

**ЗАСТОСУВАННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕРМОСОРБЦІЙНИХ МЕТАЛОГІДРИДНИХ КОМПРЕСОРІВ**

**1. Вступ. Загальна постановка задачі.** Робота термосорбційних компресорів (ТСК) характеризується періодичністю протікання процесів, що пов'язано з необхідністю здійснення послідовного процесу підведення теплоти до генератора-сорбера в період десорбції та відводу теплоти від нього в період сорбції. Це дозволяє провести певну аналогію з режимами роботи регенеративних теплообмінників, для яких також є характерним періодичність процесів нагрівання і охолодження насадки. При цьому в обох випадках відбувається зміна температури теплоносіїв і теплоакумулюючого матеріалу насадки або металогідриду у часі й просторі. Все це дає підставу говорити про можливість спільного застосування регенеративних теплообмінників і водневих ТСК з метою підвищення їх енергоефективності [1]. На рис. 1 представлено загальну схему теплових потоків ТСК із регенерацією теплової енергії.

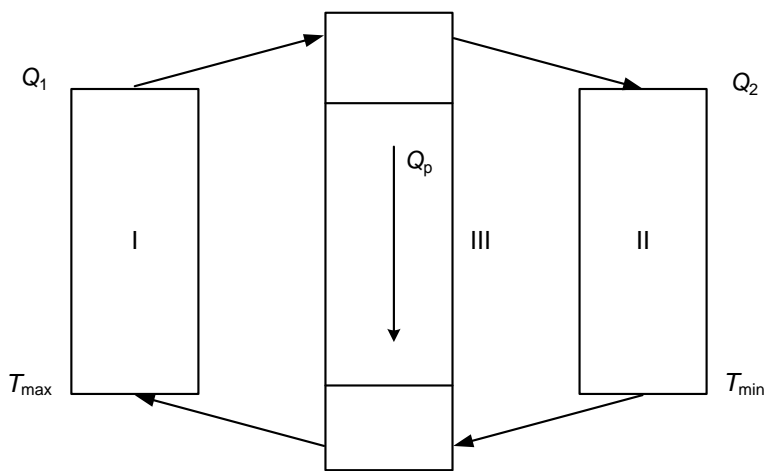


Рисунок 1 – Схема теплових потоків ТСК із регенерацією теплової енергії

На даному рисунку виділено три основних зони – зону I, у якій відбувається процес десорбції на температурному рівні  $T_{max}$ ; зону II, де реалізується процес сорбції при  $T_{min}$  і зону регенерації III, у якій відбувається процес акумуляції теплоти і її передачі між зонами I та II. Таким чином, повернення частини теплоти, що втрачається в перехідних процесах ТСК та використання низькопотенційної викидної теплоти промислових теплотехнологічних комплексів дасть змогу значно зменшити теплові втрати та підвищити енергоефективність роботи термосорбційних компресорів.

**2. Аналіз останніх досягнень і публікацій.** В роботах [2–4] авторами було запропоновано ряд схем термосорбційних компресорів із регенерацією теплової енергії. Одним з перспективних варіантів є схема із використанням теплоти перехідних процесів, у якій у додатковому контурі до і після генераторів-адсорберів встановлюються регенератори теплоти з насадкою з теплоакумулюючого матеріалу. В якості такого матеріалу пропонувалося використовувати кварц, базальт або гофровану металеву стрічку [4].

Зокрема, на рис. 2 представлено теплову схему високотемпературної установки (ВТУ) з підключенням ТСК із регенерацією теплоти до тракту відведення газів. Принцип роботи обладнання по даній схемі полягає у наступному. Димові гази, що відходять, з температурою  $t_{r1}$ , після ВТУ 1 надходять у регенеративний теплообмінник 2б, де охолоджуються до  $t_{r2}$  з одночасним нагріванням насадки. Частина газів після теплообмінника поступає у бічний відвід газозоходу та по ньому подається до блоку генераторів-сорберів 3б, де використовується як джерело теплоти. За ними встановлено регенератор 4, у якому відбувається процес акумуляції тепла, що відводиться у процесі десорбції. Димові гази з температурою  $t_{r3}$  далі надходять в основний газохід, де змішуються з потоком газів, що має температуру  $t_{r2}$ , і далі з температурою  $t_{r4}$  поступають в димар. У той же час холодний теплоносієй – повітря з температурою  $t_{пов1}$ , яка дорівнює температурі навколишнього середовища, подається до генератора 3а, де використовується як охолоджуючий теплоносієй з метою забезпечення температурного рівня, необхідного для процесу сорбції водню.

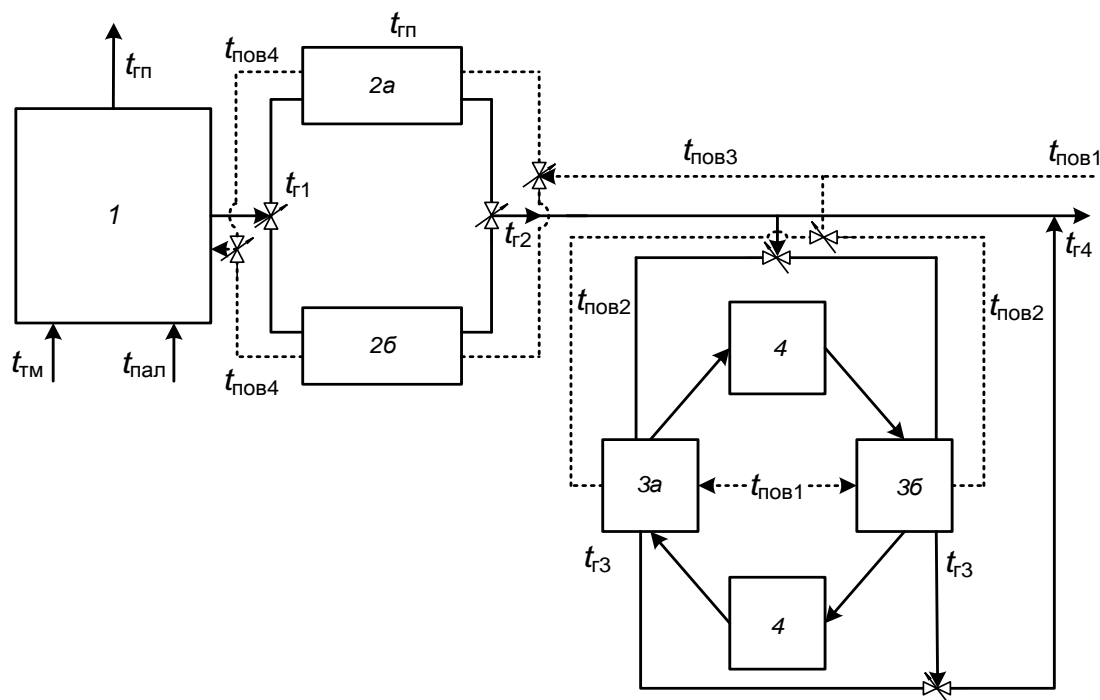


Рисунок 2 – Теплова схема високотемпературного теплотехнологічного комплексу з інтеграцією ТСК: 1 – плавильна піч; 2 – регенеративні теплообмінники для підігріву повітря горіння; 3 – генератори-адсорбери; 4 – регенеративні теплообмінники для використання теплоти перехідних процесів;  $t_{тм}$  – температура технологічних матеріалів;  $t_{гп}$  – температура готового продукту;  $t_{пал}$  – температура палива, що подається в піч

Повітря після генератора 3а з температурою  $t_{пов2}$  змішується з основним потоком повітря з температурою  $t_{пов1}$ . Цей потік, який вже має іншу температуру  $t_{пов3}$ , надходить у регенеративний теплообмінник 2а, що працює у періоді нагрівання повітря горіння. Далі повітря, що підігрівається до температури  $t_{пов4}$ , подається в паливкові пристрої високотемпературної установки.

**3. Невирішена частина загальної проблеми.** Для підвищення ефективності запропонованих теплотехнологічних схем важливе значення має вибір відповідних теплообмінних пристроїв, що забезпечують максимальне використання теплоти перехідних процесів і повернення її в зону десорбції, а також визначення оптимальних режимів роботи ТСК. Одним з перспективних типів теплообмінних пристроїв у цьому випадку можуть стати теплообмінники з фазовим переходом, які знайшли широке застосування на геліостанціях [5]. Перевагою таких систем є висока теплова ємність, сталість температури й низький тиск. У даний час ще остаточно не вирішені проблеми теплообміну із середовищем, що акумулює, важливими є питання зменшення високої вартості теплообмінників і забезпечення параметрів контрольованої атмосфери. Дослідження показали, що через дію «залишкового» теплового ефекту, обумовленого фазовим переходом, кількість теплоти, що передається в регенеративній насадці, значно збільшується у порівнянні з традиційними насадками.

**4. Постановка задачі.** У даному випадку важливим питанням при розробці системи регенерації теплоти перехідних процесів є розрахунки і вибір конструкції та матеріалів елементів системи, що забезпечать її ефективну та надійну тривалу роботу. Насамперед потребує вирішення питання вибору раціональної конструкції регенеративних теплообмінників, типу теплоакумулюючого матеріалу з відповідними властивостями та проміжного теплоносія. Застосування різноманітних теплоакумулюючих матеріалів для систем регенерації вимагає комплексного підходу до розробки рішень, спрямованих на максимальне використання позитивних якостей теплоакумулюючих матеріалів (ТАМ) і виключення існуючих недоліків для відомих технологічних пропозицій. Вирішення цих завдань також пов'язано з необхідністю створення методики розрахунку теплообмінних апаратів при умові використання у якості теплоакумулюючого елементу матеріалів з фазовим переходом для розробки системи регенерації теплоти перехідних процесів термосорбційних компресорів. У вирішенні сформульованих вище питань і полягає **основна мета** даного дослідження.

**5. Викладення основного матеріалу дослідження.** Для застосування в системах регенерації перехі-

дних процесів ТСК пропонується застосовувати регенеративні теплообмінники з розміщенням ТАМ в окремих трубках, що являють собою циліндр із внутрішнім радіусом  $R$  і товщиною стінки  $\delta$ , виготовлений з матеріалу, що не реагує із плавкими матеріалами при існуючому рівні температур. Циліндр заповнений речовиною, температура плавлення якої дорівнює середній температурі потоку, що проходить через теплообмінник. При підведенні теплоти до елемента регенеративного теплообмінника відбувається процес нагрівання стінки та теплоакумулюючого матеріалу, а потім – процес плавлення матеріалу ядра. Із часом процес утворення нової фази ( $x$  – ширина нової фази) захоплює все більший обсяг вихідної фази, границя розділу фаз переміщується в об’єм вихідної фази. При охолодженні, коли температура теплоносія стає нижчою за температуру плавлення теплоакумулюючого матеріалу, відбувається його затвердіння. При цьому процес охолодження вихідної фази супроводжується зменшенням її середньої температури.

У даній роботі представлено методику та алгоритм для проектування теплового акумулятора для систем регенерації ТСК, у якому у якості регенеративної насадки використовуються матеріал з фазовим переходом.

На першому етапі розробки необхідно вибрати відповідні матеріали для ядра та стінок теплоакумулюючих елементів. При цьому температура плавлення матеріалу ядра повинна приблизно дорівнювати температурі потоку гарячого теплоносія. Вибраний матеріал стінок елементів не повинен вступати у хімічні реакції з ТАМ у плавкому стані.

На другому етапі розробки виконують попереднє компоновання теплообмінника, тобто обираються основні розміри теплообмінної поверхні та спосіб розташування теплообмінних елементів. Після цього необхідно задатися величиною швидкості руху теплоносія в теплообміннику. У випадку перемінної температури гарячого теплоносія розраховується максимальне значення питомого теплового потоку та його середнє значення за відповідний період часу.

Наступний розрахунковий блок дозволяє визначити тривалість циклу роботи теплообмінника. Тривалість нагрівання робочого тіла циліндра до температури плавлення ядра визначається за формулою

$$\tau_n = \frac{M \Delta i_m}{F_n q_1} = \frac{\Delta i_m}{q_1 \cdot K_{\text{ц}}} \delta \rho_m, \quad (1)$$

де  $\Delta i_m$  – питоме збільшення ентальпії тіла в процесі нагрівання, кДж/кг;  $M$  – маса тіла, кг;  $F_n$  – величина поверхні нагрівання,  $\text{м}^2$ . При симетричному нагріванні вона збігається з геометричною, при несиметричному нагріванні дійсна та геометрична поверхні не збігаються;  $q_1$  – тепловий потік, що підводиться до розплавленого робочого тіла, кДж/м<sup>2</sup>;  $\rho_m$  – густина матеріалу циліндра, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta$  – товщина стінок, м;

$K_{\text{ц}} = \frac{1}{1 - \delta/D}$  – коефіцієнт, що залежить від геометричних характеристик циліндра.

Для розрахунку часу плавлення матеріалу ядра необхідно по перше визначити число Коссовича  $Ko$  та безрозмірний час  $Fo$

$$Fo_{\text{пл}} = \frac{1}{K_{\text{ф}} \cdot K_q \cdot K_t} + \frac{Ko}{4}, \quad (2)$$

де  $K_t$  – коефіцієнт розподілу температур по товщині розплавленої зони;  $K_q$  – коефіцієнт усереднення теплового потоку;  $K_{\text{ф}}$  – коефіцієнт форми тіла.

Тривалість процесу плавлення ТАМ теплообмінника складає величину

$$\tau_{\text{пл}} = Fo_{\text{пл}} \frac{R^2 \rho_m c_m}{\lambda_m}. \quad (3)$$

Наступний етап розрахунків полягає у визначенні об’єму теплоакумулюючої насадки і величини необхідної поверхні нагріву теплового акумулятора за допомогою рівнянь теплового балансу з урахуванням теплоти фазового переходу. При цьому, кількість теплоти, що акумульована теплообмінником в період нагрівання, приймається рівною кількості теплоти, що сприймають теплообмінні елементи з урахуванням теплоти плавлення ядра.

При аналізі процесу плавлення тіл у конкретному агрегаті певний інтерес складає визначення загальної тривалості цього процесу. При цьому раніше динаміка ж його зміни звичайно не розглядалась, тому

що теплота, яку затрачено на розплавлення матеріалу, потім не використовується. Але, якщо мова йде про плавлення матеріалу в елементах регенеративних теплообмінників, що акумулюють енергію, де використовується теплота фазового переходу, то необхідно знати не тільки тривалість процесу плавлення, але й кількість теплоти, витраченої на цей процес, що надалі (у період кристалізації) піде на підвищення рівня температури теплоносія.

Кількість теплоти, акумульованої в напівциклі роботи ТСК

$$Q_p = M_{\text{тн}} \cdot (c'_{\text{тн}} T'_{\text{тн}} - \bar{c}''_{\text{тн}} \bar{T}''_{\text{тн}}) \cdot \tau_d, \quad (4)$$

де  $Q_p$  – кількість теплоти, що акумульована в напівциклі роботи ТСК, кДж;  $\bar{T}'_{\text{тн}}$  – значення середньої за цикл температура гарячого теплоносія перед теплообмінником, К;  $\bar{T}''_{\text{тн}}$  – середня за цикл температура гарячого теплоносія після теплообмінника, К;  $c'_{\text{тн}}, \bar{c}''_{\text{тн}}$  – теплоємності теплоносія при відповідній температурі, кДж/(кг·К);  $M_{\text{тн}}$  – масова витрата теплоносія, кг/с;  $\tau_d$  – тривалість напівциклу роботи генератора-сорбера, с.

Загальна кількість теплоти, що засвоєна всіма теплообмінними елементами

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{тр}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{пл}}, \quad (5)$$

де  $Q_{\text{тр}}$  – кількість теплоти, що засвоюється масою трубок теплообмінника;  $Q_{\text{м}}$  – кількість теплоти, що засвоюється масою матеріалу насадки;  $Q_{\text{пл}}$  – кількість теплоти, що витрачається на розплавлення ТАМ.

Ці складові розраховуються в такий спосіб:

$$Q_{\text{тр}} = m_{\text{тр}} \cdot n_{\text{ел}} \cdot c_{\text{тр}} \cdot (\bar{T}'_{\text{тн}} - \bar{T}''_{\text{тн}}); \quad (6)$$

$$Q_{\text{м}} = m_{\text{м}} \cdot n_{\text{ел}} \cdot c_{\text{м}} (\bar{T}'_{\text{тн}} - \bar{T}''_{\text{тн}}); \quad (7)$$

$$Q_{\text{пл}} = m_{\text{м}} \cdot n_{\text{ел}} \cdot q_{\text{пл м}}, \quad (8)$$

де  $m_{\text{ст}}$  та  $m_{\text{м}}$  – маса стінок однієї трубки та речовини, що плавиться, кг;  $c_{\text{тр}}$  – середня масова теплоємність матеріалу корпусу теплообмінного елемента, кДж/(кг·К);  $n_{\text{ел}}$  – кількість теплообмінних елементів в регенераторі, шт.;  $q_{\text{пл м}}$  – питома теплота плавлення ТАМ, кДж/кг.

Виходячи з того, що кількість теплообмінних елементів є невідомою величиною, тому спочатку необхідно визначити загальну кількість теплоти, що засвоюється одним елементом  $Q_{\text{ел1}}$ , а після цього із рівняння теплового балансу знайти загальну кількість елементів теплообмінного апарату. Для цього використовується співвідношення

$$n_{\text{ел}} = Q_p / Q_{\text{ел1}}, \quad (9)$$

де величина  $Q_p$  – кількість теплоти, що передається насадці регенеративного теплообмінника.

Далі, знаючи кількість теплообмінних елементів, знайдемо загальну поверхню теплообміну. Після цього потрібно виконати компонування елементів теплообмінника.

Для визначення відповідності тривалості режимів роботи генераторів-сорберів та теплообмінників необхідно порівняти суму тривалості періодів нагрівання матеріалу стінки трубки та плавлення ядра с тривалістю напівциклу роботи генератора-сорбера  $\tau_r$ . У випадку, якщо буде спостерігатися невідповідність періодів роботи генератора-сорбера та теплообмінників, то необхідно виконати їх перерахунок, змінюючи при цьому тип матеріалу ядра, відповідно, його теплофізичні властивості, або розміри та компонування теплообмінних елементів.

### **Висновки**

У даній роботі запропоновано методику і алгоритм розрахунку теплообмінних апаратів при умові використання для теплоакумулюючих елементів регенераторів матеріалів з фазовим переходом. Їх викори-

стання є перспективним для розробки системи регенерації теплоти перехідних процесів термосорбційних компресорів з метою підвищення їх енергоефективності.

Теплообмінні апарати даної конструкції мають незначні габаритні характеристики при використанні в якості ТАМ недорогих хімічних сполук, що у даний час серійно випускаються промисловістю. За рахунок використання додаткової теплоти плавлення теплоакumuлюючого матеріалу вони мають значно кращі теплотехнічні та масогабаритні характеристики в порівнянні з регенеративними теплообмінниками з нерухомою насадкою із традиційних матеріалів (кварц, базальт, металева стрічка і т.п.), які раніше було запропоновано для використання в системах регенерації перехідних процесів ТСК.

#### Література

1. Развитие водородгидридной техники и технологии / В.В. Соловей, В.М. Кошельник, Ю.Ф. Шмалько, А.В. Кошельник // Экотехнологии и ресурсосбережение. – № 1. – 2006. – С. 31–37.
2. А.с. 1434904 СССР, МКУ<sup>2</sup> F25B15/02. Способ работы водородного термосорбционного компрессора / Соловей В.В., Ивановский А.И., Макаров А.А. [и др.] (СССР). – Оpubл. 20.06.86, Бюл. № 24. – 2 с.
3. А.с. 857662 СССР. МКУ<sup>2</sup> F25B17/18. Компрессорная установка / Подгорный А.Н., Варшавский И.Л., Соловей В.В. [и др.] (СССР). – Оpubл. 23.08.81, Бюл. № 31. – 2 с.
4. А.с. 1019907 СССР. МКУ<sup>2</sup> F25B15/16, F04B37/02. Компрессорная установка / Варшавский И.Л., Соловей В.В., Черкашин Ю.В. [и др.] (СССР). – Оpubл. 22.01.83, Бюл. № 4. – 5 с.
5. Кошельник О.В. Розробка енергоефективних термосорбційних компресорів з системою регенерації теплоти перехідних процесів // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2010. – № 54. – Тем. вип. „Хімія, хімічна технологія та екологія”. – С. 16–20.

УДК 661.968: 536.782

Кошельник А.В.

#### **ПРИМЕНЕНИЕ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОСОРБЦИОННЫХ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ КОМПРЕССОРОВ**

Для повышения эффективности работы термосорбционных металлгидридных компрессорных установок предлагается использовать регенеративные теплообменники с фазовым переходом, что обеспечит повышение КПД компрессоров за счет использования теплоты переходных процессов.

Koshelnik A.V.

#### **REGENERATIVE HEAT EXCHANGERS USE FOR TRANSIENT PROCESSES HEAT UTILIZATION IN THE THERMOSORPTIONAL METAL HYDRIDE COMPRESSORS**

Regenerative phase transition heat exchangers are proposed to increase effectiveness of thermosorptional metal hydride compressor plants. It will provide the increase of compressors efficiency due to heat of transient processes utilization.