

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ШВЕЦЬ МАРИНА ВІКТОРІВНА



УДК 685.34.017.84; 539.217

**ТЕПЛОФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТУ ВОЛОГОЇ ПАРИ В ТОНКИХ
ПОРИСТИХ СЕРЕДОВИЩАХ І НАПІВПРОНИКНИХ МЕМБРАНАХ**

Спеціальність 05. 14. 06 - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук.

Одеса 2019

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій (ОНАХТ)
Міністерства Освіти і науки України

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Роганков Віталій Борисович,
професор кафедри фізики та матеріалознавства ОНАХТ.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Недоступ Вадим Іоанович,
професор Фізико-хімічного інституту ім. О.В. Богатського НАН України.

доктор технічних наук, професор
Нікульшин Володимир Русланович,
завідувач кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
Одеського національного політехнічного університету.

Захист дисертації відбудеться «23» грудня 2019 р о 11.00. в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м.Одеса, 65082, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОНАХТ за адресою: вул.Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

Автореферат розісланий «20» листопада 2019 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор



В.І.Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження самих різних пористих середовищ(ПС), створення для них адекватних моделей, які враховують реальну структуру відповідних матриць, є однією з пріоритетних проблем сучасної технічної теплофізики і промислової теплоенергетики. Її рішення тісно переплітаються з перспективним розвитком таких екологічно-безпечних замкнутих схем одержання корисної роботи і каскадного перетворення теплової енергії будь-яких видів палива, до яких відносяться цикли Стірлінга і теплових труб. Їх важливими вузловими елементами є ПС, використовувані для внутрішньої регенерації, по-перше, і такі, що забезпечують перенос маси конденсованого робочого флюїду за рахунок капілярної структури т. зв. гноту, по-друге. Можна стверджувати, що створення нових і удосконалення існуючих методів аналізу, розрахунку і інтенсифікації процесів тепломасообміну в одно- і багатофазних середовищах сформульовані як п.1 в пріоритетних напрямках досліджень в Паспорті спеціальності 05.14.06, а також розгляд зв'язаних з ним п.п. 2,3,10,14 вимагають побудовання ясних моделюючих уявлень. Відповідні моделі повинні забезпечувати адекватну інформацію про фізичний механізм здійснення всього складного комплексу процесів, стосовно врахування ролі і впливу використовуваних ПС на проблеми енергетичної інтенсифікації. Про актуальність вибраної теми дослідження теплофізичних і теплоенергетичних властивостей ПС свідчить її недостатня освітленість в численних конкуруючих роботах, які проводяться по теплових замкнутих циклах провідними українськими і зарубіжними фірмами. Такий попередній висновок був зроблений на підставі відповідних публікацій, огляд яких наведений в дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі фізики та матеріалознавства Одеської Національної Академії Харчових Технологій в рамках кафедральної держбюджетної теми МК № 17/02 «Дослідження гетерогенної структури флуктуацій концентрації бінарних систем іонна рідина-вода в об'ємних фазах і пористих матрицях» № держреєстрації 0117U000364. Робота виконана відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки України – «3. Енергетика та енергоефективність. Технології використання нових видів палива, скидних енергоресурсів, відновлюваних та альтернативних джерел енергії. Теплонасосні технології» та «7. Науково-технічні проблеми технічної теплофізики та промислової теплоенергетики. 7.1. Створення нових, удосконалення наявних методів аналізу, розрахунку й інтенсифікації тепломасообміну в одно- та багатофазних середовищах, у теплових і гідродинамічних процесах в установках».

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка багатофункціональної термодинамічної моделі тепломасообмінних процесів, які протікають в пористих регенераторах стірлінгів з врахуванням реальних теплофізичних властивостей і структури теплоносіїв.

Основні задачі наукового дослідження:

- Аналіз застосовності і ступеня адекватності стандартної системи диференціальних рівнянь балансу маси, імпульсу, внутрішньої енергії в суцільних середовищах при описі процесів переносу в гетерогенних середовищах, утворених пористими структурами і, як правило, нестационарними пара-рідинними флюїдними фазами;
- Розробка базової моделі *тонких пористих середовищ* (ТПС) і системи мінімально необхідних для її визначення вимірюваних параметрів, які дозволяють не тільки відрізнити *гідрофільні* або *гідрофобні* властивості, але й враховувати їх прямий вплив на процеси переносу вологої пари в кожному з можливих типів ТПС;
- Дослідження динамічної взаємодії гетерогенних пара-рідинних елементів рухомого флюїду і нерухомої (гідрофільної або гідрофобної) матриці ТПС з метою побудування узагальненого *флуктуаційно-термодинамічного рівняння стану* (ФТ-РС) для даного композитного середовища.
- Розробка стратегії послідовної заміни в теплоенергетичному аналізі теплових замкнутих циклів найпростішої, але неадекватної ідеально-газової моделі робочих речовин на реалістичну модель ван-дер-Ваальсівського (вдВ) флюїду, яка суттєво уточнює теплофізичні характеристики складних нерівноважних процесів;
- Використання системи критеріїв Прандтля, Нуссельта і Стантона як необхідного і достатнього базису оптимізовуваних коефіцієнтів при рішенні сформульованого в роботі диференціального рівняння моделі нестационарного температурного поля в циклі Стірлінга;
- Побудування схеми рішення запропонованого рівняння для базових моделей ідеальної рідини і ідеальної (нев'язкої) рідини з теплопровідністю в рамках постульованої аналогії вузлів теплових циклів з етапами функціонування електромагнітних контурів.
- Дослідження потенціальної можливості створення нових ефективних схем оцінки *теплофізичної досконалості* теплових двигунів на підставі базового циклу Стірлінга, які передбачають в якості альтернативного водню робочого тіла надкритичного діоксиду вуглецю або водяної надкритичної пари;

Об'єктом дослідження є ТПС, один з розмірів якого (товщина, вибрана в напрямку потоку флюїду) суттєво менша двох інших (довжини і ширини), що

складає специфіку дизайну і використання великої кількості ТПС в регенераторах стірлінгів і гнотах теплових труб.

Предметом дослідження є теплообмінні процеси, які протікають в ПС (ТПС) і надають суттєвого впливу на етапи нестационарної (запуска теплового двигуна) і стаціонарної (його стійкого функціонування) роботи в замкнутих екологічно-безпечних схемах.

Методи дослідження. Розробка нового підходу до теплоенергетичного аналізу теплових циклів, включаючи їх елементи, що містять ПС/ТПС, який дозволяє вийти за рамки прийнятого використання найпростішої моделі ідеального газу і розповсюдженого надмірно-спрощеного аналізу роботи регенеративних вузлів.

Наукові результати, які автор захищає, та їх новизна.

Вперше запропоновані:

1. Модель кількісного прогнозу змін температурного поля з часом в окремих вузлах циклу Стірлінга, яка базується на постульованій аналогії теплових і електромагнітних процесів в стаціонарному і нестационарному режимах;
2. Розроблена методологія дослідження якісних структурних особливостей звичайних і тонких пористих середовищ, яка дозволяє відрізнити їх гідрофільність або гідрофобність відносно робочих флюїдних середовищ на підставі дуже обмеженого і досить простого експерименту по їх проникності;
3. Встановлені співвідношення для перехресних коефіцієнтів переносу флюїдного імпульсу, маси, заряду і теплоти через ТПС, що узагальнюють відомі закони для твердих структур та дозволяють зменшити на 5-7% невизначеність при їх описі.
4. Сформульовані і тестовані на реальних стірлінгах основні положення модифікованого теплоенергетичного аналізу циклів, які передбачають повну заміну ряду відомих мало виправданих наближень і допущень на більш реалістичні і термодинамічно узгоджені;
5. Запропонований новий критерій оцінки *теплофізичної* досконалості циклу, який доповнює стандартне поняття *термодинамічної* досконалості;

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується: 1) коректною постановкою задач досліджень на підставі всебічного аналізу сучасних теплоенергетичних методологій, використовуючих пористі середовища, їх обмежень і існуючих недоліків; 2) використання як аналітичних, так і таких, що базуються на відомому експериментальному і модельному матеріалі по пористих регенеративних пристроях, і підходів до рішення поставлених тепло-масо-обмінних задач; 3) апробація запропонованих ідей роботи шляхом зіставлення з

альтернативними методологіями дослідження замкнутих циклів, включаючи вузли регенерації теплоти.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Модельне рішення задач опису складних процесів тепло-масо-електрообміну, що реалізуються в пористих середовищах регенераторів теплоти в замкнутих циклах має широкий спектр потенційної застосовності, оскільки результати представлені в наведеній по тиску і температурі формах.
2. В роботі показано за допомогою таблиць і аналітичних розрахунків, що досить задати лише критичні параметри будь-якого проєктованого теплоносія, щоб з точністю менше 10% по тиску і менше 5% по температурі розрахувати основні вузлові точки однофазного надкритичного циклу.
3. Схема запропонованого в роботі, спряженого (такого, що складається з 2^x підциклів) циклу Стірлінга, який використовує діоксиду вуглецю в надкритичній області, містить числовий аналіз параметрів і властивостей всіх вузлових точок, що дозволяє провести безпосереднє натурне тестування;
4. Практичні рекомендації по розташуванню спряженого циклу на фазовій діаграмі CO_2 , який включає надкритичну область і введений в роботу новий критерій *теплофізичної досконалості*, доповнюючий прийняте поняття *термодинамічної досконалості*, прямо вказують на великі експлуатаційні переваги потенціально-можливої, таким чином, заміни стандартних робочих флюїдів (H_2 , He) на більш прийнятні CO_2 або H_2O .

Особистий внесок здобувача. Сформульована мета і задачі дослідження потребують поглибленого і спрямованого на формування специфічних регулярних ПС/ТПС структур аналізу. Внесок автора полягає в розвитку існуючих методик, а також розробці нових перспективних підходів до досліджень процесів переносу вологої пари в пористих середовищах і напівпроникних мембранах з допомогою теоретичних моделей, в плануванні і проведенні численних експериментів по функціонуванню, аналізі одержаних результатів. Пояснення і підсумок одержаних результатів, а також формулювання висновків і рекомендацій роботи проведені спільно з науковим керівником.

Апробація результатів. Результати роботи доповідались і обговорювались на:

- 1) 7th International Conference “Physics of liquid matter: modern problems”, 27-
- 2) 6th Rostocker International Conference on Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics–THERMAM 2017, 17–18 July 2017, Rostock,

3) 77 Наукова конференція науково-педагогічного складу ОНАХТ. Одеса, 18 – 21 квітня 2017р. «Модифікована модель потенціалу Юкави і її роль для опису конденсованої фази фулеренів».

4) 78 Конференція науково-педагогічного складу ОНАХТ 23 – 27 квітня 2018 р, Одеса. «Дослідження процесів переносу тепла і вологи в тонких пористих середовищах».

Публікації. Основний зміст дисертації представлено у 11 публікаціях (одна без співавторів) в наукових журналах (з яких 3 включено до міжнародної наукометричної бази Scopus), а також у тезах доповідей і збірниках праць міжнародних та регіональних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків, у яких наведені таблиці термодинамічних властивостей і результати розрахунків. Загальний обсяг роботи – 184 сторінок, включаючи 34 рисунків, 19 таблиць і 88 найменування джерел. Обсяг додатків – 23 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульована її основна мета і поставлені задачі дослідження із зазначенням їх наукової новизни і потенціальної практичної цінності отриманих результатів.

У **першому розділі** запропонована нестационарна взаємно-узгоджена модель переносу тепла і маси в пористих середовищах замкнених циклів. Розглянута роль пористих середовищ (ПС) в проблемах розробки, адекватного опису і удосконалення таких перспективних енергетичних циклів, яким є відомий цикл Стірлінга. В ньому, ПС призначені забезпечити максимально-ефективну регенерацію теплоти в двох різно-спрямованих процесах тепло-масообміну спочатку від такого, що розширюється, і нагрітого теплоносія до пористої насадки регенератора, а потім, в зворотній віддачі цієї насадкою запасу теплоти такому, що стискається, попередньо- охолоджену теплоносію.

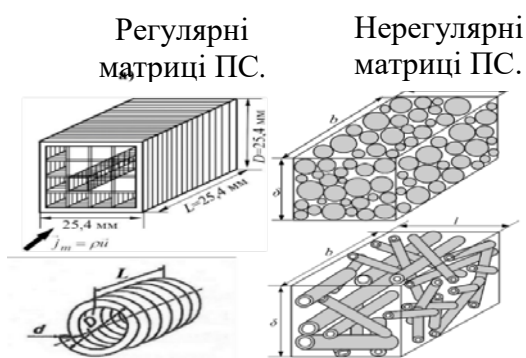


Рис. 1а – Види об'ємних регулярної (а) і стохастичної (випадкової) (б) структури пористих середовищ, використовуваних в насадках регенераторів стірлінгів.

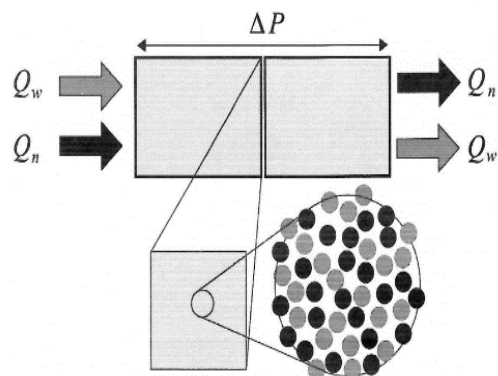


Рис. 1б. Нещодавно запропонована (D.Bedeaux et. al) ізотропна модель двофазного потоку крізь регулярну ПС.

Для порівняння зауважимо, що нещодавно запропонована, але ізотропна в повздовжньому напрямку модель потоку гетерогенної суміші зволоженої та незволоженої пари (див. Рис.1б) не забезпечує потрібного для ефективної регенерації теплоти її потоку в напрямку, який є перпендикулярним до потоку маси (відома задача Нуссельта для ПС). Представлене порівняння двох можливих підходів (див. Додаток А) до опису окремих стадій циклу Стірлінга, показано на Рис. 2а,б. Більш реалістичний пропонується в дисертації. Суттєвою його особливістю є послідовний перехід до врахування реальних теплофізичних параметрів процесів за допомогою запропонованої заміни рівняння стану ідеального газу рівнянням реальних флюїдів в простій формі, запропонований ван-дер-Ваальсом. Всі необхідні для обґрунтованого теплофізичного аналізу будь-якого реального циклу формули змінення з часом термічних і калоричних властивостей теплоносія представлені в тексті дисертації і в Додатку Б.

Запропонований в роботі підхід до проектування циклу Стірлінга, базується на основному рівнянні для зміни температури $T(t)$ з часом, яке

Ідеальні схеми циклів

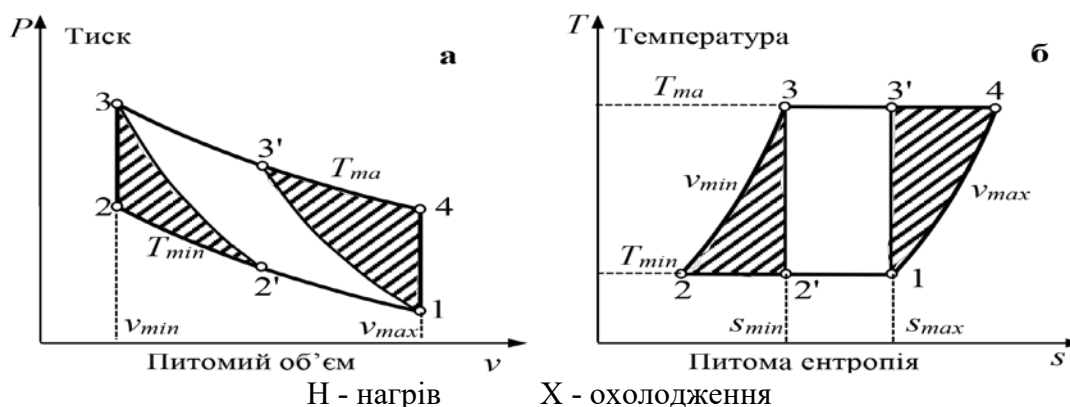


Рис. 2а. – Термічний ККД ідеального циклу Стірлінга і ідеального циклу Карно (незаштрихована частина) збігаються, але змінення ентропії є більш суттєвим у першому з циклів.

використовує відомі критерії тепломасообміну:

$$\tau_m^2 \frac{d^2 T}{dt^2} = -\frac{1}{Pr} \cdot T - \frac{\tau_m}{Nu} \cdot \frac{dT}{dt} + St(T_E - T_c) \cos(\omega_A t), \quad (1)$$

Параметр часу τ_m характеризує швидкість масопереносу в обраному флюїді є функціоналом температури. Якщо розглянути його додаток за участю теплофізичного критерія Прандтля $\tau_m^2 Pr^{-1}$ (див.Табл. 1), то цей параметр є зв'язаний з частотою коливань ω_0 , які відбуваються за відсутністю опіру.

Реальні схеми циклів

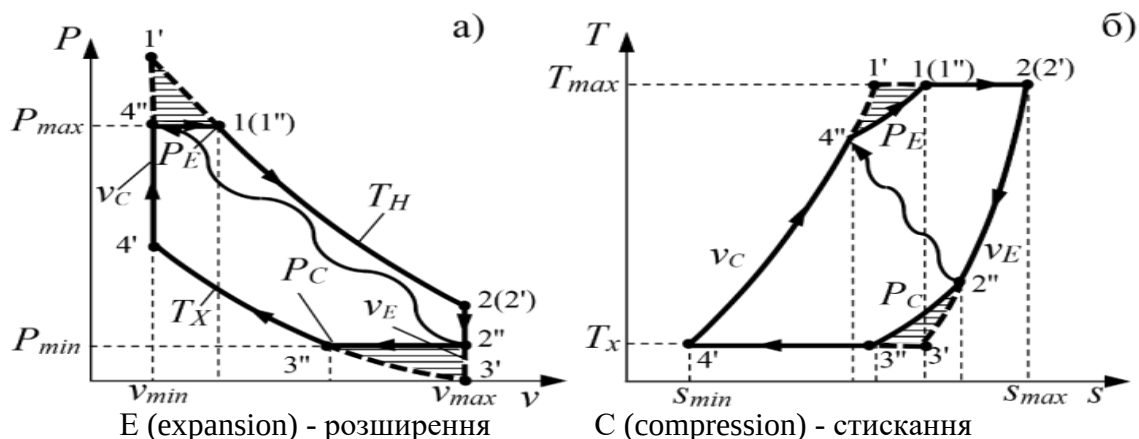


Рис. 26. – В результаті недосконалості ізохорної регенерації в циклі Стірлінга робочий флюїд охолоджується при розширенні тільки до $T_{2''} > T_X$, а нагрівається тільки до $T_{4''} < T_H$. Ізобарні ідеальні процеси 2''-3'' і 4''-1 в циклі Рейліса призначені в такій інтерпретації для виправлення необоротності регенерації.

Він може бути визначений експериментально як для потоку флюїду в циліндричному каналі з об'ємом: $V = \pi d^2 L / 4$, так і для циліндричної «пробки», утвореної матрицею ПС і флюїдом, який через неї протікає. Будемо припускати далі, що він відомий при проектуванні і дорівнює сталій циклу τ_m [с]. Підкреслимо, що усі застосовані в (1) і далі критерії подібності мають в дисертації стандартний сенс, але були поділені нами на дві групи:

$$Pr = \frac{\nu}{\chi} = \frac{\eta C_p}{\lambda} \quad St = \frac{\alpha}{\rho C_p u} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad Re = \frac{\rho u L}{\eta} \quad (3)$$

З яких тільки перші використовує ізобаричну теплоємність C_p залежну оборотно-пропорційно від пористості (див. Додаток Б). Ця властивість є загальною рисою також для ентальпії, але не для внутрішньої енергії, за допомогою якої формулюється Перший Закон. Прийнята в роботі Таблиця 1 відповідностей дозволяє застосувати відомі рішення з теорії механічних і електромагнітних вимушених коливань до розгляду імітаційної схеми теплового двигуна на Рис. 3а.

Таблиця А1. Відповідність характеристикних параметрів, яка допускає існування термо-електро-механічної аналогії узагальнених координат: $T(t) \leftrightarrow q(t) \leftrightarrow x(t)$ при коливаннях.

Механіка	Електромагнетизм	Термодинаміка
m [кг]	L [Гн]	τ_m^2 [с ²]
l [н·с/м]	R [Ом]	(τ_m / Nu) [с]
k [н/м]	$1/C$ [Ф ⁻¹]	$1/Pr$
f_0 [н]	ε_0 [В]	$St(T_E - T_C)$ [К]
$\omega_0^2 = k / m$ [с ⁻²]	$\omega_0^2 = 1 / (LC)$ [с ⁻²]	$\omega_0^2 = 1 / (\tau_m^2 Pr)$ [с ⁻²]
$\tau_k = l / k$ [с]	$\tau_c = RC$ [с]	$\tau_{Pr} = \tau_m Pr / Nu$ [с]
$\tau_l = m / l$ [с]	$\tau_R = L / R$ [с]	$\tau_{Nu} = \tau_m Nu$ [с]
$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - (2\tau_l)^{-2}}$ [с ⁻¹]	$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - (2\tau_R)^2}$ [с ⁻¹]	$\omega = \tau_m^{-1} \sqrt{Pr^{-1} - (2Nu)^{-2}}$ [с ⁻¹]

Для ілюстрації ми вибрали, тут, електромагнітний варіант замкнутого коливального контуру. Загальне рішення рівняння (1) утворюється сумою рішення *однорідного* рівняння $T_1(t)$, яке включає дві довільні сталі (T_0, φ_0) і *частинного* рішення цього *неоднорідного* рівняння $T_2(t)$:

$$T(t) = T_1(t) + T_2(t) = T_0 e^{-t/(2\tau_m Nu)} \cos(\omega t + \varphi_0) + T_A \cos(\omega_A t - \varphi_A), \quad (4)$$

в якому температурна амплітуда T_A і фаза запізнювання φ_A виражаються формулами, які залежать від ω_A (циклічної частоти вимушеної термодинамічної сили $\sim (T_E - T_C)$):

$$T_A = \frac{St(T_E - T_C)}{\tau_m^2 \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_m^2 Pr} - \omega_A^2\right)^2 + \frac{\omega_A^2}{\tau_m^2 Nu^2}}}, \quad (5)$$

Результуючий графік змін температури циклу з часом дано Рис. 3б де фізичний сенс T_A , φ_A стає зрозумілим. Рішення методом векторної діаграми з метою пошуку екстремальних значень ω_A приводить до висновків, дуже цікавих і важливих для теплоенергетики. Так, при значенні $\omega_1(t_1) = \omega_A = 0$ в початковий момент часу визначається т.зв. *амплітуда зміщення*, викликаного дією змушуючої «сили» $T_A(t)$, яка підтримує коливальний процес:

$$\varphi_A = \arctg \frac{\omega_A}{\tau_m Nu \left(\frac{1}{\tau_m^2 Pr} - \omega_A^2 \right)}, \quad (6)$$

$$T_A^0 = St(T_E - T_C) \cdot Pr = \frac{Nu}{Re}(T_E - T_C). \quad (7)$$

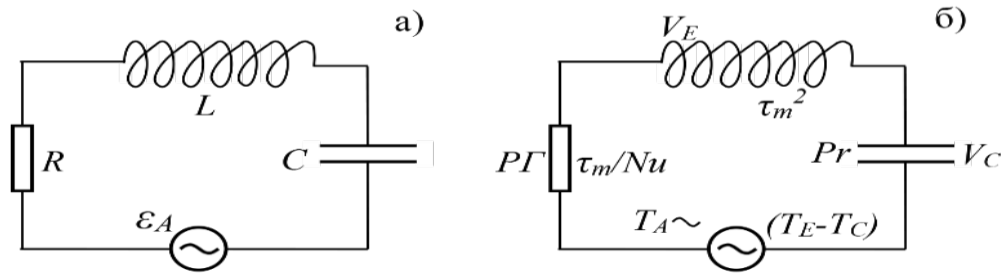


Рис. 3а. Імітаційна схема термоелектромагнітної аналогії $LCR\varepsilon_A$ -контуру (а) і $V_EV_CV_{Pr}T_A$ -контуру (див. Таблицю А1).

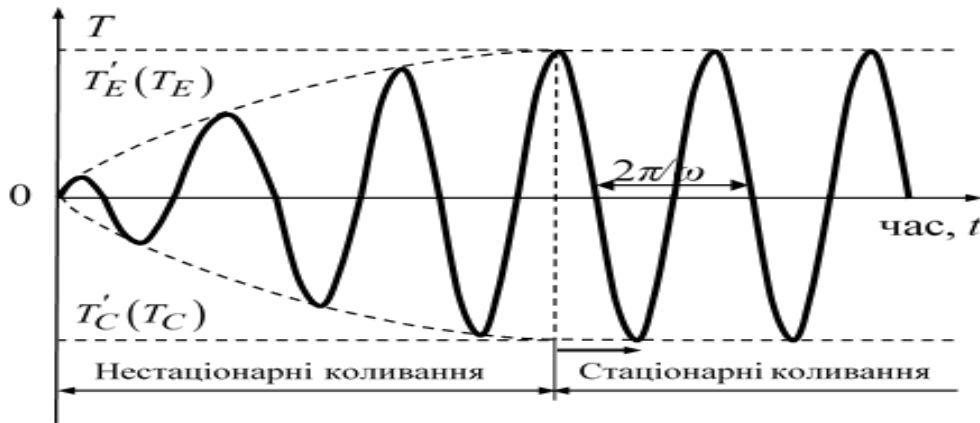


Рис. 3б. Стадії виходу на стаціонарний режим змінень температурного поля, згідно рішення рівняння (4).

Тут використане ключове співвідношення моделювання в циклі:

$$Nu = Pr St Re \quad (8)$$

Воно було знайдено в наближенні, яке дозволяє виключити характеристичний розмір L з системи рівнянь (2, 3).

Далі нами показано, по-перше, що для успішного *самозапуску роботи стірлінга* бажане виконання умови дуже слабого загасання коливань:

$$4Nu^2 \gg Pr \quad (9)$$

яке вже не містить характерного параметра часу τ_m .

При всій важливості обговорюваних результатів, найсуттєвішим з них представляється наступний. Визначивши резонансну частоту:

$$\omega_A^{max} = \omega_2 = \frac{1}{\tau_m} \sqrt{\frac{1}{Pr} - \frac{1}{2Nu^2}} \quad (10)$$

і підставляючи її у вираз (5), ми одержуємо амплітудне значення, яке *знов не залежить від параметра часу τ_m* :

$$T_A^{max} = \frac{St(T_E - T_C)Nu}{\sqrt{\frac{1}{Pr} - \frac{1}{(2Nu)^2}}}. \quad (11)$$

Цей результат, з врахуванням виконання необхідної на стаціонарному етапі умови для амплітуди температури $T_A^{max} = (T_E - T_C) / 2$, приводить до двох еквівалентних виразів:

$$St = \frac{1}{2Nu} \sqrt{\frac{1}{Pr} - \frac{1}{(2Nu)^2}} \quad (a) \quad Re = \frac{2Nu^2}{\sqrt{Pr - \left(\frac{Pr}{(2Nu)^2}\right)}} \quad (б). \quad (12)$$

Ці критеріальні співвідношення *прямо оптимізують функціонування будь-якого проектованого стірлінга, незалежно від вибраного рівня його інтервалу температур $(T_E - T_C)$* . Таким чином, підтверджується все сказане в цій роботі *про необхідність врахування реальних теплофізичних властивостей флюїдів в теплоенергетичному аналізі*.

Ще одне важливе для проектування стірлінгів співвідношення, яке називається *добротністю коливної системи*, можна одержати з (7) і (10):

$$\frac{T_A^{max}}{T_A^0} = \frac{Re}{2Nu} \approx \frac{Nu}{Pr^{1/2}} (a) \quad \left(\frac{Pr}{(2Nu)}\right)^2 \ll 1 (á). \quad (13)$$

Сильну нерівність (13б) корисно порівняти з іншою сильною нерівністю з (9). Цей результат наочно показує, що факторами, які «керують» коливаннями температури в замкнутому циклі, є саме критерії подібності.

У другому розділі розроблена базова модель тонких пористих матриць і методологія експериментальної оцінки їх гідрофільних і/або гідрофобних властивостей. На Рис. 4 представлені деталі використовуваного на цей час модельного опису регенерації теплоти. На рис 4а видно, що температурний гістерезис (відставання) приймається стаціонарним, тобто постійним в часі за кожен напівперіод роботи регенератора, що не відповідає реальності. На рис 4б схематично показана товщина δ [м] для розробленої нами моделі *неізотропного тонкого пористого середовища* рівнянь (1-3) і граничних динамічних умов в роботі, далі, врахована специфіка процесів, які протікають в ПС і ТПС. З цією метою нами запропонована нова *градієнтна модель* рухомого в ПС флюїду. Вона схематично зображена на Рис. 5 і дозволяє об'єднати стандартне поняття гетерогенної пористої матриці з її характерним об'ємом V_M [м³] і вільним об'ємом V_d [м³], які визначають звичайну пористість: $\varepsilon_d = V_d / V = 1 - V_M / V$ з новою концепцією маси флюїду

Схема роботи регенератора теплоти в циклі Стірлінга у варіанті протитечії

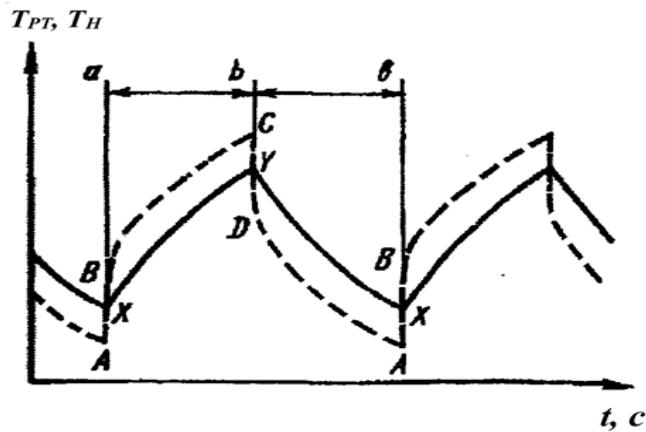
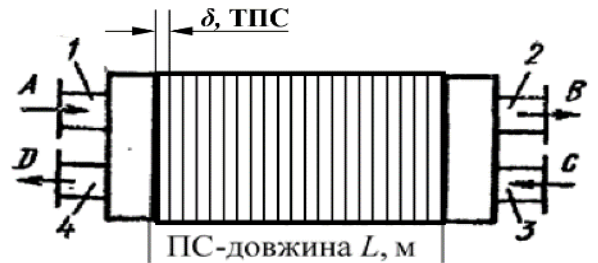


Рис. 4а. Залежність температур від часу t : ---- робочого тіла; — насадки [G.Walker]. Відставання цих температур періодично змінює свій знак: при гарячому дутті $T_{PT} > T_H$, а при холодному $T_H > T_{PT}$.



Тепловий генератор з протитечією як ізотропне пористе середовище

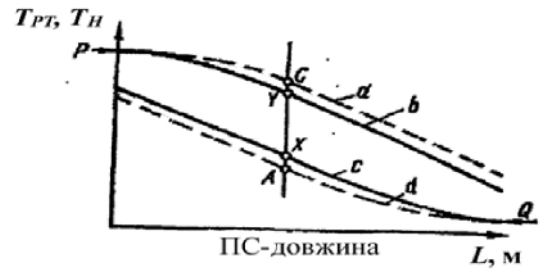


Рис. 4б. Залежність температури робочого тіла T_{PT} і температури насадки T_H по довжині регенератора при циклічному режимі роботи для моменту змінення напрямку гарячого потоку робочого тіла на холодний з відповідними температурами на вході в регенератор, які дорівнюють P і Q

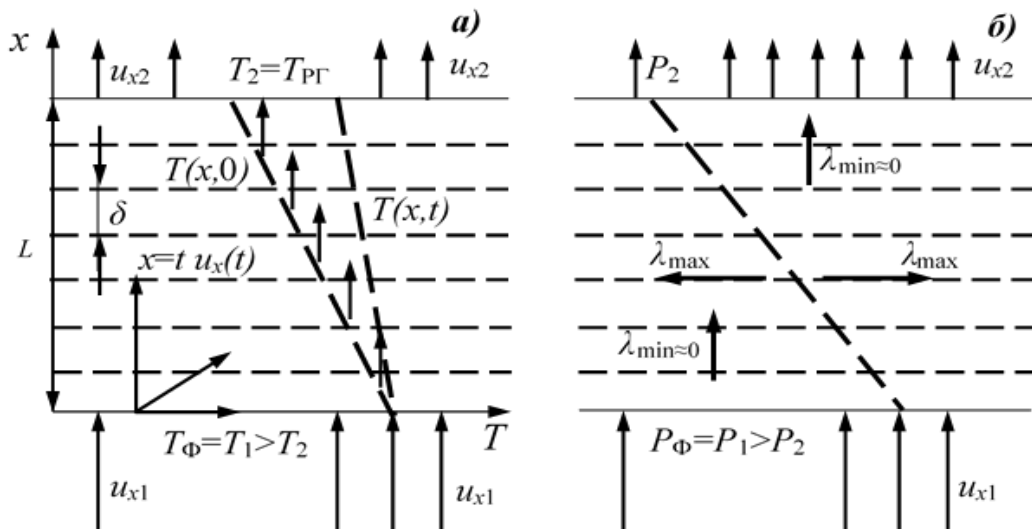


Рис. 5. Узгоджені для двох моментів часу (t_1, t_2) схеми стратифікації внутрішнього температурного поля і поля тиску, передбачені градієнтною моделлю на стадії розширення $4 \rightarrow 1$ і нагріву РГ-насадки в наближенні ізохорної течії зі зростаючою середньою швидкістю потоку.

m_ϕ , що займає весь об'єм V_d . Характерна довжина L [м] і лінійна швидкість потоку u [м/с] в окремих вузлах циклу підпорядковуються, як це доведено в роботі, узагальненому рівнянню Бернуллі з передбаченим при плануванні циклу параметром густини ентальпії гальмування:

$$\rho(t) \left\{ \frac{u^2(t)}{2} + h(P_{T,s}[\rho(t), T(t)]) \right\} = \rho_0 h_0 \text{ [Дж/м}^3\text{]}. \quad (14)$$

Як вже вказувалось, знання реальних змін ентальпії має важливе значення. Флюїд представляється наділеним дискретною структурою в масштабах об'ємів нанопор і характеризується не тільки середньою густиною: $\rho_\phi = m_\phi / V_d$, але й внутрішньою мікроскопічною пористістю: $\varepsilon_\phi = 1 - b \cdot \rho_\phi$. Таким чином, роль, схожа з об'ємом V_M , відведена нами т. зв. *виключеному питомому об'єму* з рівняння стану ван-дер-Ваальса ($\rho_B = 1/b$):

$$\rho_{ПС} = \rho_M (1 - \varepsilon_d) + \varepsilon_d \rho_B (1 - \varepsilon_\phi), \quad (15)$$

де введене гранично-допустиме для кожного флюїду поняття густини в точці Бойля ρ_B .

$$\rho_\phi = \rho_l (1 - \varepsilon_g) + \varepsilon_g \rho_g = \rho_B (1 - \varepsilon_\phi) \quad (a) \quad \varepsilon_{РГ} = \varepsilon_{ПС} \cdot \varepsilon_\phi \quad (б). \quad (16)$$

Друга з записаних рівностей (16) описує взаємовплив ПС-матриці регенера-тора (РГ) стірінга і флюїду-теплоносія, який знаходиться в її порах або наскрізних каналах. Введене в роботі поняття *реальної РГ-пористості* $\varepsilon_{РГ}$ (16) суттєво уточнює звичайне поняття «мертвого» об'єму, який відповідає в цьому випадку $\varepsilon_{ПС}$.

Представлені Рис. 6. на ньому експериментальні точки, зібрані і згруповані нами для великої кількості найрізноманітніших за текстурою тканин з натуральних та/або полімерних волокон, були апроксимовані лінійними залежностями двох типів (їх коефіцієнти та довірчі інтервали також наведені на Рис. 6):

для *гідрофільних* ТПС:

$$\gamma_{зфл}(\delta) = \rho^0 \cdot \delta - \gamma_{зфл}^0 \quad (a) \quad \rho_v(\delta) = -(\gamma_{зфл}^0 / \delta_0^2) \delta + \rho_v^0 \quad (б), \quad (17)$$

для *гідрофобних* ТПС:

$$\gamma_{зфб}(\delta) = \rho_v^0 \cdot \delta + \gamma_{зфб}^0 \quad (a) \quad \rho_v(\delta) = -(\gamma_{зфб}^0 / \delta_0^2) \delta + \rho_v^0 \quad (б). \quad (18)$$

Використані тут позначення підкреслюють взаємозв'язок вибраних параметрів і їх розмірностей: δ [мм] – товщина ТПС; $\gamma_{зфл/зфб}$ [г/м²] – вага зразка, віднесена до площі його поперечного (для потоку флюїду) перерізу $A_\perp$ ($V = \delta \cdot A_\perp$). Модельований параметр товщини рідкої плівки на умовній границі повітря і ТПС:

$$\delta_{жс}(\gamma_{зфл} \rightarrow 0) = \gamma_{зфл}^0 / \rho^0. \quad (19)$$

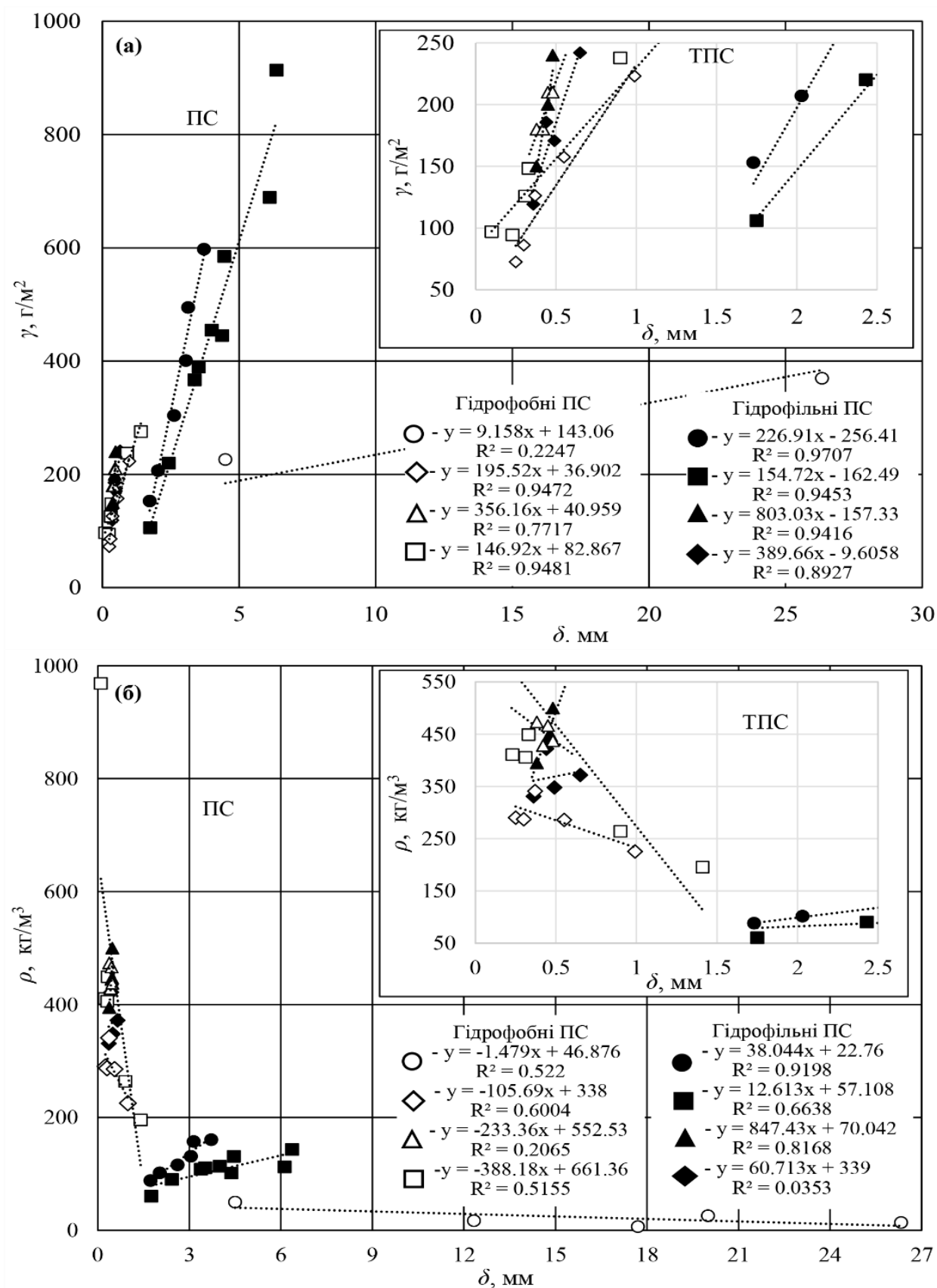


Рис. 6 – Лінійні тренди для груп гідрофільних (чорні символи – див. текст) і гідрофобних (білі символи – див. текст) ПС і ТПС, одержані з використанням експериментальних даних в координатах $\gamma(\delta)$ (а) і $\rho(\delta)$ (б).

є визначеним в роботі як мінімально-можлива товщина *рідкого неперервного* мезо- шару, який утворюється на поверхні гідрофільних (але не гідрофобних) ПС, що підтверджується дослідними даними. Відмінність введеної рівняннями базової моделі двох (гфл і гфб) типів пористості і, звичайно-використовуваного при вимірюваннях ПС, співвідношення: $\rho_v \left[\text{кг} / \text{м}^3 \right] = \gamma \left[\text{с} / \text{м}^2 \right] / \delta \left[\text{мм} \right]$ дуже значна.

Третій розділ присвячено дослідженню процесів регенерації теплоти, розглянутому як компроміс між ефективністю теплообміну і гідравлічними втратами в пористих насадках. Ця проблема важлива сама по собі і зв'язана з питанням вибору переважного для стірінгів робочого флюїду, яке обговорюється, окремо, в четвертому розділі.

Таблиця 2. Порівняння теплофізичних властивостей газоподібних робочих флюїдів для стірінгів при $P=0,1$ МПа і $T=500$ К.

Газ	M , г/моль	ρ , кг/м ³	C_p , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$MC_P^{3/2}$	$\lambda \cdot 10^3$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\eta \cdot 10^6$, $\text{Па} \cdot \text{с}$	Pr
H ₂	2	0,0491	14,51	110,5	271,8	12,64	0,675
He	4	0,0970	5,19	47,3	202,6	29,30	0,751
H ₂ O	18	0,2805	1,954	49,2	35,7	17,30	0,947
Повітря	29	0,7060	1,029	30,3	40,41	26,70	0,680
CO ₂	44	1,0730	1,014	44,9	32,74	23,67	0,733

В Таблиці 2 показано, що врахування динамічної в'язкості флюїду η і, таким чином, критерію Прандтля Pr (а не тільки його теплових властивостей – теплоємності C_p , теплопровідності λ що завжди пропонується), фактично приводить до змінення ключової парадигми вибору однофазного теплоносія. Відомо, з практики, що оптимальним прийнято вважати робоче тіло, чий теплофізичні рівноважні властивості забезпечують високий коефіцієнт тепловіддачі α (тобто функцію процесу) і малі гідравлічні втрати (також функцію процесу), пропорціональні потоку енергії $\rho u^2 / 2$. Нуссельт виходив в своїй відомій задачі для ПС/РГ з аналізу формули (20), в якій відсутня молекулярна маса M [г/моль] і теплоємність C_p . З іншого боку, врахування

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = B(Re)^b = B\left(\frac{\rho u L}{\eta}\right)^b \quad (20)$$

тільки (MC_P)-фактора при виборі флюїду, як свідчить Таблиця 2, приводить до багатьох недоліків експлуатації стірлінгів (величезних масогабаритів, перш за все), пов'язаних з використанням водню або гелію. Запропонована в роботі схема збільшення тиску P_{max} в порожнині стискання V_C (від'ємний нахил штрихування) з метою збільшення потужності циклу зображена на Рис. 7. З проведеного дослідження випливає, що менш відоме формулювання Другого Закону термодинаміки, запропоноване Хорстманном, є більш

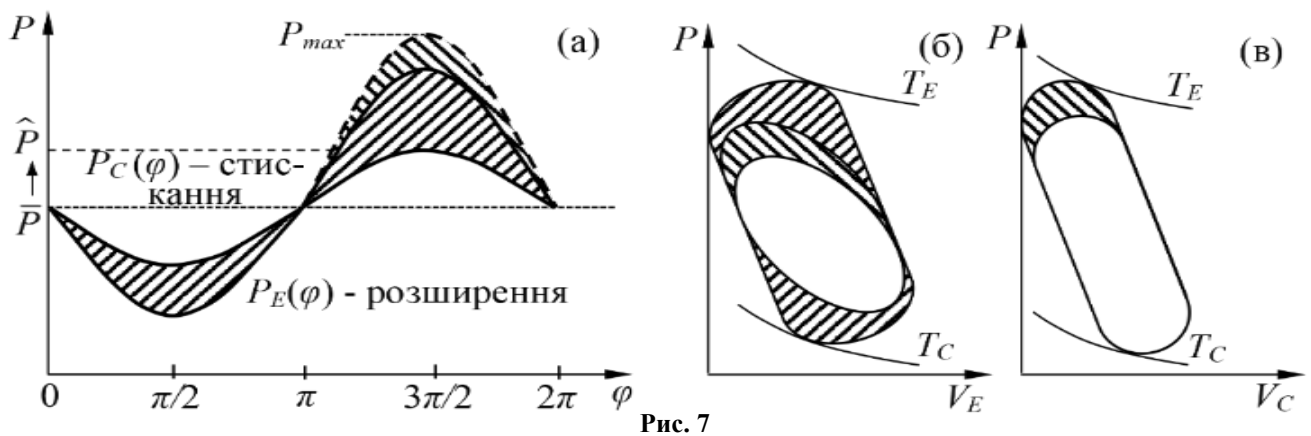


Рис. 7
Змінення тиску (а) в залежності від кута повороту валу двигуна φ [рад] в обох порожнинах V_E , V_C і збільшення тиску, яке пропонується, в V_C до P_{max} з метою збільшення потужності циклу, яка залежить від P -значення.

прийнятним для аналізу проблем вибору флюїду. Воно було використане нами щоб ввести поняття ступеня теплофізичної досконалості (СТФ) як відношення реального ККД η_{TD}^{ef} до ідеального термічного ККД в (24). Це дозволило одержати важливе обмеження (25) для середнього тиску реального циклу Стірлінга і, відтак, для його потужності.

Поняття ступеня теплофізичної (СТФ) досконалості циклів

Формулювання II Закону Хорстманна

Формулювання II Закону Клаузіуса

$$\delta q = T \frac{dP}{dT} \delta v \quad (a)$$

$$\Delta s = \int \frac{dq}{T} \quad (б) \quad (21)$$

$$\text{Диференційне рівняння станів } P = P_T + P_{in} = T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - \left(\frac{\partial e}{\partial v} \right)_T \quad (22)$$

однофазні ізохори	лінія насичення
$\gamma_\rho = \frac{T}{P} \left(\frac{\alpha_P}{\beta_T} \right) \approx \frac{T}{P} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta T} \right)_\rho \quad (a)$	$\gamma_v \approx \frac{T}{P_v} \left(\frac{\Delta h}{\Delta w} \right) \quad (б) \quad (23)$

СТФ теплового двигуна: $\gamma_{TD}^{ef} = CT\Phi_{TD}\eta_T = \frac{P_{max}}{\Delta P} \cdot \frac{\Delta T}{T_{max}} \quad (24)$

допущення: $\bar{P} = (P_{min} + P_{max}) / 2 \rightarrow \bar{P}_{TD}^{ef} \leq P_{max} (1 - \eta_T / 2) \quad (25)$

Звичайний ступінь термодинамічної (СТД) досконалості циклу

допущення: $P_{min} / P_{max} = (1 - \Delta) / (1 + \Delta)$ - метод Шмідта

$$\left(\eta^{ef} = CTД\eta_T \right) \quad (26)$$

$$\bar{P} = P_{max} \left(\frac{1 - \Delta}{1 + \Delta} \right)^{1/2} = \bar{P} \{ P_{max}; \Delta(V_C / V_E; V_D; \omega), (1 - \eta_T) \} \quad (27)$$

де Δ – складно-визначуваний підгінний параметр. Потужність циклу оцінюють як:

$$Nu \approx 0.15 \bar{P} \omega V_E, \text{ де } 0,15 - \text{число Біла} \quad (28)$$

$$N = \bar{P} \nu_0 V_0 / (2\pi) = \bar{P} \omega_0 d^2 L / (16\pi) \quad (29)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\tau_m (Pr)^{1/2}} = \frac{16\pi N}{\bar{P} (d^2 L)} \quad (30)$$

Порівняння між СТФ та СТД вказує на більш об'єктивне значення першого поняття СТФ, котре доповнює при аналізі циклів друге традиційне поняття СТД.

В четвертому розділі представлені результати розробки альтернативного спряженого надкритичного (СН) циклу, типу Стірлінга-Рейліса, працюючого на надкритичному діоксиді вуглецю. На Рис. 8 представлена пропонується в роботі схема суттєвої внутрішньої інтенсифікації тепломасообмінних процесів в ПС/РГ, яка базується на практичному і теоретичному використанні специфічних властивостей критичної ізохори ρ_k будь-якого НКФ. Ця особлива лінія характеризується значною зміною уздовж неї ізобарної $C_p(T)$ та ізохорної $C_v(T)$ теплоємностей, як ілюстровано на Рис.

9. Вибір CO_2 з його відомими помірними значеннями (T_K, P_K) стає, в цьому сенсі, цілком обґрунтованим для реалізації запропонованого *спряженого надкритичного стірлінга* (СН). Для його розташування на фазовій діаграмі CO_2 була застосована *діаграма вибору флюїду* (ДВФ), яка детально обговорюється в Додатку Д. Вона формується базовою вдВ-структурою специфічних ліній, що відокремлюють регіони суттєво *гетерогенної* поведінки НКФ від звичайних гіббсівських надкритичних фаз.

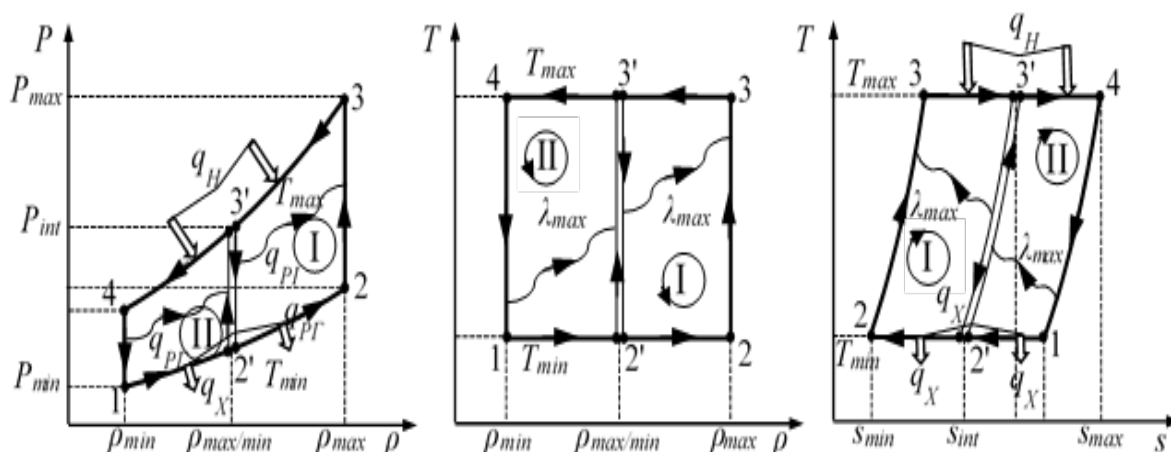


Рис. 8(а)-(в) – Пропонована в роботі схема двох спарених стірлінгів (I+II), яка передбачає *додаткову регенерацію теплоти* на проміжній ізохорі ρ_K для (1-2'-3'-4-1) і (2'-2-3-3'-2') социклів, відповідно. Звичайна регенерація теплоти в кожному з них показана хвилястою лінією.

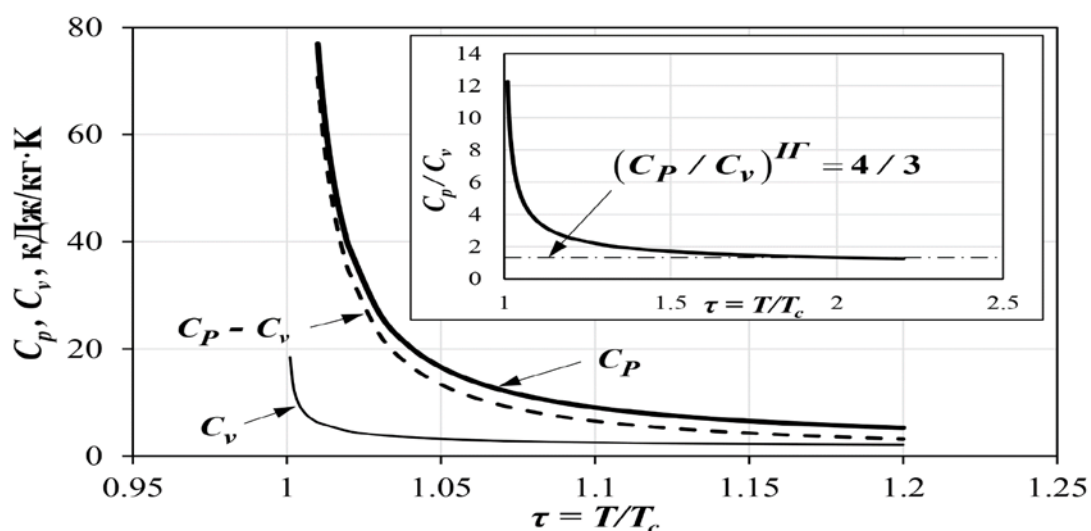


Рис. 9 Поведінка теплоємностей на критичній ізохорі $\rho_K = 468 \text{ кг/м}^3$ для CO_2 .

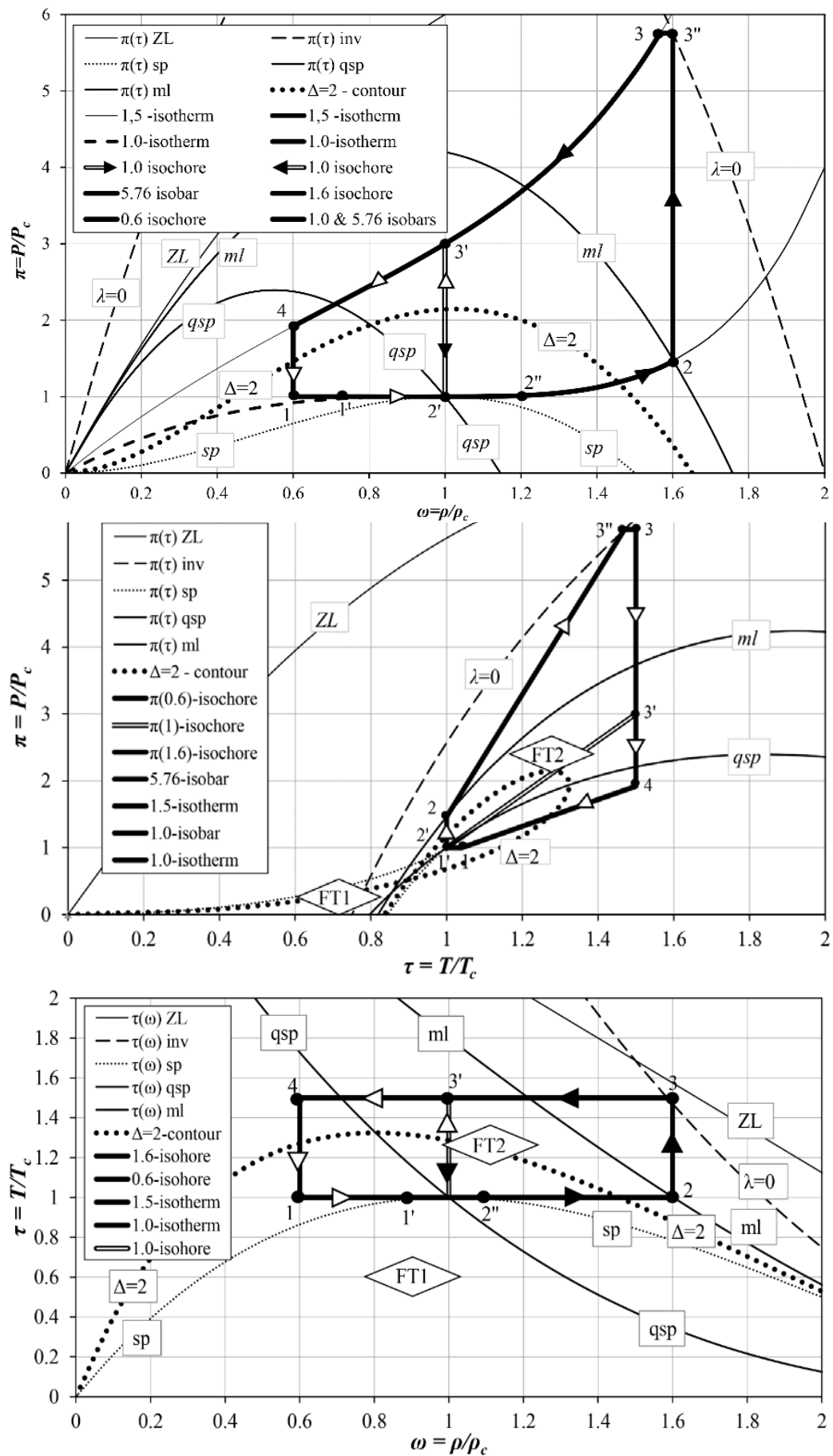


Рис. 10 – Основні проєкції запропонованого циклу Стірлінга-Рейліса, утвореного двома спряженими вздовж критичної ізохори ρ_k I і II-социклами.

В Таблиці 3 наведені розраховані у дисертації параметри СН-циклу, зображеного на Рис. 10а,б,в. Встановлено, що *принципово нові можливості оптимізації замкнутих теплоенергетичних циклів з ефективною регенерацією теплоти* відкриває застосування відношення:

$$\Delta_{T,P,\rho,s} = \left(\frac{\Delta q - \Delta w}{\Delta h} \right)_i = \left(\frac{\Delta e}{\Delta h} \right)_i. \quad (31)$$

Таблиця 3. Оцінки середніх СТФ-значень γ_T^{FT} питомої потужності ζ і ступеня ефективності регенератора ζ при заданому ККД $\eta_T = 1/3 (T_X / T_H = 2/3)$.

Тип циклу	$\gamma_T^{FT}(\rho^{max})$	$\gamma_T^{FT}(\rho_c)$	$\gamma_T^{FT}(\rho^{min})$	γ_T^{ef}	$\zeta \approx \gamma_T^{ef} / \eta_T$	$\bar{P} [МПа]$	$\xi \approx \bar{P} / P_c$
Повний СГН	0.109		0.5	0.30 45	0.91	3.38 P_c	3.38
Первинний	0.109	0.25		0.17 95	0.54	3.38 P_c	3.38
Вторинний		0.25	0.5	0.37 5	1.13	2 P_c	3.38

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

-Здійснено аналіз існуючих особливостей опису процесів тепло-, масо- і електро-переносу робочого флюїду в ПС і особливо в ТПС, які спираються, в основному, на статистичну оцінку розподілу густини твердої матриці в деякому фіксованому об'ємі. Зроблено висновок, що якісна і кількісна оцінки теплообміну у такому підході не можуть бути цілком адекватними.

-Вперше запропоновано об'єднуюче моделювання як стохастичного, так і регулярного типів пористих матриць, щоб розрізняти їх *гідрофільні* і *гідрофобні* властивості, а також враховувати *можливі змінення т.з. «мертвого» об'єму* порожнин стірлінгів, в залежності від періодів (реверсу) процесів розширення-стискання.

-Побудовано адекватний з фізичної точки зору опис змін температури з часом у будь-якому характеристичному вузлі замкнутого циклу з метою кількісного передбачення визначальних параметрів стірлінгів, там де експериментальні вимірювання практично не можливі.

-Запропонована розрахункова методологія оцінки ефективних коефіцієнтів переносу (дифузії, теплопровідності, електропровідності, в'язкості), які

залежать від комбінованих характеристик не тільки робочого флюїду, але й від перехресного взаємовпливу нерівноважних процесів.

-Продемонстровано, що послідовна заміна розповсюдженої моделі ідеального газу на більш реалістичну модель ван дер Ваальса флюїду дозволяє скорегувати в залежності від змін густини теплоносія потрібні ефективні значення реальних тисків і температур на 7-9 % та 3-4 % відповідно.

-Запропоновано працюючий на надкритичному діоксиді вуглецю спряжений узагальнений цикл типу Стірлінга-Рейліса, в якому питома потужність потенційно може бути збільшена на 25-28% без значного збільшення максимального тиску і застосування дуже великих зведених температур, що спостерігається в традиційних схемах стірлінга, працюючих на водні або гелії.

- Розроблена нова схема інтенсифікації регенерації теплоти в пропонованому спряженому (такому, що складається з двох підциклів) стірлінгу, працюючому на надкритичному діоксиді вуглецю, як альтернативі традиційному використанню водню і гелію.

- Врахування мезоскопічної гетерогенної структури будь-якого флюїду в широкому інтервалі параметрів його критичної області відкриває принципово нові можливості в теплоенергетичному проектуванні замкнутих, екологічно-безпечних циклів, за умови їх комбінованого і такого, що пропонується в роботі, використання з двома фіксованими термостатами (високотемпературним і низькотемпературним джерелами теплової енергії).

- Розроблена нова схема розрахунку калоричних діаграм в надкритичній області і запропонований корисний для проектування циклів метод експрес-оцінки ступеня використання наявного запасу теплової і внутрішньої енергії для оптимізації одержуваної корисної роботи. Передбачуваний економічний ефект може бути значним, але це потребує подальшого дослідження для отримання його кількісних оцінок.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1.Rogankov V.B. Suprun N.P., Shvets M.V., Shchutska A.V. About correlation between the percolation rate of moisture through the semi-permeable membranes and the standard measurements of their permeability or evaporative resistance. Refrigeration Engineering and Technology.- 2015.-№ 51 (1).- С. 47-54.
(Особистий внесок автора: аналіз літературних джерел, проведення розрахунків, підготовка статті до публікації)

- 2.Котюков. Ю.Д., Левченко В.И., Роганков О.В., Швець М.В., Роганков В.Б. Концепция и модель мезоскопической пористости тонких проницаемых сред. Холодильна техніка та технологія.- 2015.-№ 51 (5).- С. 67-79. *(Особистий внесок автора: аналіз літературних джерел, проведення розрахунків)*
- 3.Rogankov O.V., Shvets M.V., Kalinchak V.V., Rogankov V.B. Novel alternate model of effective porosity for hydrophilic and/or hydrophobic thin permeable media. Physics of Aerodisperse Systems.- 2015.-№ 52.- С.8-21. *(Особистий внесок автора: аналіз літературних джерел, проведення розрахунків)*
- 4.Rogankov O.V., Shvets M.V., Rogankov V.B. Alternate basic l/b-model of effective porosity created for hydrophilic (l) and/or hydrophobic (b) moist textile materials. Fibres & Textiles in Eastern Europe 2016; 24, 3(117): 51-57. *(Особистий внесок автора: аналіз літературних джерел за тематикою статті проведення розрахунків, обробка та аналіз результатів дослідження)*
- 5.Rogankov.V.B., Shvets M.V., Rogankov O.V. New non-stationary gradient model of heat-mass-electric charge transfer in thin porous media. Refrigeration Engineering and Technology.- 2017.-№ 53(5).- С. 33-46. *(Особистий внесок автора: аналіз літературних джерел за тематикою статті, проведення розрахунків)*
- 6.Rogankov O.V. Shvets M.V., Kalinchak V.V., Sergeeva A.E., Rogankov V.B. and Levchenko V.I. Elongate coexistence curve and its curvilinear diameter as factors of global fluid asymmetry. Physics of Aerodisperse Systems. – 2017. – № 54, С. 8-29. *(Особистий внесок автора: аналіз літературних джерел, проведення розрахунків, підготовка статті до публікації)*
- 7.Rogankov O.V., Mazur V.A., Shvets M.V., Rogankov V.B. Re-established congruent vapor-liquid diagram of alkali fluid metals as alternative to crossover VLE-interpretation. Fluid Phase Equilibria.-2018.- 466.-P.79-88. *(Особистий внесок автора: аналіз літературних джерел, проведення підготовка статті до публікації)*
- 8.Rogankov V.B., Shvets M.V., Rogankov O.V. Re-established congruent vapor-liquid diagram and fluctuation aspects of isotope theory-I (H₂O-D₂O-T₂O). Fluid Phase Equilibria.-2019.- 485-P.101 -110. *(Особистий внесок автора: аналіз літературних джерел за тематикою статті, підготовка статті до публікації)*
- 9.Rogankov V.B., Shvets M.V., Rogankov O.V., Chikunkova T.A. Supercritical heterogeneous nanostructure of fluids 1. Diagram of fluctuation transitions in non-gibbsian phases. Physics of Aerodisperse Systems.-2019.- №56. - С. 14-29. *(Особистий внесок автора: аналіз літературних джерел, підготовка статті до публікації)*

10. Rogankov V.B., Shvets M.V., Rogankov O.V., Chikunkova T.A. Supercritical heterogeneous nanostructure of fluids 2. Its potential impact on creation of coupled stirlings with intermediate regeneration of heat. Physics of Aerodisperse Systems. – 2019.- №56. - С. 30-48. *(Особистий внесок автора: аналіз літературних джерел, проведення розрахунків, підготовка статті до публікації)*

11. Швець М.В. «Концепція спряжених на критичній ізохорі циклів Стірлінга, працюючих на двоокису вуглецю. Холодильна техніка та технологія. - 2019. № 55(2). - С. 121-131.

АНОТАЦІЯ

Швець М. В. Теплофізичне моделювання транспорту вологої пари в тонких пористих середовищах і напівпроникних мембранах - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» (технічні науки). – ОНАХТ, Україна, Одеса, 2019.

Дисертація присвячена моделюванню та розрахунково-теоретичному розвитку перспективних екологічно-безпечних замкнутих теплових циклів, особливістю яких є зберігання маси робочого флюїду, не маючого безпосереднього контакту з навколишнім середовищем. Підвищення ефективності функціонування таких схем, до яких відносяться відомий цикл Стірлінга, працюючий між двома фіксованими термостатами може бути досягнуто в значній мірі шляхом покращення роботи пористих вузлів регенерації теплоти. Зміни, які запропоновані і детально досліджені в роботі з метою підвищення термодинамічного і нового теплофізичного ступенів досконалості можуть бути внесені до прийнятого на сьогоднішній день теплоенергетичного аналізу і мати значний практично-теоретичний ефект для подальших проектувань. Окремо, заміна рівняння стану для ідеального газу на ван дер Ваальсівське рівняння для реального флюїду безумовно буде оптимізувати опис будь-якого існуючого або проектованого циклу. В якості перспективної робочої речовини для надкритичного альтернативного циклу Стірлінга в дисертаційній роботі запропоновано надкритичний діоксид вуглецю, що обґрунтоване як з фазово-теоретичної, так і з практичної точок зору.

Важливими вузловими елементами замкнутих циклів є пористі середовища, які використовуються для внутрішньої регенерації теплоти. Особлива роль при дослідженні пористих середовищ була відведена розробці базової регулярної моделі тонкої пористої структури. Була запропонована послідовність обов'язково потрібної системи мінімально необхідних

вимірювань таких структур для визначення їх гідрофільних або гідрофобних властивостей і відмінностей, а також врахування їх прямого впливу на процеси переносу вологої пари. Розроблена аналогова фізико-математична модель передбачення змін температурного поля в замкнутих циклах теплових двигунів. Коефіцієнтами одержаного аналітичного рішення моделі реальних стірлінгів є відомі і взаємозалежні теплофізичні (Прандтля) та тепломасообмінні (Нуссельта, Рейнольдса, Стантона) критерії подібності. Ця особливість є важливою для інженерно-практичного використання результатів дисертації при проектуванні будь-яких циклів.

Ключові слова: однофазні теплові двигуни Стірлінга, тонкі пористі середовища, підкритична і надкритична області, гідрофільні і гідрофобні властивості.

ABSTRACT

Shvets M.V. Thermophysical modeling of the moist vapour transport through the thin porous structures and semi-permeable membranes - The manuscript.

The theses for Candidate of the technical science degree by speciality 05.14.06 - Technical Thermophysics and Industrial Thermoenergetics. - Odessa National Academy of Food technologies. MESYS of Ukraine, Odessa, 2019.

The work is devoted to the creation of adequate models and the methodology of advanced thermoenergetic calculations and estimates at the study of perspective, from both the ecologic and energetic viewpoints, closed cycles of thermal engines. On the base of the performed in Dissertation analysis it was concluded that the conventional thermoenergetic approach to the description of any regeneration stirling-type cycles should be essentially modified. It was recommended to take into account the real impact of density on the main caloric functions of a closed stirlings (working between two given thermostats) such as enthalpy, internal energy, entropy. The Horstmann's alternative formulation of Second Law has been used to argue the *combined necessity of the thermophysical (i.e. presumably equilibrium) and thermoenergetic (i.e. mainly, dynamical and irreversible) considerations* in any problem concerning the heat-mass-transfer through porous regenerator at the convective motion of a working fluid. The developed in Dissertation model is based on the electromagnetic-thermal analogy supposed between the respective closed contours. This approach looks promising since the further calculations of the velocity field (with its longitudinal and transversal components) can be occurred in the framework of the generalized Bernoulli equation. The new concept of the coupled Stirling-Rallis type of heat engine localized in the near-critical fluctuation range of carbon dioxide is proposed in Dissertation. Its specific feature is the presence of the *additional internal regeneration process* occurred alongside the critical isochore of CO₂. To support

the promising ability of such concept the new, additional to the standard estimate of thermodynamic efficiency, criterium of the *thermophysical efficiency* has been introduced. The basic theoretical model of the thin porous media including the solid and, even, fluid structures has been proposed in Dissertation to distinct the crucial factors of their hydrophobicity or hydrophilicity.

Key words: single-phase heat engines of Stirling, thin porous media, sub- and supercritical regions, hydrophilic and hydrophobic properties.