкриття 8° .

Таблиця 1

Залежність коефіцієнта інжекції РПСК від величини підвищення тиску пасивного потоку

P_c , МПа	P_m , МПа	Π	\dot{m}_c , кг/с	\dot{m}_a , кг/с	\dot{m}_m , кг/с	u
0,1	0,1	1	0,643	0,55	0,093	0,17
0,2	0,1	2	0,573	0,55	0,023	0,04
0,4	0,1	4	0,59	0,55	0,04	0,07
0,6	0,1	6	0,584	0,55	0,034	0,06
0,8	0,1	8	0,579	0,55	0,029	0,05
1	0,1	10	0,557	0,55	0,007	0,01
1,2	0,1	12	0,557	0,55	0,007	0,01

У результаті CFD моделювання були отримані дані про масову витрату через РПСК, що дозволило розрахувати величину коефіцієнта інжекції струменевого компресора у складі СТК-модуля теплового насоса (рис. 3).

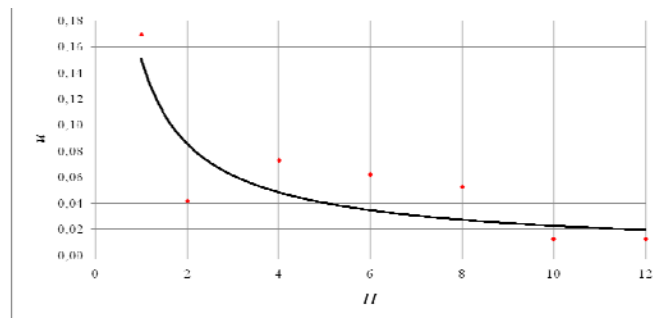


Рис. 3. Залежність коефіцієнта інжекції РПСК від величини підвищення тиску пасивного потоку

Виходячи з отриманих даних можна зробити висновок, що CFD моделювання дозволяє більш якісно підійти до дослідження роботи рідинно-парового струменевого компресора у складі теплового насоса, та отримати візуальні дані про процес пароутворення у ежекторі.

Така модель дозволяє знизити час і капітальні витрати на дослідження роботи апарату, що в свою чергу призводить до більш якісного підходу у дослідженні роботи експериментального зразка.

В подальшому передбачається удосконалення конструкції і режимних параметрів термотрансформатора для підвищення ККД всієї теплонасосної установки.

Висновки

1. Моделювання робочого процесу РПСК у програмному комплексі Ansys CFX підтверджує можливість та доцільність використання релаксаційного пароутворення у прямоструменевих каналах для підвищення термічних параметрів середовища, що інжектуються.

2. Отримана, при розглянутому моделюванні, структура потоку у каналах РПСК – ідентифікує процеси, які описують зміну параметрів робочого середовища по вузловим точкам циклу теплового насоса з СТК – модулем.

3. Математична модель рідинно-парового струменевого компресора дозволяє в подальшому прогнозувати характеристики теплового насоса на нерозрахункових режимах.

Список літератури

1. Zhang Z., Tian L. Effect of Suction Nozzle Pressure Drop on the Performance of an Ejector-Expansion Transcritical CO₂ Refrigeration Cycle // Entropy. – 2014. – Т. 16. – №. 8. – С. 4309-4321.

2. Bulinski Z. et al. A comparison of heterogenous and homogenous models of two-phase transonic compressible CO₂ flow through a heat pump ejector // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2010. – Т. 10. – №. 1. – С. 012019.

3. Патент України № 28398. Парова термотрансформаторна установка / В.М. Арсеньєв, К.О. Зубров,



В.М. Марченко (Україна). – Надрук. 10.12.2007.

4. Дейч М.Е. Газодинамика двухфазных сред / М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 472 с.

5. Марченко В.Н. Струйная термокомпрессорная установка: назначение, принцип

действия, термодинамическая модель и результаты расчетных исследований рабочего процесса / В.Н. Марченко, Н.А. Жиленко // Вісник Сумського державного університету. – 2004. – №13(72). – С. 50-60.

6. Марченко В.Н. Парообразование в адиабатных ускоряющихся потоках вскипающей жидкости / В.Н. Марченко, М.Г. Прокопов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2007. № 3 (9). С. 9499.

7. Зысин В.А. Вскипающие адиабатные потоки / В.А. Зысин, В.А. Барилович, Т.Н. Парфенова. – М. : Атомиздат, 1976. – 152 с.

8. Прокопов М.Г. Теплофізичне моделювання робочого процесу рідинно-парового струминного компресора: автореф.: 05.05.14 / М.Г. Прокопов. – Суми: СумДУ, 2011. – 20 с.

References

1. Zhang Z., Tian L. Effect of Suction Nozzle Pressure Drop on the Performance of an Ejector-Expansion Transcritical CO₂ Refrigeration Cycle // Entropy. – 2014. – Т. 16. – №. 8. – С. 4309-4321.

2. Bulinski Z. et al. A comparison of heterogenous and homogenous models of two-phase transonic compressible CO₂ flow through a heat pump ejector // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2010. – Т. 10. – №. 1. – С. 012019.

3. Patent Ukraine № 28398. Парова термотрансформаторна установка / В. М. Арсенієв, К. О. Зубров, В. М. Марченко (Україна). – Надрук. 10.12.2007.

4. Deych M.E. Gazodinamika dvuhfaznykh sred / M.E. Deych, G.A. Filippov. – M.: Energoizdat, 1981. – 472 p.

5. Marchenko V.M. Struynaya termokompressornaya ustanovka: naznachenie, printsip deystviya, termodinamicheskaya model i rezultaty raschetnykh issledovaniy rabocheho protsesssa / V.N. Marchenko, N.A. Zhilenko // Visnik Sumskogo derzhavnogo universitetu. – 2004. – Vol. 13(72). – pp. 50-60.

6. Marchenko V.M. Paroobrazovanie v adiabatnykh uskoryayuschihykh potokah vskipayuschey zhidkosti / V.N. Marchenko, M.H. Prokopov // Kompessornoe i energeticheskoe mashinostroenie. – 2007. – Vol. 3(9), pp. 94-99.

7. Zyisin V.A. Vskipayushchie adiabatyne potoki / V.A. Zyisin, V.A. Barilovich, T.N. Parfenova. – M. : Atomizdat, 1976. – 152 p.

8. Prokopov M.H. Teplofizychnye modeliuvannia robochoho protsesu ridynno-parovoho strumynnoho kompresora: avtoref.: 05.05.14 / M. H. Prokopov. – Sumy: SumDU, 2011. – 20 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЛАКСАЦИОННОГО ПАРООБРАЗОВАНИЯ В ПРЯМОСНЫХ КАНАЛАХ

Анотация: термотрансформаторы, работающие на высокотемпературных рабочих веществах, используют кинетическую энергию двухфазного потока после дросселирования с достаточно высокого уровня давления. Такая схема работы имеет место в углекислотных холодильных машинах и тепловых насосах. На кафедре технической теплофизики СумГУ разработан способ струйной термокомпрессии для термотрансформации тепла низкопотенциальных источников.

Приведены результаты CFD моделирования, основанные на обобщенных данных экспериментальных исследований процесса парообразования в ускоряющемся адиабатном потоке вскипающей жидкости. Процесс реализуется в расширяющейся части активного сопла струйного компрессора. В выходном сечении сопла формируется рабочая струя мелкодисперсной парокпельной структуры.

Проведена верификация экспериментальных данных и результатов математического моделирования сопла с углом раскрытия 16°. Математическая модель течения учитывает релаксационный характер парообразования вскипающего потока, что в свою очередь дает возможность снизить время и капитальные затраты на исследования экспериментального образца.

Проведен расчет с помощью CFD моделирования параметров струйного термокомпрессорного модуля, в зависимости от величины повышения давления пассивного потока.

Ключевые слова: тепловой насос, струйный термокомпрессорный модуль, жидкостно-паровой струйный компрессор, вскипающий поток, релаксационное парообразования, CFD моделирование, эффективность теплового насоса, режимные характеристики.

MODELING OF PROCESS OF RELAXATION VAPORIZATION IN A STRAIGHT AXIS CHANNELS

Summary: thermotransformers work at high working substances. They use the kinetic energy of the two phase flow after throttling from the high pressure level. This scheme takes place in a carbon dioxide refrigerations and heat pumps.

The inkjet thermocompression method for thermotransformation of low-potential heat source was developed at the Sumy State University at the Department of Technical Thermophysics.

Shown results of the CFD simulation, which based on summarized data of experimental research about the accelerating process of vaporization adiabatic boiling liquid flow. The process is realized in an expanding part of the nozzle of the jet compressor. Working finely dispersed stream of steam droplet structure is generated in the nozzle exit.

For the nozzle with an opening angle of 16 degrees performed verification of experimental data and



mathematical modeling. A mathematical model of the flow takes into account the nature of relaxation vaporization a boiling stream, which makes it possible to reduce the time and capital expenditures for research experimental sample.

Parameter of inkjet thermal compressor module, such as injection coefficient, passive mass flow, was calculated with CFD simulation.

Keywords: *heat pump, inkjet thermal compressor module, the liquid-vapor jet compressor, boiling stream, relaxation vaporization, CFD modeling, the efficiency of the heat pump, performance characteristics.*