

В.А. Єрошенко, д-р техн. наук, професор, А.В. Тишковець, магістр, В.О. Бублей, магістр
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЦИКЛУ ЄРОШЕНКА ЯК АЛЬТЕРНАТИВИ ЦИКЛУ РЕНКІНА В ЕНЕРГЕТИЦІ

В статті представлений порівняльний аналіз циклу Ренкіна з циклом Єрошенка на основі конденсованих гетерогенних ліофобних систем.

Суттєвою перевагою циклу Єрошенка є компактні розміри теплосилової установки без фазового переходу «вода-пара», що дозволяє використовувати дані установки в місцях з обмеженим простором (транспортні засоби, космічні апарати, підводні човни тощо), а також як маневрені блоки різної потужності для покриття пікових навантажень. Крім того, привабливою є і екологічна складова, оскільки установки безшумні, зменшують теплове забруднення навколишнього середовища, а на своє виробництво потребують значно менших витрат конструкційних матеріалів.

Зважаючи на потенціал циклу Єрошенка та його технічні можливості, цикл можна вважати перспективним для вирішення енергетичних проблем, у тому числі – для виходу України з енергетичної кризи.

Ключові слова: термомолекулярна енергетика, гетерогенна ліофобна система, міжфазна поверхня, інтрузія, екструзія, термодинамічна компактність, рекуперация тепла, екологія.

Вступ

Розвиток енергетики в ХХ-ХХІ ст., без сумніву, пов'язаний з успіхом технічної термодинаміки, бо вона є основною ланкою для пошуку, відкриття та дослідження нових напрямків в енергетиці.

Незважаючи на різноманітність прямих термодинамічних циклів, фізико-енергетична сутність перетворення теплової енергії в механічну протягом останніх двох століть не змінювалась [1,2]: кінетичну енергію хаотичного теплового руху молекул газу чи пари перетворювали в організовану форму механічної енергії і далі, за потреби, перетворювали в електричну. При цьому потенційною енергією міжмолекулярної взаємодії нехтували в силу її малих значень для реальних газів.

У новому напрямі енергетики, який отримав назву «Термомолекулярна енергетика (ТМЕ)» [3-5], ставка робиться на потенційну енергію міжмолекулярної взаємодії в термомеханічних системах та особливість явищ утворення міжфазної поверхні «рідина-тверде тіло» як носія вільної поверхневої енергії, яка може виконувати механічну роботу.

Отже, базовим принципом в новому напрямку є використання потенційної енергії міжмолекулярної взаємодії в гетерогенних ліофобних системах (ГЛС) [6-8] «рідина – капілярно-пориста матриця, не змочена цією рідиною» не тільки для перетворення теплової енергії в механічну (і навпаки), а також для вирішення інших важливих інженерних задач технічної термодинаміки (акумуляція і дисипація енергії).

Постановка задачі

Принципово новий напрям в технічній термодинаміці – ТМЕ – вже набув визнання в наукових і промислових колах розвинених країнах світу (США, Японія, Франція, Росія, Китай, Південна Корея та інші). Детальний аналіз справ в термомолекулярній енергетиці можна знайти в [9,10]. Нове робоче тіло - гетерогенна ліофобна система - знайшло застосування в амортизаторах [11-17] та демпферуючих системах [18], акумуляторах [19-22] і в розробках нового класу теплових двигунів та термомеханічних пристроях [23-30]. Більше того, ГЛС завдяки швидкому розвитку науки і техніки все ширше проникає у нові галузі промисловості, а його нові компоненти «рідина плюс капілярно-пориста матриця», що з'являється з часом, дозволятимуть ще більш ефективно вирішувати багато важливих інженерно-технічних проблем. Проте, одне з ключових питань поки залишається без відповіді... Чи зможе гетерогенна ліофобна система замінити традиційне робоче тіло «пара-конденсат» в циклі Ренкіна, і якщо так, то які перспективи це відкриває перед інженерами-енергетиками? Звернення до циклу Ренкіна пов'язано з тим, що основою сучасної енергетики [31-32] є традиційні паросилові установки, які реалізують цикл Ренкіна (АЕС) або цикл Ренкіна – Хірна (з перегрівом пари на ТЕС). Беручи до уваги новий термодинамічний цикл Єрошенка [23-27] з використанням міжфазної поверхні Ω замість води/пари, спробуємо порівняти його з циклом Ренкіна.

Уявлення про ГЛС

Гетерогенна ліофобна система (ГЛС) – це конденсована, хімічно нейтральна система «рідина - капілярно-пориста матриця, що не змочується цією рідиною» з міжфазною поверхнею Ω , яка є

екстенсивним параметром системи. Інтенсивним параметром цієї системи виступає поверхневий натяг рідини σ на межі з твердим тілом. Унікальність і принципова новизна термомолекулярної енергетики (ТМЕ) [3-6] полягає в тому, що замість кінетичної енергії газу і пари (для яких екстенсивним параметром є об'єм V , а інтенсивним – тиск P) в ТМЕ вперше було запропоновано використовувати потенційну енергію міжмолекулярної взаємодії на міжфазних поверхнях Ω для акумулювання, дисипації і перетворення теплової та механічної енергій в реальних термомеханічних системах.

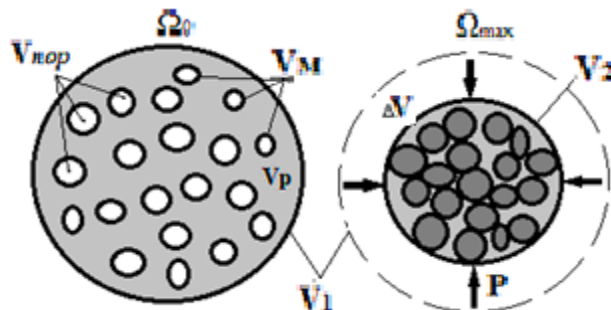


Рисунок 1 – Гетерогенна ліофобна система [6-8]

На рис.1 представлено фрагмент ГЛС: суспензія “рідина – дискретні пористі частинки”, де тиск P в будь-якій точці гетерогенної системи визначається капілярним тиском Лапласа P_L [3-4], який на декілька порядків вище можливого гідростатичного тиску в робочих камерах термомеханічних пристроїв:

$$P_L = \frac{\sigma \cdot \cos \theta}{kr}, \text{ бар} \quad (1)$$

де; σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини, н/м або Дж/м²; θ – контактний кут в системі “рідина (кластер) на твердій поверхні”, k – коефіцієнт форми пор капілярів з характерним радіусом r ($0,33 \leq k \leq 0,50$; $k=0,3$ – для сфер, $k=0,5$ – для каналів/капілярів). Тут і далі, для спрощення запису рівнянь, беремо до уваги модуль $\cos \theta$, бо тиск в системі завжди позитивний, а для кутів $\theta \gg 90^\circ$ (ліофобні системи) $\cos \theta$ є від’ємним.

При зовнішньому тиску $P \geq P_L$ відбувається *інтрузія* рідини в поровий простір матриці, при $P \leq P_L$ здійснюється самовільна *екструзія* кластерів рідини з пор (малюнки 1 і 2).

Робочий тиск в ГЛС вибирається із умови: $P_L > P_{\text{нас}}$ (тиск насиченого пару), щоб запобігти утворення парової фази в поровому просторі матриці (дивись далі).

На рис. 2 зображена фізична модель ГЛС, яка складається з капілярно-пористої матриці 1 (об’єм $V_M = \text{const}$ з об’ємом порового простору $V_{\text{пор}} = \text{const}$) і рідини 2 (об’єм $V_p = \text{const}$), що не змочує цю матрицю. Гіпотетичний поршень 3 здійснює переміщення в циліндрі 4.

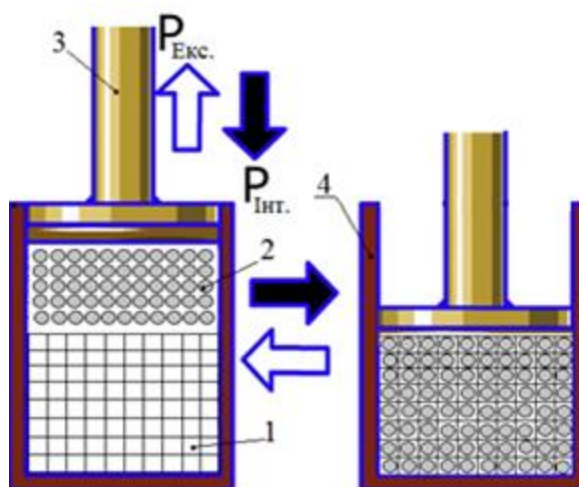


Рисунок 2 – Фізична модель гетерогенної ліофобної системи

Завдяки незмочуваності матриці 1 рідина 2 не може самовільно увійти в поровий простір матриці. Примусове стискання ГЛС ($dV < 0$, $d\Omega > 0$) та її самовільне розширення ($dV > 0$, $d\Omega < 0$) здійснюються завдяки інтрузії-екструзії рідини в поровий простір матриці з об'ємом пор $V_{\text{пор}} = kr\Omega$ (k – згаданий коефіцієнт форми пор/капілярів) і дії молекулярних сил відштовхування на міжфазній поверхні Ω . В процесах стискання-розширення ГЛС відбувається, відповідно, розвиток ($d\Omega > 0$) та зменшення ($d\Omega < 0$) міжфазної поверхні, що і визначає зміну об'єму всієї гетерогенної системи $V = V_m + V_p - kr\Omega$

$$dV = -kr d\Omega \cdot \text{м}^3, \quad (2)$$

Отож ми маємо певного роду парадокс: два конденсованих тіла, що не піддаються стисненню/деформації, зменшують загальний об'єм гетерогенної системи під дією зовнішніх сил і повертаються в початкове положення, коли дія зовнішніх сил зникає. Своєю поведінкою ГЛС частково нагадує відомі в хімії «сполучення включень» – клатрати АВ [33]: мала молекула А (у нашому випадку – рідина) входить у внутрішній простір великої молекули В (матриця), зменшуючи загальний об'єм клатрата АВ, і залишається там назавжди завдяки стерічному ефекту. На відміну від традиційних клатратів АВ, рідина А в ГЛС примусово входить в поровий простір матриці В (об'єм клатрата зменшується), але може самовільно покинути його під дією відштовхуючих (репульсивних) сил (об'єм клатрата збільшується). Ця особливість ГЛС дозволила класифікувати її як «*репульсивні клатрати*» (РК) – молекулярні пружини [34-36].

Як матриці для ГЛС застосовуються цеоліти, силікагелі, силохроми, Al_2O_3 , пористі стекла, тощо [7.8]. Як рідина: вода і водні розчини, розчини солей, евтекти та низькотемпературні сплави, тощо [7.8].

Уявлення про новий термодинамічний цикл

Цикл на основі ГЛС/РК є принципово новим: складається із двох ізобар-ізотерм і двох ізоп (ізоена від латинського *epi* – поверхня) [23-25]. Робочим тілом в термодинамічному сенсі виступає міжфазна поверхня Ω , а в технологічному – ансамбль «рідина і капілярно-пориста матриця», дві нестискувані речовини. Застосовуємо уніпористу матрицю ($r = \text{const}$).

В ізоперфневому процесі (процес «1-2» майже ізохорний, див. мал.3б) до гетерогенної системи підводять тепло q_{1-2} для нагріву її від температури T_2 до температури T_1 (при цьому площа Ω міжфазної поверхні «рідина – матриця» має мінімальне значення Ω_{min} , навіть може бути близькою до нуля).

$$\delta q_{1-2} = C_{\Sigma}(T_1 - T_2), \text{ Дж} \quad (3)$$

де $C_{\Sigma} = \sum_1 V_i \cdot c_i$ – сумарна теплоємність об'ємної фази системи (рідина і матриці), Дж/К, де V_i – об'єми компонентів системи, м^3 ; c_i – *питомі теплоємності компонентів системи*, Дж/ $\text{м}^3 \cdot \text{К}$; T_1 – температура джерела тепла, К; T_2 – температура холодильника, К. Тут і далі нехуємо температурною і механічною деформаціями δV_i кожної з компонент ГЛС ($\delta V_{\text{тем}} = 0, \delta V_{\text{мех}} = 0$).

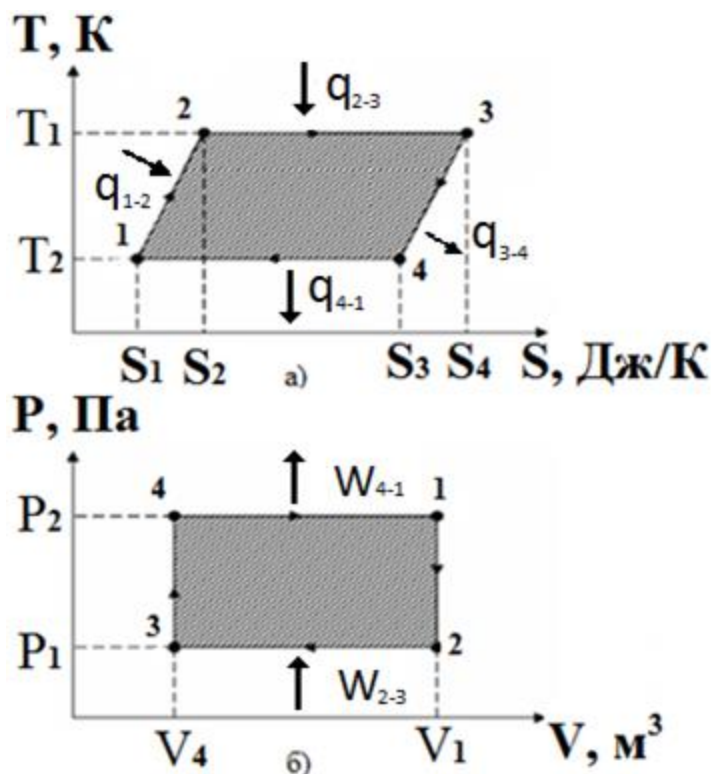


Рисунок 3 – Т-S та P-V-діаграми термодинамічного циклу Єрошенка [23-25]

Нагадаємо, що тиск в системі підкоряється гідравлічному закону Паскаля і в розглянутому випадку визначається капілярним тиском Лапласа P_L . [3-4]. В процесі нагрівання "1-2" (див. рис.3,б) тиск P в системі знижується від значення P_2 до значення P_1 , бо в замкнутому об'ємі $V_1 = const$ поверхневий натяг рідини σ (при її незмінному хімічному складі) знижується з ростом температури і разом з ним знижується тиск $P_1(1)$. [37]

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \left(1 - \frac{T}{T_{кр}}\right), \quad (4)$$

де σ_0 – гіпотетичне значення σ при $T = 0^\circ\text{C}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$, $T_{кр}$ – критична температура робочої рідини, К.

В ізобарно-ізотермічному процесі "2-3" утворення міжфазної поверхні Ω ($\Delta\Omega > 0$) до системи підводяться в великій кількості теплота δq_{2-3} і невелика робота δW_{2-3} , бо стиск гетерогенної системи від об'єму V_1 до об'єму V_4 відбувається при низькому тиску P_1 . При цьому маємо $\Delta V = V_1 - V_4 = V_{пор}$ та $\delta q_{2-3} > 0$ і $\delta W_{2-3} > 0$.

Теплота δq_{2-3} ізотермічного ($T_1=const$) утворення поверхні ($\Delta\Omega > 0$, $\Delta V < 0$) в процесі 2-3:

$$\delta q_{2-3} = T_1 \cdot \frac{d\sigma}{dT} \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega, \text{ Дж} \quad (5)$$

де $\frac{d\sigma}{dT}$ – температурний коефіцієнт поверхневого натягу рідини, $\frac{d\sigma}{dT} < 0$, $\frac{\text{Н}}{\text{м}\cdot\text{К}}$. Далі використовуємо модуль цього коефіцієнту.

Робота δW_{2-3} в тому ж ізобарно-ізотермічному процесі 2-3 ($T_1 = const, P_1 = const$):

$$\delta W_{2-3} = -P_1 \cdot \Delta V = P_1 \cdot k \cdot r \cdot \Delta\Omega = \sigma_1 \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega, \text{ Дж} \quad (6)$$

В ізоповірневному процесі "3-4" ($\Omega_{max} = const$, ізоепа) від гетерогенної системи відводиться тепло $\delta q_{3-4} = -\delta q_{1-2}$ зі зниженням температури від T_1 до T_2 (див. рис.3а). При цьому в замкнутому об'ємі ($V_4 = min = const$ при $\Omega = \Omega_{max}$) через зниження температури тиск в системі збільшується до величини P_2 . (мал. 3б).

В ізобарно-ізотермічному процесі "4-1" (робочий такт) самовільне зменшення міжфазної поверхні ($\Delta\Omega < 0$) від значення Ω_{max} до значення $\Omega_{min} \approx 0$) відбувається завдяки самовільному виштовхуванню кластерів рідини із пор капілярно-пористої матриці з об'ємом $\Delta V = V_{пор} > 0$ при максимальному тиску P_2 .

В процесі «4-1» ($P_2 = const, T_2 = const$) виділяється в зовнішнє середовище теплота δq_{4-1} , менша за δq_{2-3} , в результаті самовільного зменшення міжфазної поверхні ($\Delta\Omega < 0$):

$$\delta q_{4-1} = T_2 \cdot \frac{d\sigma}{dT} \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega, \text{ Дж} \quad (7)$$

При цьому система в ізобарно-ізотермічному процесі ($P_2 = const, T_2 = const$) здійснює велику роботу δW_{4-1} над зовнішнім середовищем (проти зовнішніх сил): $\delta W_{4-1} < 0$ через $\Delta\Omega < 0$ і $\Delta V > 0$.

$$\delta W_{4-1} = -P_2 \cdot \Delta V = \sigma_2 \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega, \quad \text{Дж} \quad (8)$$

Корисна робота в циклі з урахуванням (6) та (8) визначається за формулою:

$$W_\Omega = \delta W_{2-3} - \delta W_{4-1} = -(\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega < 0, \text{ Дж} \quad (9)$$

Одним з корисних критеріїв термодинамічної досконалості циклів і теплових машин являється їх термодинамічна компактність (ТК) [1,2].

Термодинамічна компактність l нового циклу дорівнює [9.10]:

$$l = \frac{\delta W_\Omega}{\Delta V \cdot \Delta T} = \frac{\cos\theta}{k \cdot r} \cdot \frac{d\sigma}{dT}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \quad (10)$$

Враховуючи розмірність $l = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}\right]$, можна стверджувати, що вона характеризує величину максимальної корисної роботи δW в термодинамічному циклі, яку можна отримати на одиницю об'єму V робочої камери (бо $\Delta V = V_1 - V_4 \approx V$ в традиційних теплових двигунах внутрішнього згорання) на один Кельвін всього діапазону зміни температур в циклі ($\Delta T = T_1 - T_2$). В новому циклі зміна об'єму дорівнює величині $\Delta V = V_{пор}$.

Нагадування про цикл Ренкіна

Лінія А-К-В в Т-S діаграмі вода-пара (рис. 4) є поділяючою, вище цієї лінії зліва існує тільки рідина, а справа - тільки пар, нижче - паро-водяна суміш. Тут і далі розглядається спрощений цикл Ренкіна.

Вологий пар в конденсаторі повністю перетворюється в рідину по ізобарі $P_2 = const$ (лінія 2 - 3, мал. 4 а). Потім вода стискається насосом від тиску P_2 до тиску P_1 ; цей адиабатний процес зображений в TS-діаграмі вертикальним відрізком 3-5 (рис. 4 б).

Довжина відрізка 3-5 в TS-діаграмі дуже мала, так як ізобари в точках 3 і 5 PV-діаграми для рідини в TS-діаграмі проходять дуже близько одна від одної. Завдяки цьому при ізоентропійному стисненні води її температура зростає менш, ніж на 2 - 3 °С, і можна з високим ступенем наближення вважати, що в цій області ізобари води P_1 і P_2 практично збігаються з лівою пограничною кривою АК. Тому часто при зображенні циклу Ренкіна в TS-діаграмі ізобари P_1 і P_2 зливаються в одну і, зазвичай, її позначають просто P_1 . Мала величина відрізка адиабати 3-5 на T-S діаграмі і відсутність нахилу вліво відрізка 3-5 на P-V діаграмі свідчить про малу роботу, затрачену насосом на стиск води. Мала величина роботи стиснення в порівнянні з великою роботою, виробленою водяною парою в процесі розширення 1-2, є суттєвою перевагою циклу Ренкіна.

З насоса вода під тиском P_1 надходить в котел, де до неї ізобарно (в процесі 5-4 тиск $P_1 = \text{const}$) підводиться тепло. Спочатку вода в котлі нагрівається до кипіння (ділянка 5-4 ізобари $P_1 = \text{const}$), а потім, після досягнення температури кипіння, відбувається процес пароутворення (ділянка 4-1 ізобари $P_1 = \text{const}$). Пароводяна суміш надходить в барабан-сепаратор, де відбувається поділ води і пари. Насичений пар з барабана-сепаратора надходить в турбіну, а якщо відбувається цикл з перегрівом пари, то між барабаном і турбіною водяна пара проходить ще й пароперегрівач. Процес розширення в турбіні зображується адиабатою 1-2. Цей процес відноситься до класичного циклу Ренкіна, в реальній установці процес розширення пари в турбіні дещо відрізняється від класичного, бо в більшості сучасних силових установок, що реалізують цикл Ренкіна, присутній проміжний перегрів. навіть на атомних станціях, що працюють на вологій парі. Майже всі станції працюють з відборами пари (тепловими чи регенеративними), які призначені для підвищення ефективності станції в цілому. Після турбіни відпрацьований вологий пар надходить в конденсатор, звідки конденсаційним насосом подається в живильний насос і цикл замикається (процес 2-3 на рис.4).

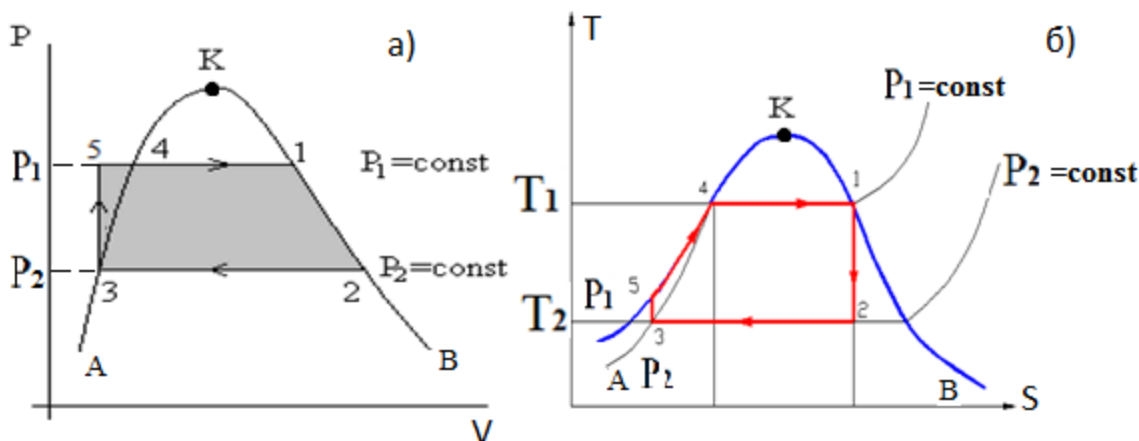


Рисунок 4 – Цикл Ренкіна в PV та TS – координатах [31,32]

Порівняння циклів

Цикл Ренкіна, перевірений часом і максимально допрацьований в сучасній енергетиці, давно вже став традиційним. Застосування циклу Єрошенка в енергетиці на даний час немає. Який же цикл може бути ефективнішим з точки зору термодинаміки?..

Для порівняння було вибрано цикл Ренкіна без перегріву пари, а за реальний прототип – енергоблок АЕС, що використовує реактор ВВЕР-1000. Цикл рахувався без відборів пари, а ентальпії в контрольних точках були взяті з довідника [38]. Як початкове робоче тіло буде використано воду. Діапазон тисків в циклі Ренкіна: $P_1=6,4\text{МПа}$, $P_2=0,0053\text{МПа}$, $\Delta P=6,39\text{МПа}$; діапазон температур: $T_1=553\text{К}$, $T_2=303\text{К}$, $\Delta T=305\text{К}$. Розрахунок показує, що корисна робота в циклі Ренкіна W_R для 1 кг води в цих умовах дорівнює величині $W_R=0,668\frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.

A priori можна стверджувати, що обґрунтованість порівняння ГЛС-циклу з циклом Ренкіна буде тим переконливіше, чим менший радіус пор буде застосовуватись у матрицях. Це пов'язано з припущенням, що процес випаровування рідини в циклі Ренкіна відбувається з появою в паровій фазі практично окремих молекул води, що відірвались від масивної фази.

Капілярно-пористі матриці в ГЛС грають роль «ножів-пристроїв», котрі механічним шляхом примусово розривають масивну фазу на окремі кластери (десятки чи сотні молекул в кожному) і в граничному випадку можуть розірвати її на окремі молекули (як в циклі Ренкіна для сухої пари), якщо використовувати матрицю з каналами (порами), діаметр яких співмірний з розміром молекули води

(~ 3 Ангстрема, Å). Уточнюємо, що розрив міжмолекулярних зв'язків в рідині за допомогою матриці не призводить до пароутворення: ГЛС залишається конденсованою системою.

Щоб довести апріорну доцільність використання матриць лише з малими порами, разом з матрицями з діаметром каналів, співмірним з розмірами молекул води ($r = 1.5 \div 12 \text{ Å}$), розглядаються матриці з розмірами пор-капілярів $12 \div 139 \text{ Å}$. Останні (з розміром 139 Å) розривають масивну фазу води на окремі кластери, а не молекули, що звідома зменшує міжфазну поверхню «рідина-матриця» і поверхневу енергію ГЛС. Це робить енергетичні показники (W_{Ω}) ГЛС – циклу (з радіусом пор матриці $r=139 \text{ Å}$) апріорно нижче, ніж енергоперетворюючі можливості циклу Ренкіна (W_R).

Для порівняння двох циклів розглянемо випадок, де розрахуємо їх питомі показники при рівних корисних роботах (використовуємо 1 кг води для цикла Ренкіна і знаходимо необхідну кількість води в ГЛС-циклі, яка забезпечить згадану роботу $W_{\Omega} = W_R = 0,668 \text{ МДж}$).

Із умови подавлення пароутворення в порах матриці (в робочій камері): " $P_L \geq P_{\text{нас.пара}}(T_1)$ " вибираємо радіус капіляра $r = 3\text{Å}$ (дивись формулу (1)), що гарантує конденсований стан води в поровому просторі матриці ГЛС.

Із умови виконання такої ж корисної роботи в новому циклі $W_{\Omega} = W_{Er}$, як в циклі Ренкіна W_R

$$W_{Er} = W_{\Omega} = (\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \cos \theta \cdot \Delta\Omega = W_R = 0,668 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

(σ_1 і σ_2 – коефіцієнти поверхневого натягу рідини при температурах T_1 і T_2 , Н/м), розрахуємо величину $\Delta\Omega$:

$$\Delta\Omega = \frac{W_R}{(\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \cos \theta} \quad (11)$$

$$\Delta\Omega = \frac{0,668 \cdot 10^6}{(0,0691 - 0,0189) \cdot 1} = 13,3 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \quad (11a)$$

Як було сказано вище, застосування на практиці матриць з великим радіусом пор (порядку 139 Å) є недоцільним. Більш привабливі результати дало застосування матриць з діаметром пор в діапазоні $1,5 \div 12 \text{ Å}$. Як видно з формули (2), чим менший радіус пор капілярів має матриця з фіксованою пористістю, тим більшу міжфазну поверхню можна створити в одиниці її об'єму.

Повний об'єм порового простору $V_{\text{пор}}$ і максимальний об'єм води $V_{H_2O} = V_p = V_{\text{пор}}$, який потрібен для отримання даної міжфазної поверхні, визначаємо із рівняння (2)

$$\Delta V = kr\Delta\Omega = V_{\text{пор}} = 0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-10} \cdot 13,3 \cdot 10^6 = 0,002 \text{ м}^3, \quad (2a)$$

Із умови пористості матриці $\varphi = \frac{V_{\text{пор}}}{V_m} = 0,7$ визначимо потрібний об'єм матриці:

$$V_m = \frac{V_{\text{пор}}}{\varphi} = \frac{0,002}{0,7} = 0,00285 \text{ м}^3 \quad (12)$$

Загальний початковий об'єм ГЛС «матриця+рідина» V_0 (поровий простір не заповнений рідиною, $\Omega = 0$)

$$V_0 \approx V_m + V_p, \quad (13)$$

де $V_p = V_{H_2O} = V_{\text{пор}}$,

$$\text{буде} \quad V_0 \approx 0,00285 + 0,002 = 0,00485, \text{ м}^3 \quad (13a)$$

Після цього визначаємо кількість теплоти, задіяної в циклі Єрошенка.

Тепло q_{1-2} , підведене в процесі 1-2 для нагріву гетерогенної термодинамічної системи від температури T_2 до температури T_1 , визначається за формулою (3).

Як пориста матриця був вибраний уніпористий силікагель (хімічна формула SiO_2). Питома теплоємність та густина кристалічної фази діоксиду кремнію дорівнює відповідно $c_{\text{SiO}_2} = 0,728 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг}\cdot\text{К})}$, $\rho_{\text{SiO}_2} = 2648 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ [39]. Ці ж показники для води: $c_{H_2O} = 4,183 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг}\cdot\text{К})}$, $\rho_{H_2O} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Структура формул (13 і 13a) показує, що об'ємна частка води в ГЛС рівна 0,41, а кристалічна маса пористої матриці займає об'єм 0,59. Тоді сумарна питома (об'ємна) теплоємність системи визначається:

$$c_{\Sigma} = 0,41 \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_v^{H_2O} + 0,59 \cdot (1 - \varphi) \cdot \rho^{SiO_2} \cdot c_v^{SiO_2} \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}, \quad (14)$$

$$c_{\Sigma} = 0,41 \cdot 1000 \cdot 4,183 + 0,59 \cdot (1 - 0,7) \cdot 2648 \cdot 0,728 = 2056 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \quad (14a)$$

Нагадаємо, що подальший розрахунок проводиться для порівняння ключових параметрів двох циклів за умови виконання рівних корисних робіт: $W_R = W_{Er}$.

З врахуванням (3) визначимо δq_{1-2} для ГЛС з об'ємом $V_0 = 0.00485, \text{ м}^3$, де C_{Σ} – теплоємність з вказаним вище об'ємом системи

$$C_{\Sigma} = c_{\Sigma} \cdot V_0 \quad (15)$$

$$C_{\Sigma} = 2056 \cdot 0.00485 = 9,972 \frac{\text{кДж}}{\text{К}} \quad (15 \text{ а})$$

$$\delta q_{1-2} = 9,972 \cdot (553 - 303) = 2,49 \text{ МДж} \quad (3\text{а})$$

Тепло, підведене в циклі 2-3, визначається за формулою (5), де модульну величину $\cos\theta$ для малих радіусів приймаємо близькою до 1 (через малу кількість молекул в кластері рідини), а температурний коефіцієнт поверхневого натягу $\frac{d\sigma}{dT} = 0,17 \cdot 10^{-3}, \frac{\text{Н}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ [39]

$$\delta q_{2-3} = T_1 \cdot \frac{d\sigma}{dT} \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega,$$

$$\delta q_{2-3} = 553 \cdot 0,17 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 13,3 \cdot 10^6 = 1,25 \text{ МДж}. \quad (4\text{а})$$

Тепло в процесі “3-4” $\delta q_{3-4} = -\delta q_{1-2}$ (див. мал.3а) відводиться від гетерогенної системи зі зниженням температури від T_1 до T_2 .

$$\delta q_{3-4} = -C_{\Sigma}(T_1 - T_2) = -2,49 \text{ МДж}. \quad (3 \text{ б})$$

Кількість теплоти, відведеної від системи в процесі “4-1” (робочому такті), визначається за формулою (7)

$$\delta q_{4-1} = T_2 \cdot \frac{d\sigma}{dT} \cdot \cos\theta \cdot \Delta\Omega,$$

$$\delta q_{4-1} = 303 \cdot 0,17 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 13,3 \cdot 10^6 = 0,685 \text{ МДж}. \quad (7\text{а})$$

Термічний ККД циклу Єрошенка для вибраної ГЛС буде рівним (без рекуперації тепла):

$$\eta_{Er} = \frac{\delta W_{4-1} - \delta W_{2-3}}{\delta q_{1-2} + \delta q_{2-3}} \cdot 100\% = \frac{0,668}{2,49 + 1,25} \cdot 100 = 17,9\%. \quad (16)$$

Величина термодинамічної компактності, розрахована для нового циклу за формулою (10), буде рівна:

$$l = \frac{1}{0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-10}} \cdot 0,17 \cdot 10^{-3} = 1,133 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}. \quad (10)$$

Так як величина η_{Er} циклу (формула (16)) є невисокою (18%) з причини великих затрат саме на нагрів масивної фази ГЛС, то застосуємо рекуперацію тепла в циклі. Сучасні рекуператори тепла та теплообмінники досягли високих ступенів рекуперації. Це і пластинчасті теплообмінники з ефективністю до 95% [40], і роторні рекуператори тепла з ефективністю рекуперації до 80%. [41]

При ступені рекуперації $R=0,8$ маємо

$$\eta_{R=0,8} = \frac{\delta W_{4-1} - \delta W_{2-3}}{\delta q_{1-2} \cdot (1 - R) + \delta q_{2-3}} \cdot 100\%, \quad (17)$$

$$\eta_{R=0,8} = \frac{0,668}{2,49 \cdot (1 - 0,8) + 1,25} \cdot 100 = 38,2\%. \quad (17 \text{ а})$$

ККД для циклу Єрошенка з рекуперацією тепла до 100% визначається за формулою Карно:

$$\eta_{Car} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (18)$$

$$\eta_{Er} = \eta_{Car} = 1 - \frac{303}{553} = 0,452. \quad (18\text{а})$$

Порівняємо ступені картотизації:

$$\frac{\eta_{Er}}{\eta_{Car}} = \frac{17,9}{45,2} = 0,39, \quad (19)$$

$$\frac{\eta_{R=0,8}}{\eta_{car}} = \frac{40,7}{50,2} = 0,81. \quad (19a)$$

Тепло, що викидається в атмосферу в ГЛС-циклі при рівних корисних роботах порівнювальних двох циклів, враховуючи рекуперацію, дорівнює:

$$Q_{eko} = \delta q_{3-4} \cdot (1 - R) + \delta q_{4-1}, \text{МДж}, \quad (20)$$

$$Q_{eko} = 2,49 \cdot (1 - 0,8) + 0,83 = 1,183, \text{МДж}. \quad (20 a)$$

Зведена таблиця основних характеристик двох циклів приведена нижче. В таблицю також було внесено результати розрахунків циклу Єрошенка при перепадах температур і тисків, характерних для циклу Ренкіна при рівній корисній роботі (див.стовпчики 3,4), де радіус каналів матриці ($r = 139 \text{ \AA}$) був вибраний із умови $W_R = W_\Omega = W_{Er} = 0,668 \text{ МДж}$, а $P_2 = P_L = 6,4 \text{ МПа}$.

Нагадуємо, що тиск в системі підбирається таким чином, щоб не допустити процес пароутворення в поровому просторі матриці. При температурі 608 К тиск, при якому починається пароутворення, менше, ніж 6,4 МПа [38]. Тобто, умова " $P_L \geq P_{нас.}(T_1)$ " виконується. У таблиці наведені значення тисків, при яких пароутворення в капілярах априорно неможливе.

Дискусія

ГЛС – конденсована система, енергетичні перетворення в якій засновані на залежності *потенційної* енергії міжмолекулярної взаємодії від температури процесу [3,24-27]. Нагадаємо, що у традиційних робочих тілах (пара, газ) енергоперетворюючі процеси засновані на використанні залежності *кінетичної* енергії хаотичного руху молекул від температури.

Таблиця 1– Фактори і параметри порівнювальних циклів

№ п/п	Показник	Цикл Ренкіна	Цикл Єрошенка					
			при перепадах параметрів в циклі Ренкіна		При радіусі пор $r=1,5 \text{ \AA}$, при рівних корисних роботах, $\varphi=0,7$ $P_{max} = P_2 = 184,3 \text{ Мпа}^*)$	При радіусі пор $r=3 \text{ \AA}$, при рівних корисних роботах, $\varphi=0,7$ $P_{max} = P_2 = 92,2 \text{ МПа}$	При радіусі пор $r=6 \text{ \AA}$, при рівних корисних роботах, $\varphi=0,7$ $P_{max} = P_2 = 46,1 \text{ МПа}$	При радіусі пор $r=12 \text{ \AA}$, при рівних корисних роботах, $\varphi=0,7$ $P_{max} = P_2 = 23,4 \text{ МПа}$
			$\Delta P=6,39 \text{ МПа}$, $r=139 \text{ \AA}$, $\varphi=0,7$	$\Delta T=250 \text{ К}$, $r=139 \text{ \AA}$, $\varphi=0,7$				
1	$l, \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$	0,000073	0,0186	0,0186	2,267	1,133	0,567	0,283
2	H	0,258	0,003	0,003	0,267	0,178	0,107	0,06
3	$\eta_{\text{карно}}$	0,452	0,452	0,452	0,452	0,452	0,452	0,452
4	$\eta/\eta_{\text{карно}}$	0,571	0,006	0,006	0,592	0,394	0,237	0,131
5	$\eta_{0,8}$	-	0,015	0,015	0,445	0,382	0,297	0,205
6	$\eta_{0,8}/\eta_{\text{карно}}$	-	0,03	0,03	0,985	0,845	0,658	0,456
7	$\Omega, \cdot 10^6, **)$ $\text{м}^2/\text{кг } H_2O$	9,46***)	0,144	0,144	13,3	6,6	3,3	1,67
8	$V_p = V_{H_2O}$ $= V_{\text{пор}} \cdot \text{М}^3$	0,001	0,09425	0,09425	0,001	0,002	0,004	0,008
9	$Q_{eko}, \text{МДж}$	2,433	32,3	32,3	0,934	1,183	1,681	2,678

*) - *Гіпотетичне* значення $P_2 = 184 \text{ МПа}$, для $r=1,5 \text{ \AA}$ (значення σ_{H_2O} для таких мікро розмірів невідоме) в експериментах не перевірялось, надається в таблиці як гранично допущене (діаметр молекули води має значення $2,82 \text{ \AA}$)

**) Ω - Питома робоча міжфазна поверхня

***) Величина $9,46 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{кг } H_2O$ - сумарна поверхня всіх молекул в 1 кг води - цикл Ренкіна (сухий пар). Це значення було розраховане за формулою $\Omega = N_A \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \mu$, де N_A - число Авогадро, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$, μ - кількість моль в 1 кг води ($\mu = 55,6 \text{ моль}$)

Реальність тисків 23-92 МПа, при *інтрузії-екструзії* води в пори з радіусами $r = 3 \div 12 \text{ \AA}$ (таблиця, стовбці 6-8) підтверджена в експериментах [21,22]

Як і було передбачено, невисокі значення η для ГЛС-циклу при перепадах температур і тисків, як в циклі Ренкіна (рядок 2, стовпці 2-4), пояснюються тим, що при вказаних початкових умовах треба використовувати матриці с розміром пор 139 \AA (щоб забезпечити потрібний тиск $P_2 = 6,4 \text{ МПа}$ при $T_2 = 303 \text{ К}$), що дає невисокі значення міжфазної поверхні (її зміни) $\Delta\Omega$ при застосуванні 1 кг води. Для того, щоб при заданих P_2 і T_2 прирівняти роботи циклів, потрібно збільшувати об'єм (масу) матриці з розміром пор 139 \AA і масу потрібної води, аби зробити більшою міжфазну поверхню $\Delta\Omega$ в ГЛС. А це призводить до збільшення затрат теплової енергії на нагрів масивної «пасивної» фази ГЛС і до зниження ККД. Проте, навіть за таких «невигідних» для ГЛС-циклу умовах маємо термодинамічну компактність в 1000 разів більше, ніж в циклі Ренкіна (рядок 1, стовбці 2-4).

Вирішальну роль питомої міжфазної поверхні $\Omega \left(\frac{\text{м}^2}{\text{кг } H_2O} \right)$ в перетворенні теплової енергії в механічну можна побачити в стрічці 7. Щоб виконати роботу 0,688 МДж в циклі Ренкіна треба використати 1 кг H_2O і перетворити масивну фазу води в окремі молекули (сухий пар) з загальною їх поверхнею «молекула-вакуум» $9,46 \cdot 10^6 \text{ м}^2$. Беручи до уваги те, що застосування матриць з радіусом пор від 3 \AA до 139 \AA не дозволяє виконати ту ж саму роботу 0,688 МДж в ГЛС-циклі, використовуючи лише 1 кг води, через менше значення питомої міжфазної поверхні «рідина-матриця» в діапазоні $(0,144 \div 6,6) \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{кг}$. Замість того, щоб розділяти воду на окремі молекули шляхом випаровування в циклі Ренкіна, в ГЛС-циклі відбувається дрібнення масивної фази води за допомогою жорстких матриць на окремі кластери (десятки чи сотні молекул в мікрокаплях води). Наявність кластерів, а не окремих молекул в поровому просторі матриць, зменшує сумарну поверхню «рідина-матриця» як джерело вільної енергії і, відповідно, величину корисної роботи в циклі. Для того, щоб підвищити цю поверхню у великих кластерах (мікрокаплях) доводиться збільшувати кількість води в ГЛС-циклі, яка підлягає диспергуванню від 1 до 8 кг (рядок 8, стовпчики 5-8). Із таблиці видно, що по мірі збільшення радіуса пор/капілярів (стрічка 7 стовбці 3-8) в ГЛС-циклі, доводиться збільшувати кількість задіяної води, що знижує питому (вагову) міжфазну поверхню ($\text{м}^2/\text{кг}$), але забезпечує загальну поверхню в $13,3 \cdot 10^6 \text{ м}^2$, яка гарантує виконання роботи в 0,688 МДж в ГЛС-циклі, як в циклі Ренкіна.

Щоб показати всі можливості циклу на базі гетерогенної ліофобної системи, потрібно змінити її початкові параметри (наприклад, зменшити радіус пор/капілярів). Промислово ефективним є значення радіусів на рівні $3 \div 6 \text{ \AA}$ (дивись стовбці 6,7). При цих параметрах можливо отримати суттєво кращі показники ефективності ГЛС-циклу. Так як велика частина затраченої в циклі теплової енергії йде на нагрів δq_{1-2} та охолодження δq_{3-4} масивної (а не поверхневої) фази системи, то це дає можливість використати в ГЛС-циклі рекуператори тепла δq_{3-4} для використання його в процесі 1-2 циклу. Теоретично ми можемо досягти рівня рекуперації 90%, використовуючи пластинчасті теплообмінники [40]. В розрахунках прийемо рівень рекуперації 80% [41].

За таких умов отримуємо вищу ступінь карнотизації ГЛС-циклу η_{Er}/η_{Car} (див.ряд 6, стовпці 6,7), ніж у циклі Ренкіна (див.ряд 4, стовбець 2). Але для цього треба перейти на більший тиск P_2 (46-92 МПа) в робочому такті циклу. Тиски рівня 38 МПа вже застосовуються в сучасній теплоенергетиці [42] Саме на такому шляху конструювання теплових машин (зменшення радіусу пор/капілярів матриць і підвищення тиску робочого такту) можливо розкрити весь потенціал ГЛС-циклу.

В новому циклі, використовуючи капілярно-пористі матриці з діаметром пор капілярів 3 \AA , можна досягти зменшення теплового забруднення навколишнього середовища не тільки завдяки зниженню кількості джоулів, які викидаються у живу природу (дивись ряд. 9, стовпці 2,6), але, головне, з причини меншої температури T_2 , при якій здійснюється робочий такт в ГЛС-циклі. Нагадаємо, що в усіх традиційних теплових машинах світу на протязі двох віків робочий такт здійснюється завжди при високій температурі T_1 , тому гарячі газ/пара на виході сучасних теплових машин завдають нищівних руйнувань навколишньому середовищу.

Термодинамічна компактність циклу Єрошенка за умов: « $P=92,2 \text{ МПа}$, $T=303 \text{ К}$ » досягає неймовірної величин $1133 \text{ МДж}/(\text{м}^3\text{К})$, що майже в 32 тисячі разів вище, ніж в циклі Ренкіна (див. ряд 1, стовпчики 2,6). А це відкриває перспективи радикального зниження потреби в конструкційних матеріалах в енергомашинобудуванні і зменшення габаритів теплових машин нового класу. Присутність рекуператорів тепла в ГЛС-циклі не набагато зменшить показник ТК.

Формулу (19) можна записати у іншому вигляді, посилаючись на [9,10]:

$$\frac{\eta_{Er}}{\eta_{Car}} = \frac{1}{1 + r \cdot \frac{k \cdot C_V}{\frac{d\sigma}{dT} \cdot \cos\theta} \cdot \eta_{Car}} \quad (21).$$

Формула (21) вказує, що збільшення ступеня карнотизації ГЛС-циклу на практиці можна досягти шляхом зменшення радіусів r пор/капілярів матриці, питомої (об'ємної) теплоти C_V ГЛС (Дж/м³К) та збільшення температурного коефіцієнта поверхневого натягу рідини $\frac{d\sigma}{dT}$ (н/м*К) і контактного кута «незмочування» (через зростання модуля $\cos \theta$).

Розрахунки (див. мал. 5) показують, що застосування матриць з радіусом пор/каналів 3 Å зрівнює ККД двох циклів (мал.5а), а при радіусах 5 Å досягається однакова ступінь їх карнотизації (мал.5б). Подальше диспергування рідини при застосуванні матриць з меншими радіусами пор/каналів, ніж (3-5) Å, робить ГЛС-цикл більш ефективним, ніж цикл Ренкіна. Досконалі технології виробництва пористих матеріалів в сучасній хімічній промисловості, включаючи нанотехнології, дозволяють створити гідрофобні матриці з радіусами $r=3$ Å і пористістю $\phi=0,7$ і сподіватись на успішне впровадження ГЛС в промисловість.

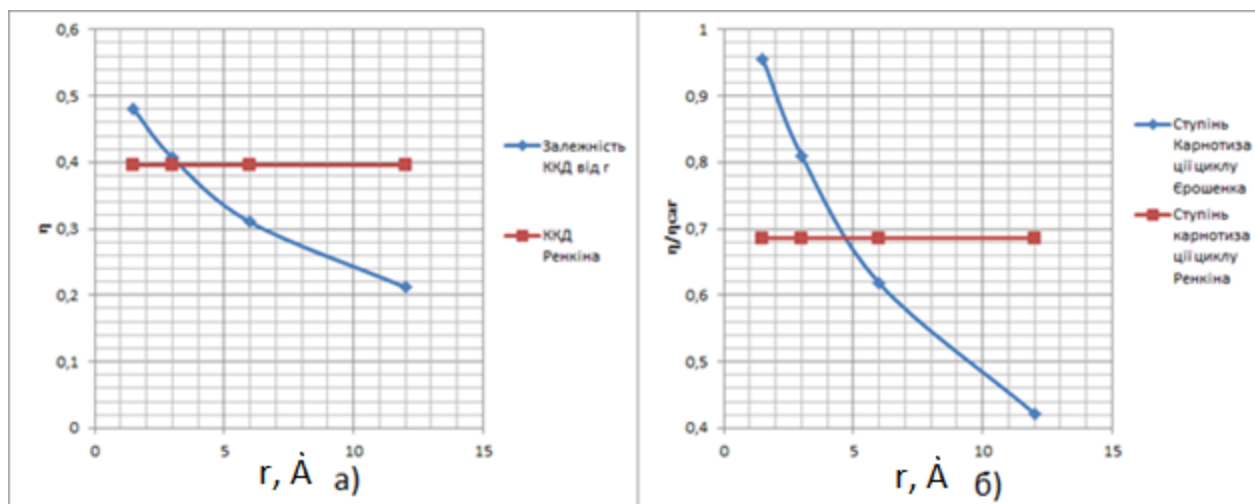


Рисунок 5 - Залежність η і η/η_{car} від радіуса r пор/каналів матриці для ГЛС-циклу з параметрами, вказаними в таблиці

Парадоксальний вплив ККД Карно на ступінь карнотизації ГЛС-циклу (остання зменшується з ростом ККД Карно (21)), насправді, має важливе практичне значення, бо дає слушну рекомендацію для інженерів-енергетиків: ГЛС-цикл є найбільш ефективним серед всіх відомих термодинамічних циклів при використанні *низькотемпературних* джерел теплової енергії (геотермальних, теплоти морів та океанів, низькотемпературних промислових викидів пари та газу тощо), бо повнота перетворення теплоти вказаних джерел в механічну роботу (величина відношення $\frac{\eta_{er}}{\eta_{car}}$) збільшується зі зниженням ККД Карно (21).

Так як максимальна робоча температура в ГЛС-циклі не піднімається вище 370 °С в розглянутих прикладах (для води-пари), то даний цикл можна використовувати для утилізаторів тепла з додатковим виробництвом корисної роботи (наприклад, після традиційних ГТУ). Для порівняння: в газотурбінній установці типу ГТ-100-3М температура газів на виході становить 398 °С, а її ККД становить 35% [43]. Розрахунки циклу Єрошенка проводились для температури нагрівача $T_1=305$ °С. Вже зараз можна припустити, що ККД нової силової установки на базі ГЛС-циклу буде на рівні 76%, при цьому без потреб у додатковому догріву вихідних газів після ГТУ (як це звичайно використовується в котлах-утилізаторах). Звісно, що вказані пропозиції потребують додаткових, більш детальних термодинамічних розрахунків та експериментів.

Висновки

Сучасний стан «Термомолекулярної енергетики», яка базується на використанні потенціальної енергії міжмолекулярної взаємодії на суперрозвинених міжфазних поверхнях в конденсованих ліофобних системах «рідина+тверда капілярно-пориста матриця, незмочувана цією рідиною» для здійснення різноманітних термодинамічних перетворень в термомеханічних системах, дає наукові і технологічні підстави для розгортання проектно-конструкторських робіт з метою своєчасного впровадження в тепловій і атомній енергетиці нового закритого ГЛС-циклу (циклу Єрошенка з зовнішнім теплопідводом), показники якого можуть перевищити відомі техніко-економічні характеристики циклу Ренкіна.

Кінцевий успіх нової енерготехнології на базі ГЛС/ПК пов'язаний насамперед з можливістю безпечного і надійного використання високих тисків в *конденсованих* системах, якими є ГЛС (повна відсутність пари/газу в робочих камерах нових енергоустановок). Тиск (н/м² = Дж/м³) – це питома об'ємна енергія речовини, тому для *конденсованих* систем вона завжди вище, ніж для *стискуваних* газів/пара.

Серед потенціальних переваг циклу Єрошенка порівняно з циклом Ренкіна (при однакових значеннях отриманих механічної роботи і ККД) можна виділити наступні:

– термодинамічна компактність ГЛС-циклу в декілька десятків тисяч разів перевищує аналогічні показники теплосилових установок Ренкіна, це означає можливість радикального зниження витрат конструкційних матеріалів в теплосилових установках або двигунах Єрошенко завдяки суттєвому зниженню об'єму робочої камери і відсутності парогенератора і конденсатора пара, які являються невід'ємними компонентами традиційних теплосилових установок Ренкіна;

– величезна термодинамічна компактність дає можливість суттєво зменшити габарити теплосилової ГЛС-установки і встановлювати її в місцях, непристосованих для безпроблемного застосування циклу Ренкіна (наприклад, в малій енергетиці, на кораблях і підводних човнах, на транспортних засобах тощо).

– вагоме зниження теплового забруднення навколишнього середовища можна досягнути через відсутність конденсаторної установки пари і можливість рекуперації теплової енергії в ГЛС-циклі, а також завдяки тому, що робочий такт в ГЛС-циклі виконується при температурі холодильника T_2 (безпрецедентне явище в технічній термодинаміці);

- безшумність роботи двигунів (енергоустановок) завдяки капілярному характеру швидкісного руху рідини в поровому просторі матриць (малі переміщення кластерів рідини) та відсутність газової (парової) складової в ГЛС/ПК знижує рівень шумного забруднення навколишнього середовища.

Враховуючи те, що сучасна хімічна промисловість щороку видає на світовий ринок нові пористі матеріали з величезним значенням питомої поверхні (до $2000 \frac{m^2}{g}$), можна припустити, що їх застосування в ГЛС/ПК буде і надалі. Все це дає можливість підвищити термодинамічну та технологічну ефективності нового ГЛС-циклу. При збігу в часі попиту з боку суспільства (а це - виклики епохи енергетичної кризи) і пропозиції з боку розробників нової техніки (наявність на цей час конструктивних і технологічних рішень в Термомолекулярній енергетиці) можна надіятись на появу в найближчі роки в теплової і атомній енергетиці альтернативи циклу Ренкіна.

Список літератури

1. *Єрошенко В.А.* // Предельный КПД или максимальная термодинамическая компактность тепловых двигателей? / Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт – 1987, №2 – С. 125 – 133.
2. *Єрошенко В.А., Аистов В.И.* // Оптимизация циклов тепловых двигателей по термодинамической компактности // Изд. АН УССР, Промышленная теплотехника, – 1990, №3 – С. 60-64.
3. *Єрошенко В.А.* // Термомолекулярная энергетика // Промышленная теплотехника - 1992, №14 – С. 22–25.
4. *Єрошенко В.А.*, Необычные свойства одной сложной термодинамической системы // Доклады АН УССР. Сер. А.: Физ.-мат. и тех. науки – 1990. №. 10 – С. 79-82.
5. *Eroshenko V.A.*, Dimensionnalité de l'Espace Comme Potentiel Thermodynamique d'un Système. Entropie, 1997, 202, p.110.
6. *Пат. 1,254,811 А СССР (1981–ДСП) – РФ (1993), F 03 G 7/00.* Гетерогенная термодинамическая система, способ Єрошенко преобразования тепловой энергии в механическую и устройство для его осуществления / В.А. Єрошенко; заявл. 24.07.1981 (ДСП); опубл. 30.09.1996, Бюл. №3
7. *Valentin Eroshenko* // Structure heterogene d'accumulation ou de dissipation d'energie, procedes d'utilisation d'une telle structure et appareils associes. Pat. International WO 96/18040, 13.06.1996.
8. *Valentin Eroshenko* // Heterogeneous structure for accumulating or dissipating energy, methods of using such a structure and associated devices, US Patent 6.052.992, Apr. 25.2000
9. *Єрошенко В.А., Ярош Т.Л.* // Синтез жидкостей с большим значением температурного коэффициента поверхностного натяжения – перспективный путь энерго- и материалосбережения, Наукові вісті НТУУ “КПІ”, 2012, №2 – С.37-49..
10. *Eroshenko V.A., Popyk A.* // Current Status and Perspectives of Thermomolecular Engine Developments, International Journal of Thermodynamics, 2014, Vol. 17, №1, pp. 33 – 41.
11. *Eroshenko V.A.* // Amortisseur a Haut Pouvoir Dissipatif. French Patent, 2000, № FR 2804188 A1. Damper with high dissipating power, U.S. Patent №6,615,959(2003).
12. *Eroshenko V.A.* // Virtually oil-free shock absorber having high dissipative capacity. U.S. Patent Application 13/820,977, 2011.
13. *Suciu C.V., Iwatsubo T. and Deki S.* // Investigation of a colloidal damper. Journal of colloid and interface science. 2003, 259(1), pp. 62 – 68.
14. *Suciu C.V. and Yaguchi K.* // Endurance tests on a colloidal damper destined to vehicle suspension. Experimental mechanics, 2009, 49(3), pp. 383 – 393.
15. *Eroshenko V.A.* // A new paradigm of mechanical energy dissipation. Part 1: theoretical aspects and practical solutions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2007, pp. 285 – 300.
16. *Eroshenko V.A., Piatiletov I., Coiffard I., Stoudenets V.* // A new paradigm of mechanical energy dissipation. Part 2: experimental investigation and effectiveness of novel car damper. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2007, 221(3), pp. 301 – 312.

17. *Sucie C.V., & Kimura Y* (2012). Experimental study on the forced heating and natural cooling of a colloidal damper. *Journal of System Design and Dynamics*, 2012, 6(5), pp. 538-554
18. *Ерошенко В.А., Студенец В.П., Пятилетов И.И., Щученко В.Ю* // Применение репульсивных клатратов для устройств и систем обеспечения сейсмостойкости и систем обеспечения сейсмостойкости сооружений. Строительство и техногенная безопасность. Сборник научных трудов, Симферополь, 2011, выпуск 35, сс. 127-132.
19. *Ерошенко В.А.* // Гидрокапиллярный аккумулятор, Пат. СССР 943444, опуб. 15.07.1982. бюл. №26
20. *Ерошенко В.А.* // Гидрокапиллярный аккумулятор Ерошенко, Пат. SU 1333870 А1, опуб. 30.08.1987, бюл. №32,
21. *Eroshenko V.A., Regis R.C., M. Soulard, J. Patarin* // Les systemes hétérogènes «eau-zeolithe hydrophobe»: de nouveaux resorts moléculaires // *Comptes Rendus. Physique.* – 2002. – No. 25- С. 111-119.
22. *Eroshenko V.A., Regis R.C., M. Soulard, J. Patarin* // *Energetics: a new field of applications for hydrophobic zeolites* // *Journal of the American Chemical Society.* – 2001. – С. 114-131.
23. *Eroshenko V.A. and Grosu Ya.G.* Thermodynamic and Operational Properties of Heterogeneous Lyophobic Systems // *International Journal of Thermodynamics*, 2013, №1, p. 1-9.
24. *Eroshenko V. A.*, Russian-Soviet Patents № 943,444 (1980); 1,382,078 (1982), 1,380,357 (1983),
25. Пат. 1380357 А2 СССР (1983-ДСП) – РФ (1993), F 03 G 7/00. Способ Ерошенко преобразования тепловой энергии в механическую / *В.А. Ерошенко*; заявл. 30.11.1983 (ДСП); опубл. 30.09.1996, Бюл. № 3.
26. Пат. 1452262 СССР (1986-ДСП) – РФ (1993), А1 F03 G 7/00. Роторный тепловой двигатель Ерошенко / *В.А. Ерошенко*; заявл. 16.06.1986 (ДСП); опубл. 30.09.1996, Бюл. №3.
27. *Eroshenko V. A.*, Russian-Soviet Patents № 1,333,870 (1985), 1,434,881 (1985), 1,452,262 (1986), 1,508,665 (1987).
28. *Ерошенко В.А., Ткаченко С.Г.* // Эффект гипердилатометрии одной сложной термодинамической системы // *Український фізичний журнал* – 1993. № 12. – С. 1789-1792.
29. Патент Российской Федерации. RU (11) 2138086 (13) CI (2002). Тепловое чувствительное пусковое устройство / *В.С. Егоров, А.Г. Портяной, А.П. Сорокин, В.Г. Мальцев, Р.М. Вознесенский.*
30. *Laouir A., L.Luo, D. Tondeur, T. Cachot, P. Le Goff* / Thermal machines based on surface energy of wetting: Thermodynamic analysis / *AIChE Journal.* – 2003, - No. 3 – с. 764-781.
31. Андрущенко А.И., Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок, Москва, Высшая школа 1985, 319 с..
32. Крутов В.И., Техническая термодинамика, Москва «Высшая школа» 1991, 382 с..
33. *Lehn, J. M.*. "Perspectives in Supramolecular Chemistry—From Molecular Recognition towards Molecular Information Processing and Self-Organization". *Angewandte Chemie International Edition in English* (1990) **29** (11): 1304 с..
34. *V.A. Eroshenko* // Repulsive Clathrates. A New Operational Material for Efficient Seismic Isolation // *Int. Conf. Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Seismic Vibrations of Structure, Sicily, Italy, Aug. 25-27.1997*, p.p. 783-794.
35. *Ерошенко В.А., Лазарев Ю.Ф.* // Реология и динамика репульсивных клатратов // *Прикладная механика и техническая физика.* – 2012. №. 1 – С. 114-131.
36. *Ерошенко В.А., Гросу Я.Г.* // Соотношения Максвелла и термические коэффициенты для репульсивных клатратов // *Журнал технической физики.* 2013. - №.8 – С.1 – 7.
37. *Reis T.* // *Introduction à la chimie-physique des surfaces.* – «Dunod» (fr.), Paris: 1952, 286. p..
38. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* // Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Москва. Издательство МЭИ, 160 с..
39. *Физические величины, Справочник, Григорьев И.С., Мейлихов Е.З., 1991* // Москва, Энергоатомиздат, 1991, 1231 с..
40. Реальный КПД пластинчатых теплообменников / *Металекспортпром*: <http://www.ural-mer.ru/plastinchatie-teploobmenniki-v-chelyabinske/realnie-kpd-plastinchatih-teploobmennikov.html>
41. Роторный рекуператор для напольных приточно-вытяжных установок с рекуперацией Ventus VS 21-650, 2015, ООО «СКС» - Киев: <http://www.vts.com.ua/rotor.html>
42. *Т. Склярлова*, Сверхкритический и суперсверхкритический параметры в электроэнергетике, интервью Rana Bose журналу Velan View, Перевод Т. Скляровой, ЗАО «Завод «Знамя Труда», 2012.
43. Газотурбинные установки (ГТУ). <http://www.mosenergoinform.ru/articles/gtu.htm>

V.A Eroshenko, A.V. Tyshkovets, V.O. Bublei

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

ABOUT THE POSSIBILITY OF USING CYCLE EROSHENKO LIKE ALTERNATIVELY RANKINE CYCLE IN THE POWER INDUSTRY

In the article the comparative analysis cycle Rankine is presented with the cycle Eroshenko which is based on condensed heterogeneous lyophobic systems.

A significant advantage of the cycle Eroshenko is the compact thermal power installation without a phase transition "water-steam", it allows to use of these units in areas with limited space (vehicles, space vehicles, submarines, etc.), as well as the maneuvering units of different capacities to cover peak loads. Although attractive and environmental component, as silent installation, and its production requires much lower material costs and reduced thermal pollution to the environment.

Given the potential Eroshenko cycle, and its technical capabilities, the cycle can be regarded as a promising solution for energy problems, including the exit of Ukraine's energy crisis.

Keywords: thermomolekular energy, heterogeneous lyophobic system interphase, intrusion, extrusion, thermodynamic compactness, heat recovery.

УДК 621.620.036.7+536.7+541.12+541.18+541.532.6+541.532.264

**В.А. Ерошенко, д-р техн. наук, профессор, А.В. Тишковець, магистр, В.А. Бублей, магистр
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИКЛА ЕРОШЕНКО КАК АЛЬТЕРНАТИВЫ ЦИКЛУ
РЕНКИНА В ЭНЕРГЕТИКЕ**

В статье представлен сравнительный анализ цикла Ренкина с циклом Ерошенко на основе конденсированных гетерогенных лиофобных систем.

Существенным преимуществом цикла Ерошенко являются компактные размеры теплосилового установи без фазового перехода «вода-пар», это позволяет использовать данные установи в местах с ограниченным пространством (транспортные средства, космические аппараты, подводные лодки и другое), а также как маневренные блоки различной мощности для покрытия пиковых нагрузок. Кроме того, привлекательна и экологическая составляющая, так как установи бесшумны, а на свое производство требуют значительно меньших материальных затрат, а также уменьшается тепловое загрязнение окружающей среды.

Учитывая потенциал цикла Ерошенко и его технические возможности, цикл можно считать перспективным для решения энергетических проблем, в том числе и для выхода Украины из энергетического кризиса.

Ключевые слова: термомолекулярная энергетика, гетерогенная лиофобная система, межфазная поверхность, интрузия, экструзия, термодинамическая компактность, рекуперация тепла.

Надійшла 16.06.2015

Received 16.06.2015

УДК 621.311.019

Ю.П. Матеенко, С.В. Казанский, А.С. Лунин

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЫНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Проведен сравнительный анализ методов определения надежности структурных схем электростанций на стадии проектирования. Рассмотрены особенности оценивания надежности структурных схем электростанций с учетом функционирования рынка электрической энергии.

Цель исследования: повышение эксплуатационной надежности структурных схем электростанций и снижение количества недоотпущенной электрической энергии.

Методика реализации: внедрение современных алгоритмов и программ оценки надежности структурных схем.

Результаты исследования: проанализированы основные методы анализа надежности структурных схем электростанций, получены численные значения интегрального показателя надежности в зависимости от количества отказов в схеме.

Выводы: показаны преимущества применения метода марковских случайных процессов для анализа надежности структурных схем электростанций, как на этапе проектирования, так и в условиях эксплуатации или реконструкции.

Ключевые слова: электростанция, структурная схема, надежность, методы анализа.