

УДК 536.7

ОБОРОТНІСТЬ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Ломейко О.П., к.т.н.,

Таврійський державний агротехнологічний університет

Кулінченко В.Р. д.т.н.

Національний університет харчових технологій

Тел. (0619) 44-81-00

Анотація – розглядаються умови оборотності у технічній термодинаміці та схеми теплоенергетичних установок для здійснення кругових процесів, аналізується поняття ентропії, як ключа для визначення внутрішньої і зовнішньої оборотності і необоротності процесів.

Ключові слова – термодинаміка, оборотність, необоротність, цикл, ентропія, холодильний коефіцієнт.

Постановка проблеми. Умови оборотності. Уявлення про оборотність процесів має фундаментальне значення як у фізиці, так і в технічній термодинаміці. У констатації самого факту існування незворотних процесів лежить основна ідея другого початку термодинаміки.

Процес вважається оборотним, якщо він може відбуватися у зворотному напрямку таким чином, що всі тіла, які приймали участь у прямому процесі, прийдуть при закінченні зворотного процесу до свого початкового стану. Якщо повернення всіх тіл, які приймають участь у процесі, до початкового стану неможливий, то такий процес вважається незворотним. Прикладами незворотних процесів є: тертя, передача теплоти за кінцевої різниці температур, дифузія та інші процеси, які відбуваються в теплосилових і холодильних машинах. Прикладами оборотних процесів можуть бути незатухаючий рух маятника, течія рідини без тертя і інші явища. Усі ці процеси чи самі по собі періодичні, чи можуть здійснюватися в зворотному напрямку без того, щоб у тілах, які приймають у цьому участь, чи в оточуючому ці тіла середовищі залишалися певні зміни.

Якщо виключити з розгляду електромагнітні явища, то джерелами незворотності є: внутрішнє тертя між елементами робочого тіла, тертя між елементами машини, розширення робочого тіла без відводу механічної роботи, дифузія, передача теплоти (як між елементами робочого тіла, так і між тілом і джерелами теплоти), що відбувається при

кінцевій різниці температур, не пружні вібрації твердих тіл, хімічні реакції, змішування різних компонентів, явища осмосу, раптові фазові перетворення (замерзання переохолодженої рідини і конденсація пересиченої пари). Неможливість усунути хоч би частину цих явищ завжди робить процеси, що відбуваються в теплових і холодильних машинах, у тій чи іншій ступені незворотними.

Таким чином, оборотний процес необхідно розглядати як абстракцію, необхідну в якості стандарту для порівняння реальних незворотних процесів. Умовою оберненості термодинамічних процесів є безкінечна повільність їх проходження. Оборотний процес можна представити як сукупність рівноважних станів тіла.

Аналіз останніх досліджень. Роботи в області криогенних, близьких до абсолютного нуля, температур привели до надзвичайно цікавих здобутків, які значно розширюють уявлення про можливість практичного наближення до процесів, недалеких від оборотних. Прикладом криогенної рідини є гелій II, який отриманий із звичайного гелію I при його охолодженні від температури 4,21К (температура зрідження) до 2,19К.

Явища надтекучості, відкриті П.Л. Капицею, і теорія квантових рідин, розвинена Л.Д. Ландау, також як і властивості надпровідності, розглядаються як прояв практичної оборотності процесів, які відбуваються при близьких до абсолютного нуля температурах.

У техніці, з достатньою для інженерної практики точністю, процеси, які відбуваються в теплових і холодильних машинах, можна вважати оборотними, якщо зміни, що відбуваються у тілах під час прямого і зворотного їх проходження, порівнянно невеликі. У цьому випадку можна застосовувати виводи і співвідношення, отримані для ідеалізованих процесів, до реальних процесів. Такий підхід повністю виправдовується тим, що похибки при заміні реальних незворотних процесів ідеалізованими оборотними незначні, і тоді ці ідеалізовані процеси можна використовувати для інженерних розрахунків. Ясно, що між оборотними процесами, які розглядаються в термодинаміці, і реальними процесами (навіть якщо вони дуже близько задовольняють умови оборотності) існує принципова різниця.

Мета роботи. Розглянути умови оборотності у технічній термодинаміці та схеми теплоенергетичних установок.

Основна частина. Варто ще раз звернути увагу, що відкриття особливих властивостей квантових рідин зовсім не ставить під сумнів ту обставину, що реальні процеси, які відбуваються в теплоенергетичних установках, завжди у певній мірі незворотні.

Уявлення про оборотність процесів має першочергове значення у фізиці. Один з творців сучасної фізики М. Планк надавав питанню поділу процесів на оборотні і незворотні велику увагу [1]. У диференціальних рівняннях оборотних процесів, як указував М. Планк,

диференціал часу входить тільки в парній степені відповідно тій обставині, що знак часу може бути оберненим. “Це стосується в однаковій мірі і коливань маятника, електричним коливанням, акустичним і оптичним хвилям, до рухів матеріальних тіл і електронів, якщо тільки повністю відсутнє затухання”. Цю оборотність механічних рухів можна сформулювати як симетричність по відношенню до зміни знаку часу.

Якщо відбувається довільний тепловий процес, то процес, оборотний йому, тобто такий процес, за якого відбувається проходження через ті ж теплові стани, але тільки у зворотному порядку неможливий. Ми повернемося до цього головного для термодинаміки поняття про оборотність процесу нижче, після розгляду принципів термодинамічних схем теплової і холодильної установок, а також теплового насоса. Будемо по відношенню до кожної з них, а також до довільної комбінації з цих машин застосовувати загальний термін – теплоенергетична установка.

Принципові схеми теплоенергетичних установок Принципові схеми теплоенергетичних установок наведені на рис.1. Зазвичай при термодинамічному аналізі вважають, що у кожній теплоенергетичній установці робоче тіло C здійснює круговий процес, чи цикл.

У випадку роботи теплової машини (рис.1,а) різниця між теплотою Q_G , яка надається робочому тілу від джерела високої температури (тіло A на схемі), і теплотою Q_0 , що передається від робочого тіла середовищу (тіло B на схемі), перетворюється в механічну роботу L , тоді,

$$Q_G - Q_0 = L.$$

Ефективність роботи прямого циклу, який здійснюється в тепловій машині, характеризується відношенням яке називається термічним ККД циклу.

$$\eta_t = \frac{L}{Q_G}, \quad (1)$$

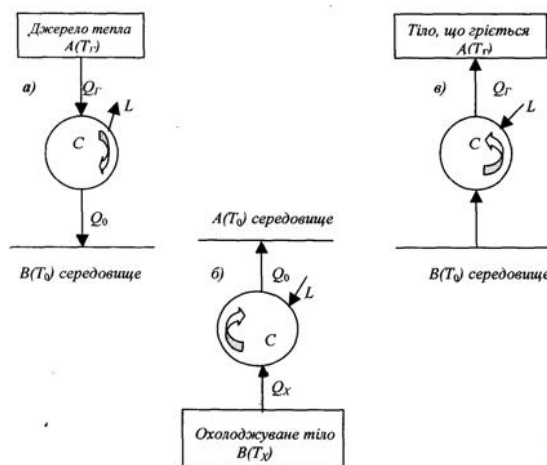


Рис.1. Принципові схеми теплоенергетичних установок: а – тепла машина; б – холодильна машина; в – тепловий.

Якщо машина передає теплоту від тіла B низької температури T_X (рис.1,б) до середовища A , яке має більш високу температуру T_0 , то робоче тіло повинно здійснювати зворотний круговий процес із затратою механічної роботи. Тепло Q_X у холодильній машині переноситься від холодного тіла B до оточуючого середовища A .

Механічна робота, отримана від зовнішніх тіл у вигляді теплоти віддається, разом з величиною Q_X , оточуючому середовищу. У цьому випадку кількість теплоти, що передається до середовища A , складається з двох частин Q_X і L . Тоді для прямого і зворотного циклів мають місце рівності:

$$Q_G = Q_0 + L; \quad Q_0 = Q_X + L,$$

де Q_G , Q_X , Q_0 і L беруться зі своїми абсолютними значеннями, без урахування прийнятого у термодинаміці правила знаків.

Ефективність роботи холодильної машини характеризується відношенням віднятої від холодного тіла теплоти (холоду) до затраченої механічної роботи. Це відношення називається холодильним коефіцієнтом зворотного циклу, рівне:

$$\varepsilon = \frac{Q_X}{L}. \quad (2)$$

Машина, яка віднімає теплоту із середовища і передає її тілу з температурою більш високою, ніж температура самого середовища, називається тепловим насосом. У тепловому насосі (рис.1,в) тіло, яке отримує теплоту Q_G , має більш високу температуру, ніж середовище, від якого віднімається теплота Q_0 . Розгляд схем, наведених на рис.1, приводить до висновку, що тепловий насос це не що інше, як обернена теплова машина.

Відмінність теплового насоса від холодильної машини криється в тому, що у першому – тіло A – обмежений простір, а тіло B – середовище, у той час як у холодильної машини тіло A – середовище, а тіло B – обмежений простір, в якому підтримується низька температура чи яке охолоджується.

Тому що призначенням теплового насоса є отримання тілом A теплоти Q_G , то ефект дії зворотного циклу у цьому випадку буде характеризуватися відношенням отриманої тілом A теплоти Q_G до затраченої ззовні і перетвореної в теплоту роботи, тобто

$$\varphi = \frac{Q_G}{L}. \quad (3)$$

Ця величина, що називається коефіцієнтом перетворення, завжди більша одиниці, тому що знаменник є частиною чисельника.

Повернемося до розгляду про оборотність процесів з метою уточнення цього поняття. На протязі оберненого процесу задовольня-

ється умова механічної і термічної рівноваги як всередині робочого тіла, так і при його взаємодії з іншими тілами.

У тому випадку, коли між робочим тілом (тіло C на рис.1) і джерелами теплоти (тіла A і B) передача теплоти здійснюється при нескінченно малих різницях температур, можна вважати, що задовольняється умова термічної рівноваги. Аналогічно цьому, якщо різниця тисків між робочим тілом і діючими на нього тілами зовнішнього середовища будуть нескінченно малі, процес можна вважати таким, що задовольняє умову механічної рівноваги.

У подальшому під терміном “оборотний процес” будемо розуміти такий процес, який хоч і не буде в повній мірі задовольняти умови механічної і термічної рівноваги, але буде незначно відрізнятися від оберненого. Така точка зору в інженерній практиці повністю виправдовує себе.

У подальшому необхідно уточнити, який дійсно процес необхідно розглядати, що мало відрізняється від оборотного. Зробити це дуже важливо, тому що тільки тоді стане можливим правильно класифікувати процеси на оборотні і незворотні. Ця класифікація, у свою чергу, важлива, тому що багато термодинамічних співвідношень і законів, справедлива для оборотних процесів, гублять свою силу для незворотних процесів.

Так, наприклад, важні властивості термодинамічних p , v - і T , s -діаграм, які криються у тім, що площі під лініями, які зображають процес, виражають відповідно величини роботи і теплоти, відносяться тільки до оборотних процесів і не можуть розповсюджуватися на незворотні процеси.

Ентропія і незворотність. Ключ до розв’язку питання про виявлення цієї важливої класифікації процесів на оборотні і незворотні лежить у застосуванні поняття ентропія.

Використовуючи для кругових процесів перший і другий початок термодинаміки, можна записати рівняння Гюї-Стодоли:

$$\Delta L = T_0 \Sigma \Delta S, \quad (4)$$

яке справедливе для прямих і зворотних циклів. Для прямих циклів величини, які входять в рівняння (4), позначають: ΔL – зменшення отриманої в прямому циклі роботи L , що відбувається у зв’язку з незворотністю процесів; T_0 – температура оточуючого середовища; $\Sigma \Delta S$ – сумарне прирощення ентропії всіх тіл, які беруть участь в процесах (тіл A , B і C на рис.1).

Тому що ентропія є функція стану тіла, то при круговому процесі, який відбувається з робочим тілом, його ентропія завжди прийме початкове значення і зміна ентропії дорівнює нулю. Отже, під сумарною зміною ентропії при здійсненні кругового процесу необхідно розуміти тільки зміну ентропії тіл A і B (джерел теплоти).

При розгляді збільшення ентропії, пов'язаного з незворотною процесів, зручно співставляти два цикли – оборотний і незворотний, в яких величини наданої робочому тілу теплоти Q_1 однакові.

По відношенню до оборотних кругових процесів, які відбуваються як в холодильній машині, так і в тепловому насосі, рівняння (4) необхідно формулювати наступним чином: збільшення затраченої в зворотному циклі роботи, пов'язаної з незворотною процесів, дорівнює добутку абсолютної температури середовища на сумарне прирощення ентропії системи. Користуватися рівнянням (4) при оцінці втрат, пов'язаних з незворотною процесів, можна тільки тоді, коли даний незворотний цикл порівнюється зі зворотним циклом, який має таку саму холодопродуктивність.

Розрахунок сумарного прирощення ентропії як в прямих, так і в зворотних циклах можна звести до визначення зміни ентропії тіл A і B при їх незворотному теплообміні з робочим тілом C . Особливо просто визначати зміну ентропії, яка відбувається під час незворотного теплообміну, у тому випадку, коли температури обох тіл зберігають постійні значення (теплообмін при кипінні чи конденсації).

Нехай температура тіла A , яке віддає теплоту, дорівнює T_A , а температура тіла B , яке сприймає теплоту, дорівнює T_B ; тоді при незворотній передачі кількості теплоти Q зменшення ентропії першого тіла буде дорівнювати Q/T_A , а збільшення ентропії другого складе Q/T_B . Отже, ентропія системи збільшиться на величину $\Sigma\Delta S$, рівну

$$\Sigma\Delta S = Q\left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A}\right).$$

Тому що під час теплообміну завжди $T_B < T_A$, то виходить

$$\Sigma\Delta S > 0. \quad (1)$$

Рівняння (4) дозволяє оцінити ступінь оборотності (чи, як кажуть, ступінь досконалості) кругових процесів і відповідно відносити цикли до оборотних чи незворотних.

У тих випадках, коли у круговому процесі величина ΔL дуже мала у порівнянні з роботою L , можна вважати цикл оборотним; якщо ж величина ΔL становить значну частку від роботи L , цикл необхідно відносити до групи незворотних.

Внутрішня і зовнішня незворотність. Під час аналізу теплоенергетичних установок зручно розрізняти два види незворотності процесів – незворотність внутрішню і незворотність зовнішню. Така класифікація процесів дозволяє правильно виявляти джерела енергетичних втрат у циклах і дає можливість шукати шляхи для їх усунення.

Якщо в процесі додержуються умови рівноваги всередині тіла, відсутнє внутрішнє тертя і дифузія, не відбувається змішування і хімічні реакції, то такий процес можна вважати внутрішньо оборотним. Умови

рівноваги всередині тіла приводять до того, що в кожній точці робочого тіла, у тому числі і на його границях, величини температур t і тисків p відрізняються одна від іншої на досить малі величини Δt і Δp .

При виконанні перерахованих умов з достатньою для інженерних розрахунків точністю можна вважати, що процеси внутрішньо оборотні. Для внутрішньо оборотного процесу зовсім не обов'язково виконання умов рівноваги між робочим тілом і навколишнім середовищем, тобто величини температур і тисків на границях робочого тіла можуть значно відрізнятись від температур і тисків тіл, які знаходяться з ним у взаємодії.

Такий процес, який задовольняє умови внутрішньої рівноваги (а також в якому відсутні всі перераховані вище джерела незворотності), але для якого не виконуються умови рівноваги між робочим тілом і зовнішніми тілами, які знаходяться з ним у взаємодії, називатимемо внутрішніми оберненими з зовнішнім незворотним процесом.

Якщо при оберненості всередині тіла виконуються також умови рівноваги між робочим тілом і джерелом теплоти, то такий процес є повністю оберненим.

Ще раз відмітимо, що під терміном “оборотний процес” варто розуміти такий процес, який з достатньою для інженерної практики точністю наближається до строго оборотного (з точки зору термодинаміки) процесу. Так само необхідно розуміти виконання умови рівноваги – у наближеному змісті.

Підсумовуючи все сказане, можна класифікувати термодинамічні процеси наступним чином:

1. Процеси повністю оборотні, тобто задовольняють умови внутрішньої і зовнішньої рівноваги.
2. Процеси внутрішньо оборотні, але зовнішньо незворотні.
3. Процеси внутрішньо незворотні, але зовнішньо оборотні.
4. Процеси незворотні як внутрішньо, так і зовнішньо.

Точно кажучи, усі без винятку реальні процеси, які відбуваються в машинах, є процесами четвертої групи, тому що в них відсутня як внутрішня, так і зовнішня рівновага – всі вони супроводжуються тертям. Але при термодинамічному аналізі можна використовувати і перші три групи процесів.

Відмітимо, що зовнішня незворотність процесів, найчастіше відбувається в машинах, внаслідок повільного розширення і стискання, такий процес можна розглядати як наслідок порушення тільки термічної рівноваги між джерелом теплоти і робочим тілом.

Під час термодинамічного аналізу різних теплотехнічних і холодильних пристроїв корисним є метод нарощування втрат. До одного з важливих елементів цього методу варто віднести розподіл втрат на внутрішні і зовнішні. Внутрішні втрати визначаються нерівноважніс-

тю в робочому тілі, тертям і дифузією, а зовнішні пов'язані з порушенням рівноваги між робочим тілом і джерелом теплоти і роботи. Ці втрати тісно пов'язані між собою, але внаслідок різних швидкостей поновлення внутрішньої і зовнішньої рівноваги з'являється можливість їх розділу.

Необхідно мати на увазі, що застосування термодинамічного аналізу і отримання необхідних наслідків із законів можливе тільки за чіткого виявлення границь, які відокремлюють робоче тіло від оточуючих його джерел. Уявлення про зовнішні і внутрішні джерела незворотності залежить від тих об'єктів, які включаються до цих границь.

Зовнішня незворотність, в загальному випадку, визначається термічною і механічною нерівноважністю на границях робочого тіла. Однак порушення механічної рівноваги при обміні роботою між джерелами і робочим тілом в широкому класі сучасних машин порівнянно мало впливає на втрати. Втрати можуть суттєво збільшуватися тільки у тих випадках, коли відносна швидкість робочих органів машини і робочого тіла порівнянно співрозмірні зі швидкістю звуку. Наявність механічних втрат у теплообмінних апаратах і в тракці машин може суттєво впливати на загальну ефективність установки, але ці втрати слід віднести до внутрішніх втрат, які змінюють характер проходження термодинамічних процесів, тим більш, що ці втрати викликані тертям, дифузією і розширенням елементів робочого тіла без відведення роботи. Отже, зовнішня незворотність у багатьох випадках може розглядатися тільки як результат порушення термічної рівноваги між робочим тілом і джерелом теплоти.

Внутрішні оборотні процеси можна уявити за допомогою термодинамічних діаграм у дійсному виді. Площі під кривими, які відтворюють такі процеси на p , v - і T , s -діаграмах відповідають кількості роботи і теплоти.

Інколи під час термодинамічного аналізу розглядаються процеси, які відносяться до третьої групи, тобто процеси, що задовольняють умови зовнішньої оборотності, при внутрішній незворотності. Так, наприклад, у холодильній техніці зазвичай в якості моделі розглядають цикл з дроселюванням робочого тіла, нехтуючи інколи незворотним теплообміном між робочим агентом і холодним джерелом.

Наведемо ще декілька прикладів, які пояснюють наведену класифікацію процесів. Зразковий цикл паросилових установок (цикл Ренкіна) з ізоентропним розширенням можна віднести до процесів другої групи, тобто до процесів з внутрішньою оборотністю, але із зовнішньою незворотністю. Теплообмін в котельних установках між продуктами згорання і киплячою водою є явним порушенням зовнішньої термічної рівноваги, тому що він відбувається при великих різницях температур між джерелом теплоти і робочим тілом. Цей процес не-

зворотного теплообміну відбувається у супроводі значного зростання ентропії системи і призводить до втрати можливої роботи у порівнянні з оборотним протіканням процесу. Не дивлячись на це порушення термічної рівноваги між робочим тілом і джерелом теплоти, у більшості випадків можна вважати, що процес внутрішньо оборотний, тому що всередині робочого тіла відхилення від рівноваги порівнянно незначне. До процесів другої групи під час термодинамічного аналізу варто віднести також зразкові цикли двигунів внутрішнього згорання, цикли газових турбін і зворотні газові цикли у холодильній техніці.

Прикладом внутрішньо незворотного процесу, в якому дотримуються умови рівноваги між робочим тілом і зовнішнім джерелом, може служити процес вибуху у достатньо надійно ізольованому об'ємі. Теплообмін робочого тіла з обмежуючим середовищем може відбуватися трохи сповільнено, при цьому можна знехтувати малою кількістю незворотної переданої теплоти і вважати процес зовнішньо оборотним. У цьому прикладі ізоляція відноситься нами до зовнішнього об'єкту, який взаємодіє з робочим тілом.

Аналіз дії обмежуючого середовища (чи джерел) на робоче тіло має велике значення. Саме поняття теплоти припускає наявність такої взаємодії, тому що теплообмін у термодинаміці розглядається як форма передачі енергії від середовища до робочого тіла чи навпаки – від робочого тіла до оточуючого середовища внаслідок наявності різниці температур.

Поняття незворотності безпосередньо пов'язане з величиною ентальпії. Процес вважається незворотним, якщо він приводить до збільшення ентропії всієї ізольованої системи, яка складається з джерела теплоти, робочих тіл і оточуючого середовища.

Згідно введеному Клаузіусом поняття ентропії її величина вимірюється за допомогою зворотного процесу, у цьому і криється, як вказував М. Планк, трудність сприйняття цього поняття.

У багатьох випадках доцільно розчленити зміну ентропії на дві складові – одну, пов'язану з теплообміном розглядуваного тіла чи групи тіл з джерелами теплоти, і другу, таку що залежить тільки від внутрішньо незворотних процесів, які відбуваються всередині самих тіл.

Розглядувана нами класифікація термодинамічних процесів повністю відповідає наведеній нижче трактовці ентропії.

Якщо через $dS \geq dQ/T^*$ позначити повну елементарну зміну ентропії, а через dS' і dS_i відповідно зміну ентропії, зв'язану із зовнішнім обміном енергії і такої, що викликана внутрішньою незворотною, то матиме місце рівність

$$dS = dS' + dS_i.$$

Другий доданок правої частини цього рівняння ніколи не може бути від'ємною величиною і тільки для внутрішньо оборотних процесів цей доданок дорівнює нулю.

Висновок. Можна сказати, що дійсно ця складова ентропії привела Релея до важливого співвідношення, яке привело в подальшому до розвитку термодинаміки незворотних процесів. Бажаючи оцінити за час τ швидкість деградації працездатності системи, в якій здійснюються внутрішні незворотні процеси, він ввів наступну функцію:

$$\Phi = \frac{TdS_i}{d\tau}.$$

Ця функція може тлумачитися як характеристика швидкості дисипації вільної енергії системи. У сучасній термодинаміці нерівноважних процесів величина dS_i і швидкість її зміни знайшли широке застосування.

Література.

1. Планк М. Единство физической картины мира./ М. Планк. -М.: Наука, 1966. – 340 с.

ОБОРОТНОСТЬ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Ломейко О.П., Кулинченко В.Р.

Аннотация

Рассматриваются условия обратности в технической термодинамике и схемы теплоэнергетических установок для осуществления круговых процессов, анализируется понятие энтропии, как ключа для определения внутренней и внешней обратности и необратимости процессов.

REVERSIBILITY OF THERMODYNAMIC PROCESSES

A. Lomeiko, V. Kulinchenko

Summary

The terms of reversibility in engineering thermodynamics and circuits of heat-and-power engineering installations for cyclic processes are concerned, the concept of entropy is analyzed as a key for determining of internal and external reversibility and irreversibility of processes.