

۱۹-۶، تحول ایزوکور (حجم پایا) Isochoric process

هرگاه تحولی چنان صورت پذیرد که حجم دستگاه در حین انجام آن تغییر نکند، تحول را ایزوکور یا حجم پایا مینامند، ازدیاد دما و فشار جسمی که درون ظرفی با حجم ثابت قرار دارد و گرما دریافت میکند نمونه‌ای از تحول ایزوکور است. وقتی حجم تغییر نکند کار انجام شده صفر است و بنابراین اصل اول:

$$Q = U_2 - U_1 \quad (\text{تحول ایزوکور})$$

و گرمای دریافتی جسم، کلاً صرف افزایش انرژی داخلی آن میشود. افزایش سریع دما و فشار گاز و هوا در مرحله انفجار سوخت در موتورهای بنزینی را ممکن است نمونه‌ای از تحول ایزوکور بحساب آورد.

۱۹-۷، تحول ایزوترم

تحول ایزوترم، در دمای ثابت صورت می‌پذیرد. برای اینکه دمای جسمی ثابت ماند و سایر مختصات آن تغییر کند، لازم است تحول بکندی صورت گیرد و گرما بتدریج از دستگاه گرفته یا بآن داده شود. بطور کلی هیچیک از مقادیر Q و W و $U_2 - U_1$ صفر نیستند. دو جسم ایده‌آلی وجود دارد که انرژی داخلی آنها فقط تابع دما است. یکی گازهای کامل و دیگری بلورهای اجسام پارامانیتیک ایده‌آلی. وقتی دمای این دو جسم ایده‌آلی تغییر نکند انرژی داخلی آنها نیز ثابت است یعنی:

$$Q = W \quad (\text{تحول ایزوترم})$$

۱۹-۸، تحول ایزوبار (فشار پایا)

هرگاه تحولی در فشار ثابت صورت پذیرد آنرا تحول ایزوبار مینامند. آبی که وارد دیگ بخار شده گرم شده و سپس بجوش می‌آید و بالاخره بخار حاصله نیز داغ میشود. همه مراحل این تحول در فشار ثابت صورت می‌پذیرد. این تحول، هم در مهندسی مکانیک و هم در شیمی دارای اهمیت است.

فرض کنیم m گرم آزمایی در فشار و دمای ثابت تبخیر شود. هرگاه V_1 و V_2 بترتیب حجم جسم در حالت مایع و بخار باشد، کار انجام شده در این تحول با فشار ثابت p برابر:

$$W = p(V_2 - V_1)$$

است و هر واحد جرم از جسم گرمایی برابر گرمای نهان تبخیر، دریافت میدارد. بنابراین.

$$Q = mL$$

و بنابر اصل اول ترمودینامیک خواهیم داشت :

$$mL = (U_V - U_L) + P(V_V - V_L) \quad (4-19)$$

مثال ۱- یک گرم آب (1 cm^3) پس از آنکه در فشار یک اتموسفر جوشید و به بخار تبدیل شد 1671 cm^3 بخار از آن بدست میآید. گرمای نهان تبخیر در این دما 539 cal/gm است. کار خارجی و افزایش انرژی داخلی را حساب کنید.

$$W = p(V_V - V_L) = 1/0.13 \times 10^6 \text{ dynes/cm}^2 (1671 - 1) \text{ cm}^3 = \\ = 1/695 \times 10^6 \text{ ergs} = 169/5 \text{ J} = 41 \text{ cal}$$

واژ فرمول ۴-۱۹ داریم :

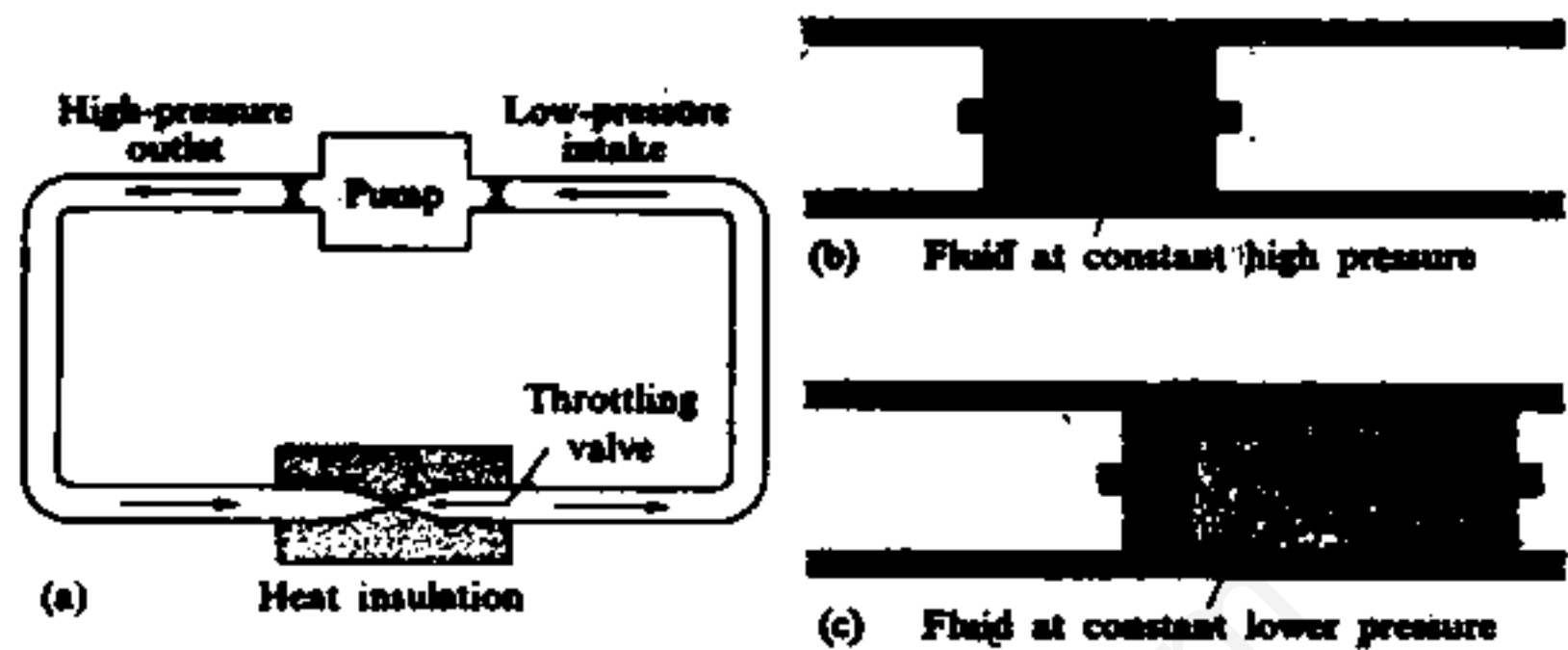
$$U_V - U_L = mL - W = 539 - 41 = 498 \text{ cal}$$

یعنی از ۵۳۹ کالری ۱۴۰ کالری بصورت کار خارجی بخارج منتقل شده ۴۹۸ کالری باقی مانده بصورت انرژی داخلی در بخار ذخیره میشود.

۹-۱۹ ، خفکان Throttling process

خفکان تحولی است که در آن سیالی که معمولاً با فشار زیاد و ثابتی در جریان است، پس از عبور از جسم متخلخل یا لوله و یا منفذ نازکی وارد محفظه دیگر با فشار کمتر شده در حین عبور آن هیچگونه مبادله گرمایی صورت نگیرد. گاهی اوقات، تحول را «عبور از جسم متخلخل» نیز مینامند. شکل ۴-۱۹ (a) در تفهیم تحول، بما کمک میکند. سیالی با فشار زیاد از پمپی خارج شده سپس از شیر «خفکان آور» **Throttling valve** عبور کرده وارد مدخل پمپ که فشار آن کم است میشود. هر ذره سیال، در حین عبور از مسیر حتماً دچار خفکان خواهد شد.

قسمتی از گاز را که بین پیستین و شیر خفکان آور قرار دارد در نظر بگیرید. [شکل ۴-۱۹ (b)] فرض کنید این پیستین بطرف راست حرکت میکند. همچنین فرض کنید که، در طرف دیگر شیر پیستین دیگری وجود دارد (وجود این پیستین کاملاً فرضی است. مترجم) و آن نیز بطرف راست حرکت میکند. فشار در طرف پیستین دوم کم و هر دو ثابت اند. وقتی تمام سیال بطرف راست منتقل شد، دستگاه بوضع شکل ۴-۱۹ (c) درمیآید.



شکل ۱۹-۲ خفکان

اندازه کار کل برابر تفاضل کار انجام شده در دو طرف شیر است هر گاه فرض کنیم:

$p_1 =$ فشار زیاد (سمت چپ)

$V_1 =$ حجم سیال وقتی فشار آن زیاد است

$p_2 =$ فشار کم (سمت راست)

$V_2 =$ حجم سیال وقتی فشار آن کم است

باشد، حجم سیال کم فشار (که فشار آن p_2 است) از صفر تا V_2 تغییر کرده و حجم سیال پرفشار (که فشار آن p_1 است) از V_1 تا صفر تغییر میکند، داریم:

کار در طرفی که فشار آن کم است $p_2(V_2 - 0) =$

کار در طرفی که فشار آن زیاد است $p_1(0 - V_1) =$

و قدر مطلق کار انجام شده برابر است با:

$$W = p_2 V_2 - p_1 V_1$$

چون تحول بطور آدیاباتیکی صورت گرفته یعنی با خارج مبادله گرما نکرده است.

بنابراین میتوان نوشت:

$$0 = U_2 - U_1 + (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

و یا:

$$U_1 + p_1 V_1 = U_2 + p_2 V_2 \quad (5-19)$$

فرمول فوق در ساختمان یخچالها و ماشینهای گرمائی نقش مهمی را بعهده دارد.

$U + pV$ را انتالیپی نامیده اند آنرا برای بخار آب و موادی که در ساختمان یخچال مورد استفاده قرار میگیرند در جدولها ثبت کرده اند. خفکان، در عمل یخچالها نقش اساسی را برعهده دارد چه این تحول، باعث سقوط دما بمیزانی که در یخچال و ماشینهای

یخ سازی لازم است میشود. مایعاتی که در آستانه تبخیر هستند (مایعات اشباع) در هنگام خفکان ، قسمتی بخار شده و دمای آنها بمقدار قابل ملاحظه ای پائین میآید . گازها در این نوع تحول ، ممکن است سرد یا گرم شوند برحسب اینکه دما و فشار اولیه و نیز فشار ثانویه آنها چقدر باشد.

۱۹-۱۰ ، اصل اول ترمودینامیک بصورت دیفرانسیل

تاکنون اصل اول ترمودینامیک را فقط بصورت زیر فرموله کرده ایم :

$$Q = U_2 - U_1 + W$$

فرمول فوق مبین این است که اختلاف فشار و حجم و دما بین دو حالت (۱) و (۲) مقادیر قابل ملاحظه و محدودی است. فرض کنیم وضع (۱) و (۲) فاصله زیادی از هم نداشته باشند. بنابراین هرگاه در این تحول ، dQ گرمای مبادله شده و dW کار انجام شده باشد ، dU تغییر انرژی نیز بسیار کوچک خواهد بود. در اینحال خواهیم داشت :

$$dQ = dU + dW \quad (۶-۱۹)$$

هرگاه تحول دستگاه طوری باشد که کار ، در نتیجه تراکم یا انبساط صورت گیرد در اینصورت داریم $dW = pdV$ و از آنجا داریم :

$$dQ = dU + pdV \quad (۷-۱۹)$$

فرمول بالا را صورت دیفرانسیلی اصل اول ترمودینامیک مینامند که در مورد گازها ، مایعات و جامدات صادق است .

۱۸-۱۱ ، انرژی داخلی گازها

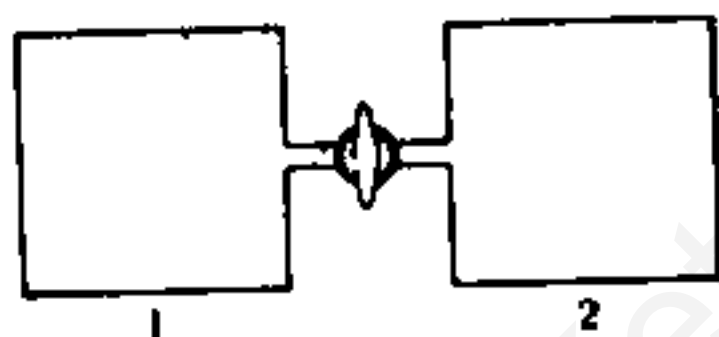
ظرفی بادیواره صلب و عایق را در نظر بگیرید که با جداری بدو قسمت تقسیم شده باشد. فرض کنید یک قسمت از ظرف ، از هوا خالی و در قسمت دیگر گازی با فشار و دمای معین پر است. هرگاه دیواره را برداریم و دو قسمت ظرف بهم مربوط شود ، گاز منبسط شده تمام ظرف را پر میکند ، این انبساط را انبساط آزاد مینامند . در سال ۱۸۴۳ ژول پس از تجربیات طولانی و پرهزحمت توانست باین سؤال جواب دهد که آیا انبساط آزاد ، اثری در تغییر

دمای گاز دارد یا نه ، اگر دارد آنرا چگونه تغییر میدهد. بیاسی زحمات ژول ، اثر انبساط آزاد در تغییر دمای يك گاز را اثر ژول مینامند .

باین دلیل باید بدانیم که انبساط آزاد ، چه نوع اثری بر دمای گاز دارد ؛ که این مسئله با انرژی داخلی گاز ، ارتباط پیدایی کند. مثلا اگر دما در حین انبساط آزاد جسم تغییر کند باید قبول کرد که انرژی داخلی ، تابع حجم و دما یا تابع فشار دماست و فقط تابع دما نیست. هر گاه برعکس ، T در انبساط آزاد ، ثابت بماند. چون در این انبساط ، انرژی داخلی تغییر نمیکند نتیجه میشود که انرژی داخلی فقط تابع دماست در آزمایش ژول دو ظرف مطابق شکل ۱۹-۵ بالوله شیرداری بهم وصل و مجموعه ، درون آب قرار میگیرد . یکی از دو ظرف ، خلاء و دیگری از هوا با فشار زیاد پر است. دمای آب را قبل از باز کردن شیر و بعد از آن ، اندازه میگیرند.

هر گاه دمای گاز تغییر کند باید دمای آب

نیز تغییر کند . در آزمایش ژول ظرفیت گرمایی آب و ظرف در حدود چند هزارم ظرفیت گرمایی هوا بوده است. بنابراین ژول قادر نبود تغییر دمای در آب مشاهده کند در حالیکه امروزه معلوم شده است که دمای آب چند درجه ای تغییر میکند. نکته جالب این است که هیچکس درباره انبساط آزاد گاز نتوانسته است تحقیقی بانجام برساند که مورد



شکل ۱۹-۵ انبساط آزاد گاز در ظرف خلاء

انتقاد قرار نگرفته باشد. روشهای دیگر نشان داده اند که انرژی داخلی گازهای حقیقی تابع فشار و حجم و نیز تابع دماست. بستگی انرژی داخلی با حجم و فشار چندان زیاد نیست در حالی که با تغییر دما ، انرژی داخلی تغییر فاحش میکند در اینجا تعریف گاز کامل را تکمیل کرده میگوئیم :

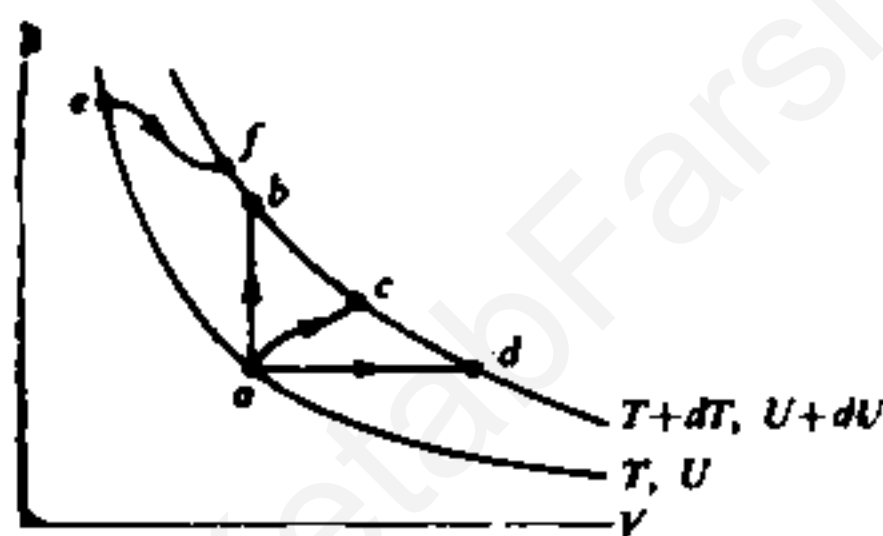
انرژی داخلی گاز کامل فقط تابع دمای آن است.

۱۹-۱۲ ، گرمای ویژه گاز کامل

دمای يك جسم را تحت شرایط مختلف میتوان افزایش داد . مثلا ممکن است ، حجم یا فشار آنرا ثابت نگاهدارند و با آنها را بطرق مختلف دیگر تغییر دهند. در هر يك از این حالات مقدار گرمایی که دمای يك ملکول گرم از گاز را یکدرجه سلزیوس افزایش میدهد متفاوت است. در عمل فقط دو مقدار از مقادیر مذکور یعنی ، گرمای ویژه در فشار ثابت و در حجم

ثابت مورد استفاده است. بین این دو گرمای ویژه در گازهای کامل، رابطه ساده ولی مهم وجود دارد.

در شکل ۶-۱۹ دو منحنی برای تحول ایزوترم گاز کاملی در دماهای T و $T+dT$ رسم شده است. چون انرژی داخلی گاز کامل، فقط تابع دماست؛ پس اگر دما ثابت باشد انرژی داخلی نیز ثابت و منحنی‌های انرژی داخلی ثابت هستند لذا اندازه انرژی داخلی روی منحنی ایزوترم T مقدار ثابت U را دارا خواهد بود و بر منحنی $T+dT$ نیز اندازه آن $U+dU$ میباشد. بنابراین تغییر انرژی داخلی گاز، از هر نقطه از ایزوترم T به نقطه از ایزوترم $T+dT$ مقدار است ثابت. پس اندازه dU برای کلیه تحولات ab و ac و ad و ef شکل ۶-۱۹ یکسان است.



شکل ۶-۱۹ تغییر انرژی داخلی تار کامل برای کلیه تحولات که بین دو دما صورت میگیرد، مقدار است ثابت

تحول ab را که در حجم ثابت صورت گرفته است در نظر بگیرید. برای انجام چنین تحولی، فرض کنیم گاز در ظرفی با دیواره های صلب قرار دارد و با چشمه ای که دمای آن کمی بیش از دمای گاز و برابر $T+dT$ است در تماس باشد. گرمای dQ بگاز منتقل میشود و بنابراین تعریف گرمای ویژه در حجم ثابت، میتوان نوشت:

$$dQ = nC_v dT \quad (۸-۱۹)$$

در ضمن انجام این تحول، فشار گاز افزایش می یابد ولی کار انجام نمیشود چه حجم ثابت است. با استفاده از صورت دیفرانسیلی اصل اول میتوان نوشت:

$$dU = dQ - dW$$

و خواهیم داشت:

$$dU = nC_v dT \quad (۹-۱۹)$$

اما dU برای کلیه تحولات انجام شده بین دو دمای T و $T+dT$ مقدار است

ثابت حتی اگر این تحولات در حجم ثابت صورت گرفته باشند .

سپس تحول فشار ثابت pd شکل ۱۹-۶ را در نظر میگیریم: فرض کنیم دردمای T گازی بدون سیلندری قرار دارد. بر روی آن پیستنی قرار گرفته که بر آن فشار خارجی ثابتی وارد میشود و پیستن میتواند آزادانه جلو یا عقب برود . هر گاه گاز را در مجاورت چشمه‌ای با دمای $T + dT$ قرار دهیم گرما از چشمه بگاز منتقل شده کار نیز انجام میشود . بنابراین تعریف گرمای ویژه در فشار ثابت میتوان نوشت :

$$dQ = nC_p dT$$

و کار انجام شده برابر است با :

$$dW = pdV$$

اما از معادله مشخصه گاز کامل میتوان p را (که در این تحول مقدار ثابتی است) استخراج کرده نوشت :

$$pV = nRT \quad \text{و} \quad pdV = nRdT$$

بنابراین خواهیم داشت :

$$dW = nRdT$$

و بنا بر اصل اول مینویسیم :

$$dU = dQ - dW$$

$$nC_v dT = nC_p dT - nRdT$$

و یا :

$$C_p - C_v = R$$

(۱۹-۱۰)

یعنی گرمای ویژه ملکولی گاز کامل در فشار ثابت ، باندازه R ، بیشتر از گرمای ویژه این گاز در حجم ثابت است . در اینجا باید R نیز بر حسب واحدهائی که در بخش C_p و C_v بکار میروند یعنی $\text{cal/mole}^\circ\text{C}$ سنجیده شود قبلا در قسمت ۱۸-۲ دیدیم که $R = 1.987 \text{ cal/mole}^\circ\text{C}$ است .

با وجود اینکه فرمول ۱۹-۱۰ برای گاز کامل بدست آمد میندازد آنرا برای گازهای حقیقی ، در فشار کم ، بکار برد . در جدول ۱۹-۱ مقادیر گرمای ویژه C_p و C_v

جدول ۱۹-۱ گرمای ویژه ملکولی گازها در فشار کم

نوع گاز	فرمول	C_p بر حسب cal/moleC°	C_v بر حسب cal/moleC°	$C_p - C_v$	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$
یک اتمی	He	۴/۹۷	۲/۹۸	۱/۹۹	۱/۶۷
	Λ	۴/۹۷	۲/۹۸	۱/۹۹	۱/۶۷
دو اتمی	H _۲	۶/۸۷	۴/۸۸	۱/۹۹	۱/۴۱
	N _۲	۶/۹۵	۴/۹۶	۱/۹۹	۱/۴۰
	O _۲	۷/۰۳	۵/۰۴	۱/۹۹	۱/۴۰
	CO	۶/۹۷	۴/۹۸	۱/۹۹	۱/۴۰
چند اتمی	SO _۲	۸/۸۳	۶/۸۰	۲/۰۴	۱/۲۹
	SO _۲	۹/۶۵	۷/۵۰	۲/۱۵	۱/۲۹
	SiH _۴	۸/۲۷	۶/۱	۲/۱	۱/۳۴

و نیز تفاضل $C_p - C_v$ ثبت شده است. ملاحظه میکنیم که برای اکثر گازهای حقیقی $C_p - C_v$ برابر ۱/۹۹ کالری بر ملکول گرم درجه سلسزیوس است. در ستون آخر جدول ۱۹-۱ نسبت $\frac{C_p}{C_v}$ ثبت شده است که با حرف یونانی γ نشان داده میشود. ملاحظه میکنیم که γ برای گازهای یک اتمی برابر ۱/۶۷ و برای گازهای دو اتمی ۱/۴۰ است. اما برای گازهای چند اتمی، اندازه γ تابع قاعده ساده‌ای نیست. مایعات و جامدات نیز در هنگام گرم شدن، انبساط یافته کار انجام میدهند. چون ضریب انبساط حجمی مایعات و جامدات، به مراتب کمتر از گازهاست؛ کار انجام شده در انبساط مایعات و جامدات، به مراتب کمتر از گازها میباشد. انرژی داخلی مایعات و جامدات تابع حجم یا فشار میباشد و این، عامل پیدایش تفاوت اساسی بین گرمای ویژه مایعات و جامدات، با گازها میباشد. مسلماً در اینجا نیز $C_p > C_v$ است. تفاضل این دو، کوچک و بیان علت آن، به مراتب پیچیده تر از گازهاست. در موقع گرم شدن اجسام جامد و مایع، در آنها تنش زیادی بوجود آمده مانع از انبساط آنها میگردد. به همین دلیل فشار

مؤثر بر اجسام جامد و مایع ، در حین گرم شدن ، اکثراً ثابت است و گرمای ویژه این اجسام را که در جداول ثبت کرده اند ، میتوان گرمای ویژه با فشار ثابت دانست.

۱۹-۱۳ ، تحول آدیاباتیك گاز كامل

هر تحولی را که در آن، دستگاه با محیط خارج مبادله گرما نکند تحول آدیاباتیك مینامند. برای اینکه تحول آدیاباتیك در دستگاهی صورت گیرد باید جسم با دیواره عایقی پوشانیده و یا همواره دمای محیط را در طول تحول ، بادمای دستگاه ، یکسان نگاهداشت. همچنین اگر گازی را سریعاً متراکم یا منبسط کنیم چون گرمای مبادله شده با محیط، کم و ناچیز است، تحول را میتوان تقریباً آدیاباتیك پنداشت. بنابراین تراکم مخلوط سوخت و هوا در موتور های بنزینی ، تقریباً تراکم آدیاباتیك است. ممکن است در تحول آدیاباتیك کار خارجی بر روی دستگاه یا وسیله آن انجام شود و دما نیز در این تحول ، تغییر میکند.

هرگاه گاز كاملی تحول آدیاباتیك بینهایت کوچکی پیدا کند خواهیم داشت :

$$dQ = 0 \text{ و } dU = nC_v dT \text{ و } dW = pdV \text{ و بنا بر اصل اول :}$$

$$nC_v dT = -pdV \quad (۱۹-۱۱)$$

و با استفاده از معادله مشخصه گاز كامل میتوان نوشت :

$$pdV + Vdp = nRdT$$

از حذف dT بین این دو رابطه خواهیم داشت :

$$\frac{dp}{p} + \frac{C_p}{C_v} \frac{dV}{V} = 0$$

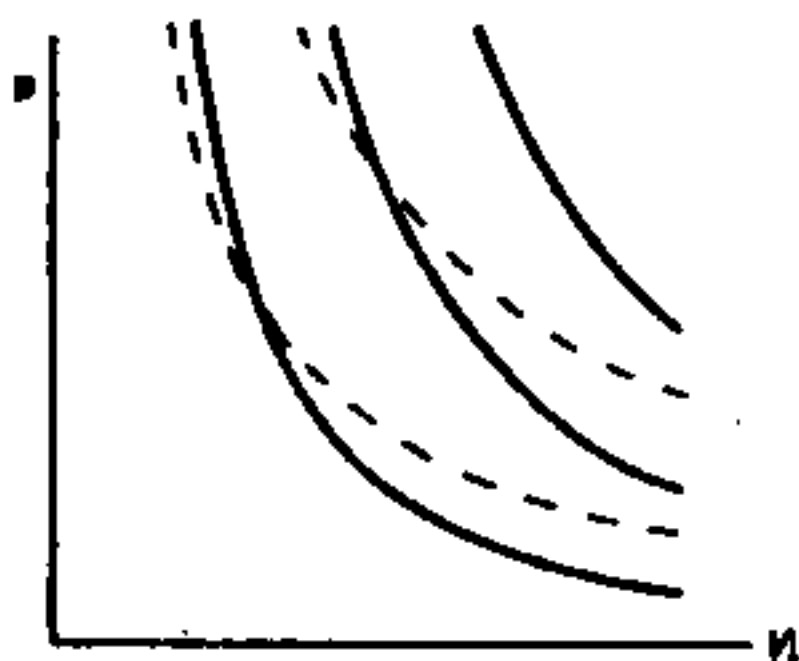
و چون C_p/C_v را با γ نشان داده ایم خواهیم داشت :

$$\frac{dp}{p} + \gamma \frac{dV}{V} = 0$$

برای بدست آوردن رابطه ای بین p و V در يك تحول آدیاباتیك که در فاصله محدودی صورت گرفته است انتگرال رابطه بالا را حساب میکنیم :

$$\ln p + \gamma \ln V = \ln (\text{ثابت})$$

$$pV^\gamma = (ct)$$



شکل ۱۹-۷ منحنی های پ-ر ، تحول آدیاباتیکی و منحنی های خط یون تحول ایزوترم را نشان میدهد.

هر گاه (۱) و (۲) را دو وضع معین تحول فوق فرض کنیم میتوان چنین نوشت :

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \quad (۱۲-۱۹)$$

بمنوان تمرین فرمول ۱۹-۱۳ را معادله مشخصه گازهای کامل ، حل کرده دو فرمول زیر را برای تحول آدیاباتیکی گاز کامل نتیجه بگیرید .

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \quad (۱۳-۱۹)$$

$$T_1 p_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_2 p_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad (۱۴-۱۹)$$

γ نسبت گرماهای ویژه چند گاز ، در جدول ۱۹-۱ ثبت شده است .

تحول آدیاباتیکی را میتوان ، مانند شکل ۱۲-۱۹ بارشم منحنی نشان داد. در شکل ۱۹-۷ نیز چند تحول ایزوترم با منحنی نشان داده شده است . چنانکه از شکل ۱۹-۷ پیداست ، شیب منحنی ایزوترم در یک نقطه معین ، کمتر از شیب منحنی آدیاباتیکی در آن نقطه است. یعنی اگر بر منحنی آدیاباتیکی از راست بچپ پیش برویم (تراکم آدیاباتیکی) مرتباً منحنی های ایزوترمی را قطع میکنیم که دمای آنها افزایش مییابد و واضح است که تراکم آدیاباتیکی ، با افزایش دما توأم است.

با استفاده از فرمول ۱۹-۱۱ کار انجام شده در تحول آدیاباتیکی را ذیلا حساب میکنیم:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{T_1}^{T_2} n C_v dT \quad (۱۵-۱۹)$$

اندازه کار را میتوان با محاسبه هر یک از انتگرال های فوق بدست آورد. ابتدا $\int p dV$ را

حساب میکنیم چون داریم: $p V^\gamma = p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma = K$ پس میتوان نوشت :

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = K \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\gamma} = \frac{1}{1-\gamma} (K V_2^{\gamma-1} - K V_1^{\gamma-1})$$

وهرگام بجای K مقدار آن یعنی $P_2 V_2$ یا $P_1 V_1$ را (بترتیب در دو جمله سمت چپ و راست) قرار دهیم داریم :

$$W = \frac{P_2 V_2 + P_1 V_1}{1 - \gamma} \quad (16-19)$$

با این فرمول، میتوان کار انجام شده را بر حسب حجم و فشار ابتدایی و انتهایی تحول بدست آورد. هرگام دمای اولیه و ثانویه معلوم باشد با استفاده از فرمول ۱۹-۱۵ می توان نوشت :

$$W = \int_{T_1}^{T_2} -nC_v dT = nC_v(T_1 - T_2)$$

مثال- نسبت تراکم در یک موتور دیزل $V_1/V_2 = 15$ است. هوای درون سیلندر در ابتدا فشار 15 lb/in^2 و دمای 10°F (که معادل 520°R است) دارد. دما و فشار را در انتهای تراکم حساب کنید. هوای گاز کامل، تراکم را آدیاباتیك و $\gamma = 1/4$ فرض کنید.

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma$$

$$\log P_2 = \log P_1 + \gamma \log \left(\frac{V_1}{V_2} \right) = \log 15 + 1/4 \log 15$$

$$P_2 = 662 \text{ lb/in}^2$$

اینک میتوان دما را با کمک فرمول ۱۹-۱۳ و یا ۱۹-۴ و یا بالاخره از فرمول گازهای کامل بدست آورد. از فرمول ۱۹-۱۳ استفاده میکنیم :

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$\begin{aligned} \log T_2 &= \log T_1 + (\gamma - 1) \log \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \\ &= \log 520 + (1/4 - 1) \log 15 \end{aligned}$$

$$T_2 = 1525^{\circ}\text{R} = 1075^{\circ}\text{F}$$

$$T_2 = T_1 \times \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = 520 \times \frac{662 \times 1}{15 \times 15} = 1525^{\circ}\text{R} \quad \text{و یا:}$$

کار انجام شده درحین تراکم را چنین پیدا میکنیم . فرض کنیم حجم اولیه 60 in^3 باشد. از فرمول ۱۹-۱۶ داریم :

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - \gamma}$$

هرگاه فشار را بر حسب lb/ft^2 و حجم را بر حسب ft^3 در فرمول قرار دهیم خواهیم داشت :

$$W = \frac{(662 \times 144) \left(\frac{1}{1728} \right) - (5 \times 144) \left(\frac{60}{1728} \right)}{1 - 1/30} = -365 \text{ ft} \cdot \text{lb}$$

۱۹-۱۶ ، تبدیل گرما بکار

مهمترین مشخصه يك جامعه صنعتی این است که بتواند منابع انرژی غیر از ماهیچه های انسان و حیوانات ، دست یافته از آنها در انجام کارهای مورد نظر خود استفاده کند . بجز انرژی آب آبخارها و سدها که میتوان مستقیماً از آنها انرژی مکانیکی بدست آورد ؛ عموم منابع انرژی موجود در طبیعت بصورت انرژی پتانسیل ذخیره شده در ملکولها یا هسته ها است . در فعل و انفعالات شیمیایی یا هسته ای ، قسمتی از این انرژی ، آزاد شده بصورت انرژی جنبشی ملکولها و اتمهای يك جسم درمیآید و در اینحال ، دمای جسم ، فوق العاده بالا میرود . از این فعل و انفعالات میتوان گرما بدست آورد و در گرم کردن منازل ، کوره ها ، پختن غذا و ... استفاده نمود . اما برای ساختن ماشینی که بتواند وسیله نقلیه ای را به حرکت درآورد ، یا برای پرتاب پرتابه ، انرژی مکانیکی لازم است . در اینجا وظیفه يك مهندس مکانیک این است که دستگاهی بسازد که بتواند انرژی گرمایی را از منبع گرمی (که دمای آن خیلی بالاست) گرفته ، هر چه ممکن است ، قسمت بیشتری از آنرا به انرژی مکانیکی تبدیل کند .

دستگاهی که بتواند چنین وظیفه ای را انجام دهد ماشین گرمایی نامیده میشود . ماشین و توربین بخار ، موتور بنزینی و موتور دیزل و جت نمونه هایی از این ماشینهای گرمایی هستند . آنچه مورد نظر ماست ، کارو گرما و تبدیل آنها بیکدیگر است . بنابراین

فرض میکنیم ماده‌ای که کار انجام میدهد، تحولات دورهای داشته باشد یعنی پس از چند تحول، دوباره بوضع اول برگردد و تحولات را عیناً مثل قبل، تکرار کند. در ماشین و توربین‌های بخار، ماده انجام دهنده کار، آب مقطر است. و تحولات آن بطور منظم تکرار میشود. ابتدا آب دردیگ، بخار شده بدما و فشار زیاد میرسد، سپس در ماشین یا توربین منبسط شده کار انجام میدهد. پس از آن در دستگاه چکالنده از آن گرما گرفته شده مجدداً بآب تبدیل میشود و وارد دیگ شده همین تحولات را از نو آغاز میکند. ماده انجام دهنده کار در یخچال‌های خانگی نیز تحول دورهای دارد. موتورهای درونسوز و ماشینهای بخار لکوموتیوها تحول کاملاً دورهای ندارند ولی طرز کار آنها نیز با فرض تحول دورهای قابل بیان است. همه این دستگاه‌ها از چشمه گرم (بادمای زیاد) گرما دریافت میدارند، مقداری کار مکانیکی انجام میدهند و بالاخره بچشمه سردی که دمای آن پائین است گرما میدهند. وقتی در دستگاهی تحولات دورهای صورت می‌پذیرد (اصطلاحاً گوئیم، دستگاه یکدوره یا یک سیکل را طی میکنند) در ابتدای سیکل و انتهای آن، انرژی داخلی آن یکسان است و بنابراین اصل اول فرموده می‌گردد برای یک یا چند سیکل متوالی همان نوشت:

$$U_2 - U_1 = 0 = Q - W$$

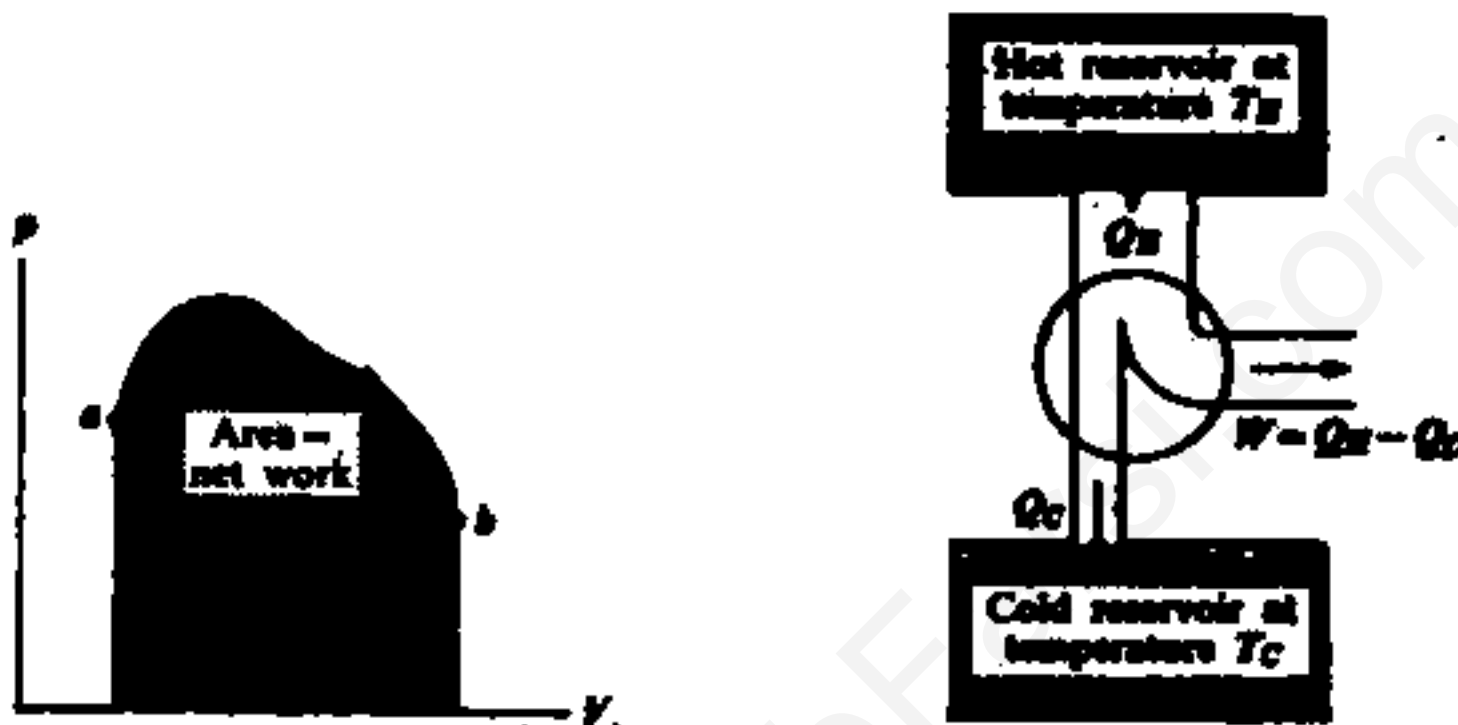
$$Q = W$$

یعنی قدر مطلق کار انجام شده در یک ماشین در هر سیکل، برابر قدر مطلق گرمائی است که ماشین در این سیکل دریافت میکند.

هرگاه منحنی‌های تحولاتی را که در هر سیکل انجام میشود در صفحه مختصات pV رسم کنیم سطح محصور درون منحنی مسدودیکه باین طریق رسم میشود، برابر قدر مطلق کار انجام شده در هر سیکل است. مثلاً در شکل ۱۹-۸ سطح زیر نیمه بالائی منحنی از a تا b نشان دهنده کار مثبتی است که دستگاه در حین انبساط، انجام میدهد، سطح زیر نیمه پائینی منحنی از b تا a نشان دهنده کار منفی انجام شده بر روی دستگاه، در حین تراکم است. چون اندازه متوسط فشار در حین تراکم، همیشه کمتر از فشار متوسط در حین انبساط است، لذا قدر مطلق کار انجام شده مثبت خواهد بود. هرگاه همین سیکل در خلاف جهت گردش عقربه ساعت تکرار شود کار انجام شده در سیکل، کلاً منفی خواهد بود.

در کار یخچال و ماشین، همیشه دو جسم وجود دارد که مقادیر زیادی گرما گرفته یا میدهند بدون اینکه دمای آنها تغییر کند. مثلاً شعله‌ای که در کوره یک دیگ بخار میسوزد مقدار قابل ملاحظه‌ای گرما از دست میدهد ولی دمای آن همیشه بالاست. ما آن را چشمه گرم مینامیم. گرمائی که از چشمه گرم به ماده انجام دهنده کار وارد میشود مثبت است

(در ماشین) دما آنرا به Q_H نمایش میدهیم . (در اینجا کلمات «گرم» و «سرد» مفاهیم نسبی دارند) هرگاه ماشین بخار مذکور در این مثال درون يك كفتی باشد ، آب دریا چشمه سرد است زیرا میتواند مقدار هنگفتی گرما دریافت داشته تغییر دمای محسوس نیز پیدا نکند. گرمایی را که چشمه سرد دریافت میکند و منفی است ، با Q_C نشان داده میشود



شکل ۱۹-۹ ، نمایش شماتیک طرز کار يك ماشین گرمایی

شکل ۱۹-۸ ، سطح محصور درون منحنی در تحولات دوره‌ای ، برابر قدممطلق کار انجام شده در هر سیکل است .

شکل ۱۹-۹ شمای انتقال گرما را در يك ماشین گرمایی نشان میدهد . ماشین در این شکل بایک دایره نشان داده شده است . مقدار گرمای Q_H که از چشمه گرم وارد ماشین میشود با عرض نواری که در شکل ، معرف آنست ، متناسب فرض شده است . همچنین عرض نواری که معرف گرمای خروجی است متناسب با Q_C رسم شده است . ستون پهلوی سمت راست ، گرمایی است که ماشین آنرا بکار مکانیکی تبدیل کرده است . فرض کنیم ماشینی با تحولات دوره‌ای متوالی کار میکند و Q_H و Q_C گرمای مبادله شده با چشمه‌های گرم و سرد در هر سیکل است . قدممطلق گرمای مبادله شده

$$Q = Q_H + Q_C \quad (19-18)$$

است که در آن Q_C عددی است منفی . کار مفیدی که توسط ماشین انجام میشود W است که توسط ماده انجام دهنده کار انجام میشود و بنا بر اصل اول داریم :

$$W = Q = Q_H + Q_C \quad (19-19)$$

گرمای گرفته شده از چشمه گرم ، از سوختن سوخت بدست میاید . گرمایی که بچشمه سرد داده میشود ارزش اقتصادی ندارد . بازده گرمایی يك سیکل عبارت است نسبت کار مفید

انجام شده در هر سیکل ، به گرمای دریافتی دستگاه در آن سیکل است (نسبت آنچه میگیرید به آنچه درازاه آن میپردازید) .

$$\text{بازده گرمایی} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H + Q_C}{Q_H} \quad (19-20)$$

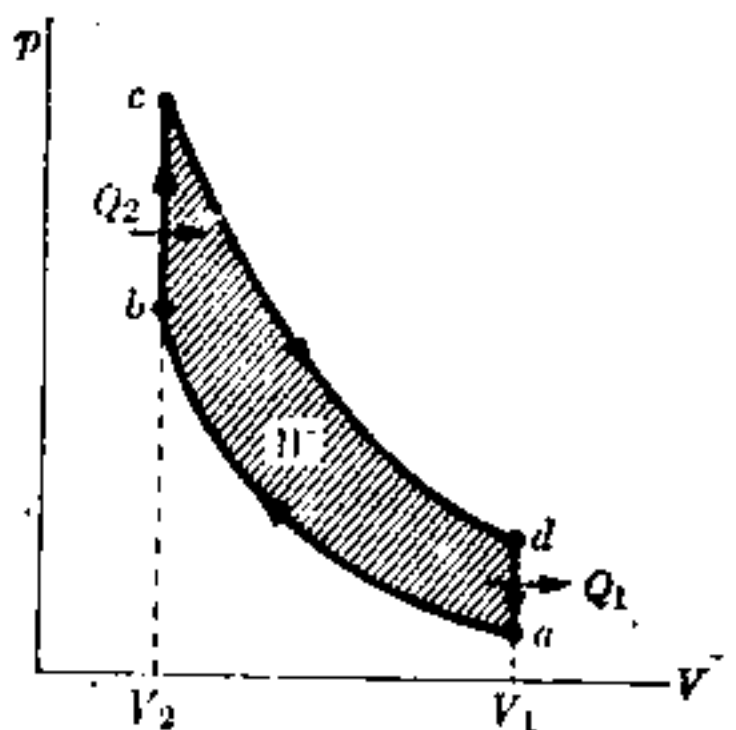
بعلت وجود افت اصطکاک ، همیشه کار مفید ماشین از W کار سیکل و بارده کل ماشین از بازده گرمایی آن کمتر است .

از شکل ۱۹-۶ چنین استنباط میشود که کارآمدترین موتورها موتوری است که بازاه مقدار معین گرمای وارده بماشین (نوار قائم بالا) کار انجام شده توسط آن (نوار عرضی سمت راست) هرچه ممکن است بیشتر و گرمایی که بچشمه سرد وارد میشود تا حد امکان کمتر باشد (نوار پائینی)

اینک بدون اینکه وارد تفصیلات مکانیکی ونحوه ساختمان آنها شویم ؛ ساختمان موتور بنزینی ، موتور دیزل و ماشین بخار را مورد بحث قرار دهیم .

۱۹-۱۵ ، موتور بنزینی

معمولا موتورهای بنزینی ، چهار هنگام هستند و از این جهت با این نام نامیده شده اند که سیکل آنها شامل چهار مرحله است . وقتی پیستن در بالاترین نقطه مسیر و آماده شروع کار است . ابتدای مرحله اول فرض میشود . پیستن پائین رفته مخلوط هوا و بنزین را بداخل سلیندر می کشد . (مرحله مکش) سوپاپ ورودی باز و سوپاپ خروج بسته است . در انتهای این مرحله ، وقتی پیستن پائین ترین نقطه مسیر رسید سوپاپ ورودی نیز بسته میشود . پیستن بالا رفته مخلوط قابل انفجار هوا و بنزین را متراکم میکند



شکل ۱۹-۱۰ . دیاگرام pV سیکل اوپو

(مرحله تراکم) . کمی پیش از آنکه پیستن بانتهای بالائی مسیر خود برسد ، جرقه الکتریکی ایجاد شده مخلوط هوا و سوخت را منفجر میکند . (انفجار) دما و فشار در حجم ثابت ، بالا میرود .

پیستن در اثر فشار حاصله از انبساط گازهای سوخته شده ، که بطور آدیاباتیکی صورت میگیرد پائین میرود . (مرحله انجام کار) و بالاخره هنگام بالا آمدن پیستن ، سوپاپ خروجی باز شده گازهای سوخته شده خارج میشود . (مرحله خروج) فشار درون سلیندر ناگهان کاهش یافته بفشار جو میرسد .

سپس سوپاپ خروجی نیز در انتهای این مرحله بسته شده سیکل بعدی آغاز میشود .
 دیاگرام pV سیکل otto که سیکل تقریبی موتور بنزینی است ، در شکل ۱۹-۱۰ نشان داده شده است . روی شکل ، a معرف لحظه ای است که هوا و سوخت وارد سیلندر شده و پیستن در لحظه شروع مرحله تراکم است . فشار در این لحظه برابر فشار جو است . مخلوط مذکور بطور آدیاباتیکی از a تا b متراکم میشود . سپس در حجم ثابت ، تا نقطه c گرم میشود ، بطور آدیاباتیکی تا نقطه d انبساط می یابد و در حجم ثابت ، تا نقطه a سرد شده ، سیکل بعدی آغاز میشود . ab نشان دهنده مرحله تراکم ، bc نشان دهنده لحظه انفجار ، dc مرحله انجام کار و da مرحله خروج گاز است . V_1 و V_2 به ترتیب ماکزیمم و می نیمم حجم مخلوط هوا و سوخت ، در داخل سیلندر است . $\frac{V_1}{V_2}$ را نسبت تراکم مینامند و در موتورهای بنزینی معمولی در حدود ۱۰ است .

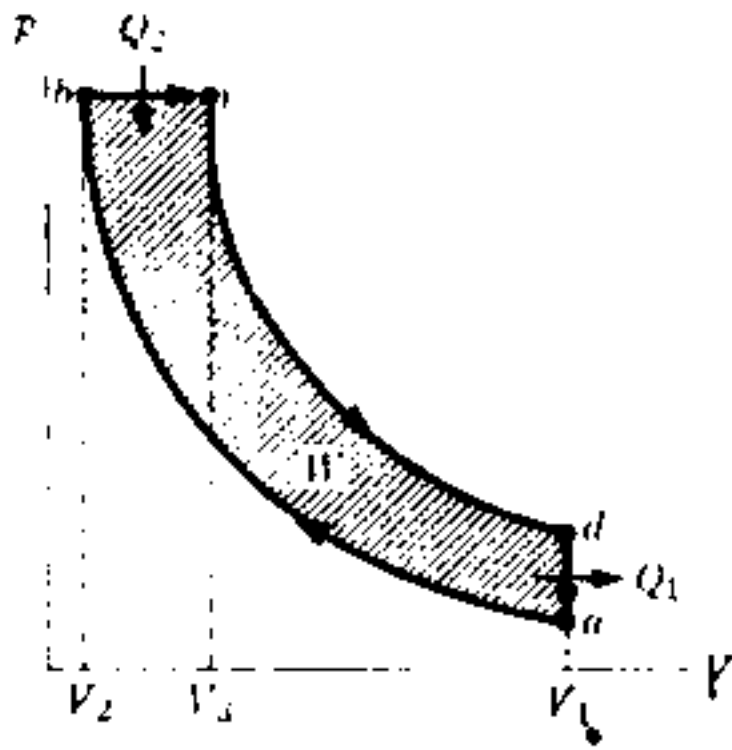
سطح هاشور خورده $abcd a$ معرف کار انجام شده در هر سیکل است . گرمای Q_p در امتداد خطوط bc وارد موتور میشود ، حجم در این مدت ثابت است . گرمای خروجی در امتداد خط da از موتور خارج میشود . در دو تحول آدیاباتیکی ab و cd گرمایی با خارج مبادله نمیشود .
 گرمای دریافتی و کار انجام شده را میتوان بر حسب نسبت تراکم بدست آورد . هوا را گاز کامل فرض میکنیم ، نتیجه محاسبات ، چنین است :

$$\text{Eff}(\%) = 100 \left(1 - \frac{1}{(V_1/V_2)^{\gamma-1}} \right)$$

در این فرمول γ نسبت گرمای ویژه گاز در فشار ثابت به گرمای ویژه گاز در حجم ثابت یعنی $\frac{C_p}{C_v}$ است . هر گاه نسبت تراکم ۱۰ و $\gamma = 1.4$ باشد ، بازده ۶۰٪ است . اما باید توجه داشت که از اثر اصطکاک ، آشفتنگی حرکت گاز در داخل سیلندر و انتقال گرما از دیواره سیلندر صرف نظر شده است . همه این عوامل باعث کاهش بازده میشود و عدد فوق ، بازده واقعی نیست .

۱۹-۱۶ ، موتور دیزل

در موتور دیزل ، هوای خالص بدون سیلندر مکیده شده سپس متراکم میشود . در اثر تراکم ، فشار و دمای آن بالا میرود و سوختی که در انتهای این مرحله بصورت گرد ، وارد سیلندر میشود میسوزد و احتیاجی بتولید جرقه ندارد . عمل احتراق بسرعتی



شکل ۱۹-۱۱ ، دیاگرام pV سیکل دیزل

که در ماشین های انفجاری انجام میشود ، صورت نمی گیرد و زمان احتراق در موتور دیزل بیشتر است و قسمت اول مرحله احتراق ، در فشار ثابت صورت می پذیرد. بقیه مرحله احتراق ، انبساط آدیاباتیکی است . سپس مرحله خروج گاز شروع میشود و با پایان آن ، سیکل نیز پایان یافته است .

شکل ۱۹-۱۱ سیکل ایده آلی دیزل را نشان میدهد . از a تا b مرحله تراکم آدیاباتیکی هوای متراکم شده میسوزد و آنرا با فشار ثابت ، انبساط میدهد و سپس از c و d انبساط آدیاباتیکی صورت

میگیرد و بالاخره از d تا a مرحله سرد شدن در حجم ثابت است .

چون در موتور دیزل ، مخلوط سوخت و هوا وارد موتور نمیشود میتوان هوا را تا میزان زیادی متراکم کرد بدون اینکه خطر شروع احتراق پیش از موعد وجود داشته باشد

یعنی $\frac{V_1}{V_2}$ آن بیشتر از موتورهای بنزینی است . عدد معمول آن ۱۵ است . نسبت انبساط

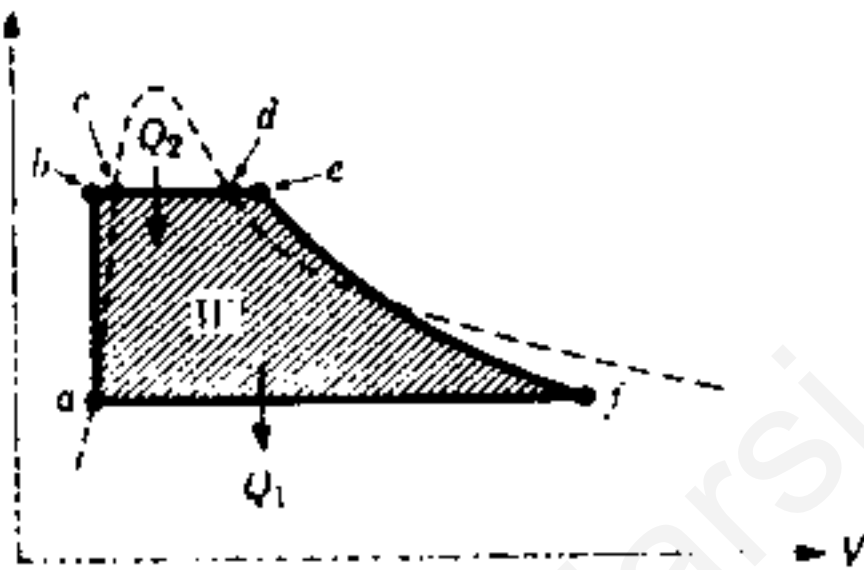
$\frac{V_1}{V_2}$ در حدود ۵ است .

هرگاه $\gamma = 1/4$ و هوا گاز کامل فرض شود بازده سیکل دیزل در حدود ۵۶٪ است.

۱۷-۱۹ ، ماشین بخار

در ماشین های بخاری که دارای چکالنده هستند بترتیب ، اعمال زیر صورت میگیرد آب در دیگ: بخار شده بخار گرم میشود تا دمای آن بدمائی بالاتر از دمای دیگ برسد. بخار داغ را سیلندر هدایت میکنند تا در اثر انبساط آن پیستن بحرکت درآید . در قسمت اول مرحله انجام کار ، ارتباط سیلندر با دیگ برقرار است و در تمام مدت ، فشار ثابت بر پیستن اثر میکند . سپس دریچه ورود بخار بسته شده انبساط ، بطور آدیاباتیکی صورت میگیرد در اثر انبساط آدیاباتیکی ، بخار سرد شده قسمتی از آن به مایع تبدیل و بخار به بخار مرطوب تبدیل میشود . وقتی پیستن شروع به برگشت کرد دریچه خروج باز شده ، بخار مرطوب بداخل چکالنده رانده میشود . در آنجا بقیه بخار نیز مایع تبدیل شده ، آب حاصل به دیگ بر میگردد و سیکل ، مجدداً تکرار میشود

در شکل ۱۹-۱۲ سیکل ایده آلی ماشین بخار بطور تقریبی رسم شده است. از نقطه a تا b آب با فشاری برابر فشار دیگ بخار آدیاباتیکی بداخل دیگ رانده میشود سپس آنرا با فشار ثابت تا نقطه جوش، گرم میکنند (خط bc)؛ بعد به بخار تبدیل میشود (خط cd) و بخار با گرفتن گرما، داغ میشود (خط de) بعد انبساط آدیاباتیکی در آن، صورت میگیرد (خط ef) و بالاخره خنک شده مجدداً بمایع تبدیل میشود (خط fa).



شکل ۱۹-۱۲، سیکل رانکین

بازده این سیکل را نیز مانند مثالهای قبل میتوان حساب کرد. باید گرمایی که آب میگیرد و نیز گرمایی که بخارج پس میدهد (در امتداد خطوط be و fa) محاسبه شود فرض کنیم دیگی بخار مرطوب را با دمای $417^\circ F$ (فشار در این دما برابر با 30 lb/in^2) است تولید و سپس آنرا $63^\circ F$ داغ تر میکند (یعنی دمای آن به $480^\circ F$ میرسد) و دمای چگالنده $102^\circ F$ فرض شود. بازده سیکل رانکین در حدود ۳۲٪ است. بازده واقعی ماشین بخار، مسلماً از این رقم کمتر است.

۱۸-۱۹، اصل دوم ترمودینامیک

هیچیک از ماشینهای گرمایی بازده ۱۰۰٪ ندارد یعنی نمیتواند همه گرمایی دریافتی را بکار تبدیل کند. در بیان اصل اول ترمودینامیک، چنین عدم امکانی پیش بینی نشده است در اصل اول فقط این نکته تأکید شده است که انرژی گرمایی که در یک ماشین بکار تبدیل میشود برابر است با تفاضل گرمایی که ماده انجام دهنده کار، دریافت کرده و پس میدهد بنابراین اصل اول، ممکن است موتوری وجود داشته باشد که گرما بخارج پس ندهد و تمام گرمای دریافتی را بکار تبدیل میکند.

اینک متوجه میشویم که اصل دیگری، مستقل از اصل اول (که از اصل اول نتیجه نمیشود) وجود دارد که بکمک آن، ما کزیموم کسری از گرمای دریافتی دستگاه را که بکار مکانیکی میشود میتوان محاسبه نمود. پایه این اصل بر وجود اختلاف بین انرژی داخلی و انرژی مکانیکی

است. انرژی داخلی در حقیقت، انرژی جنبشی ملکولها در حرکت اتفاقی آنهاست در حالیکه انرژی مکانیکی، انرژی جنبشی ملکولها در حرکت منظم آنها میباشد. مثلاً هر گاه جسمی در حرکت است، آنچه بظاهر می بینیم، همه ملکولهای آن در جهت معینی حرکت میکنند. انرژی جنبشی ملکولها در این حرکت را انرژی مکانیکی مینامیم. اما همین ملکولها در داخل جسم نیز دارای حرکت نامنظم و اتفاقی هستند. انرژی جنبشی این حرکات نامنظم، انرژی داخلی جسم است. وقتی جسم، در اثر برخورد غیرالاستیک، بحال سکون درمیآید انرژی جنبشی ملکولها در حرکت منظم جسم، به انرژی جنبشی و پتانسیل، در حرکت اتفاقی تبدیل میشود. نمیتوانیم حرکت هر یک از ملکولها را بطور جداگانه بطور کامل کنترل کنیم. بنابراین نمیتوانیم همه انرژی جنبشی ملکول را در حرکت اتفاقی، به انرژی جنبشی در حرکت منظم، تبدیل کنیم. فقط قادر خواهیم بود که قسمتی از انرژی داخلی را به انرژی مکانیکی، تبدیل نمائیم.

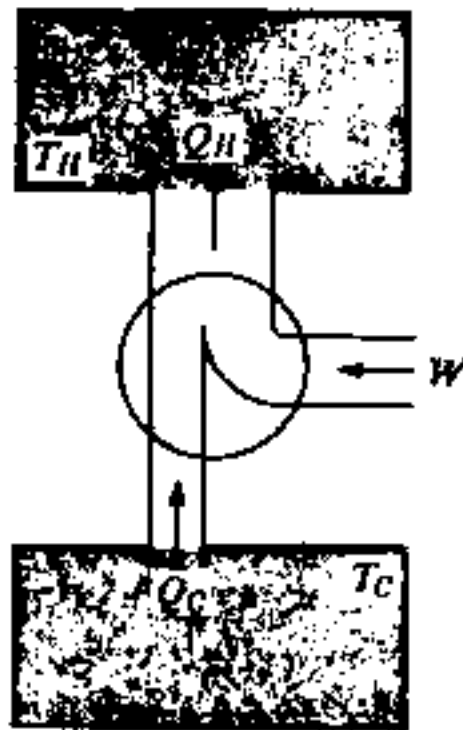
علم ترمودینامیک فقط درباره کمیات قابل سنجش نظیر گرما و کار بحث میکند. اصل دوم ترمودینامیک را نیز میتوان بدون استفاده از قوانین حرکت ملکولها و نظریه ملکولی ماده بیان نمود. این اصل بصورت زیر بیان میشود: هیچ ماشینی نمیتواند گرما را از یک چشمه گرفته تمام آنرا بکار مکانیکی تبدیل کند.

هر گاه اصل دوم صحیح نبود، میبایست بتوان یک کشتی را در دریا با بحرکت درآورد بطوریکه انرژی لازم برای حرکت خود را از آب دریا بگیرد و یا وسائط نقلیه دیگر، برای ادامه حرکت، از هوا گرما گرفته بکار تبدیل کند. باید توجه داشت که هیچیک از عدم امکانهای فوق الذکر، با اصل اول ترمودینامیک میانیت ندارند، در هوای آتمسفر و آب اقیانوس مقادیر عظیمی گرما وجود دارد که میتوان با ایجاد جریان گرمائی، قسمتی از این گرما را از آنها گرفت. اصل دوم ترمودینامیک متناقض اصل اول نیست بلکه اصلی است مستقل و مبین واقعیتی از واقعیات طبیعت، که با واقعیت بیان شده توسط اصل اول، متمایزاند. اصل اول امکان بوجود آمدن یا از بین رفتن انرژی را نفی میکند در حالیکه اصل دوم، امکان استفاده از تمام انرژی را بطریق خاص، نفی مینماید.

این واقعیت، که کار میتواند کلاً بگرمای تبدیل شود ولی گرما نمیتواند کلاً بکار مکانیکی بدل گردد، یکی از اصول برگشت ناپذیری طبیعت باید شمرده شود. همه تحولاتی را که در طبیعت اتفاق می افتد میتوان با استفاده از اصل دوم ترمودینامیک مورد تفسیر قرار داد و در هر حال، برگشت ناپذیری یا یکطرفه بودن این تحولات، آشکار میشود. یعنی مثلاً گرما خود بخود از جسم گرم بجسم سرد منتقل میشود. گازها خود بخود از ظرفی که فشار آن بیشتر است بظرفی که فشار آن کمتر است منتقل میشوند. دو مایع یا دو گاز، همیشه باهم مخلوط میشوند و هیچگاه مخلوط دو گاز از هم جدا نمیشوند. نمک در آب حل میشود ولی محلول آب نمک، به نمک جامد و آب خالص تبدیل نمیشود.

سنگها به قطعات خرد شده بگرد تبدیل میشوند، آهن زنگ میزند، همه این تحولات، که تحولات برگشت ناپذیر هستند همیشه بطوریکطرفه و یک جهت انجام میشوند و مؤید صحت اصل دوم ترمودینامیک میباشد.

۱۹-۱۹ ، یخچال



شکل ۱۹-۱۳ نمای شماتیک جریان گرما در یخچال

دستگاه کار انجام میدهد و هوای خارج چشمه گرم است. در شکل ۱۳-۱۹ دیاگرام جریان گرما را در یخچال نشان میدهد. در یک سیکل، Q_C از چشمه سرد (بادمای T_C) وارد یخچال شده Q_H به چشمه گرم (بادمای T_H) که بیشتر از T_C است) منتقل میشود. کار W نیز بر روی یخچال انجام میشود. W و Q_H منفی هستند از اصل اول نتیجه میشود.

$$-Q_H = Q_C - W$$

گرمایی که به چشمه گرم داده میشود مجموع گرمای دریافتی از چشمه سرد و گرمای معادل کار دریافتی یخچال است.

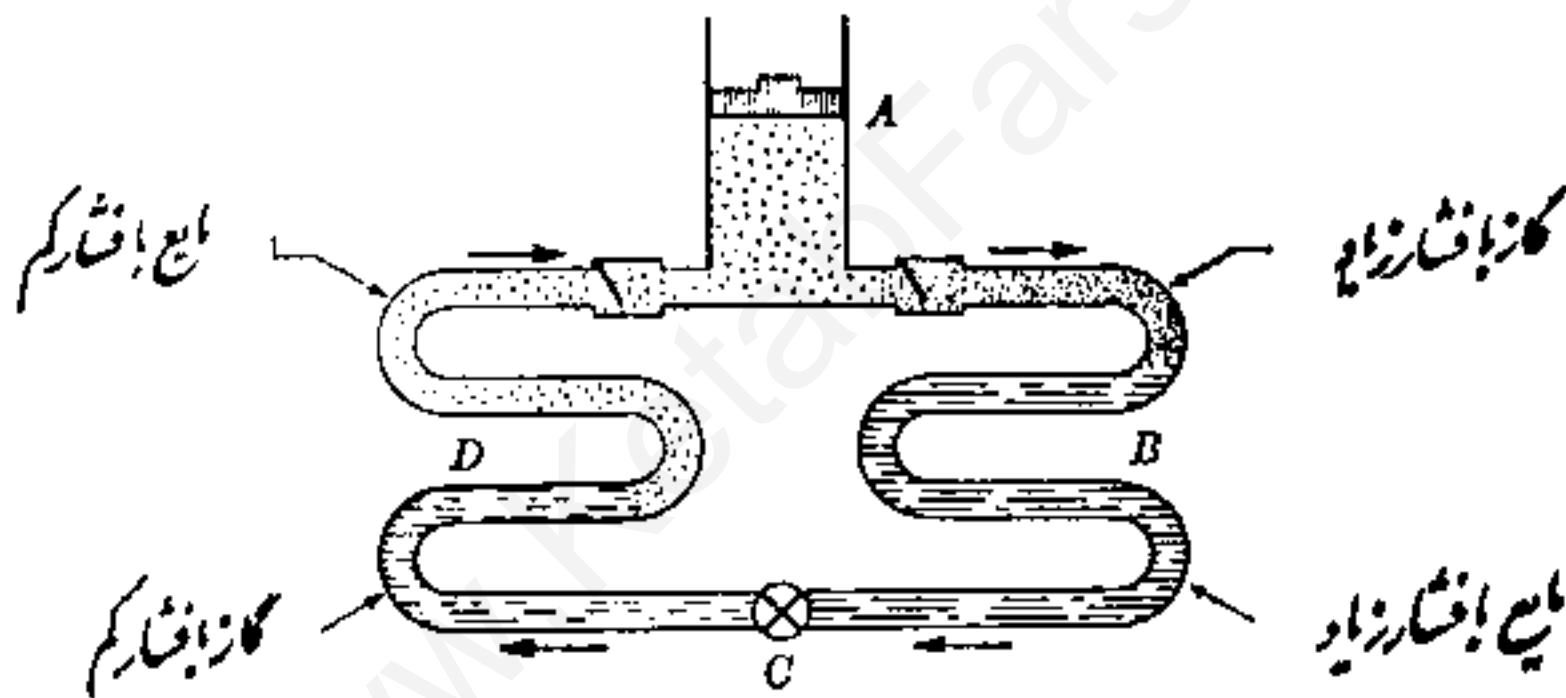
یخچالی از نظر اقتصادی بر دیگر یخچالها مزیت دارد با صرف کار W کمتر، Q_C بیشتری از چشمه سرد، دریافت دارد. بنابراین این در یخچال، بجای بازده، ضریب عمل

coefficient of performance را که عبارت از $-\frac{Q_C}{W}$ تعریف میکنند و گویند

هر یخچالی ضریب عمل بیشتری داشته باشد بهتر است. چون در یخچال $W = Q_H + Q_C$ است، پس خواهیم داشت:

$$\boxed{\text{ضریب عمل} = -\frac{Q_C}{Q_H + Q_C}} \quad (۱۹-۲۱)$$

در شکل ۱۹-۱۴ طرز کار یک یخچال ، نشان داده شده است . کمپرسور A گاز را (NH_3 یا CCl_2F_2 و غیره) با فشار زیاد و دمای بالا ، وارد لوله مارپیچی B میکند . در B گرما از گاز گرفته میشود (بکمک آب یا هوا) در نتیجه، گاز مایع تبدیل میشود (تحت اثر فشار زیاد) مایع که تحت اثر فشار زیاد است ، از شیر C که شیر انبساط ده یا شیر خفقاں آور **throttling valve** است عبور میکند و به مخلوطی از بخار و مایع ، بادمای کم تبدیل میشود . در لوله مارپیچی D گرما به مخلوط مایع و بخار داده میشود و بقیه مایع را به بخار تبدیل میکند . بخار مذکور ، وارد کمپرسور A شده سیکل مجدداً تکرار میشود . در یخچال های خانگی ، لوله مارپیچی D در اطراف قالب های یخ قرار میگیرد . بنابراین داخل یخچال ، مستقیماً توسط مارپیچی خنک میشود . در کارخانه های یخ سازی ، لوله (I) در آب نمک نسبتاً غلیظی قرار دارد . آب نمک بدور قالب های یخ گردش کرده گرما از آنها دریافت نموده بلوله D میدهد .



شکل ۱۹-۱۴ اساس یخچال

هر گاه برای عمل خنک کردن یخچال ، کار مکانیکی مصرف نمیشد ، ضریب عمل (نسبت گرمای و دریافتی به کار مصرفی) بینهایت میشود . ضریب عمل یخچال های معمولی ، بین ۲ و ۶ است . تجربه نشان میدهد که در هر حال ، انتقال گرما از چشمه سرد به چشمه گرم ، با صرف کار ، توأم است . و این صورت دیگری از بیان اصل دوم ترمودینامیک است که بصورت زیر بیان میشود :

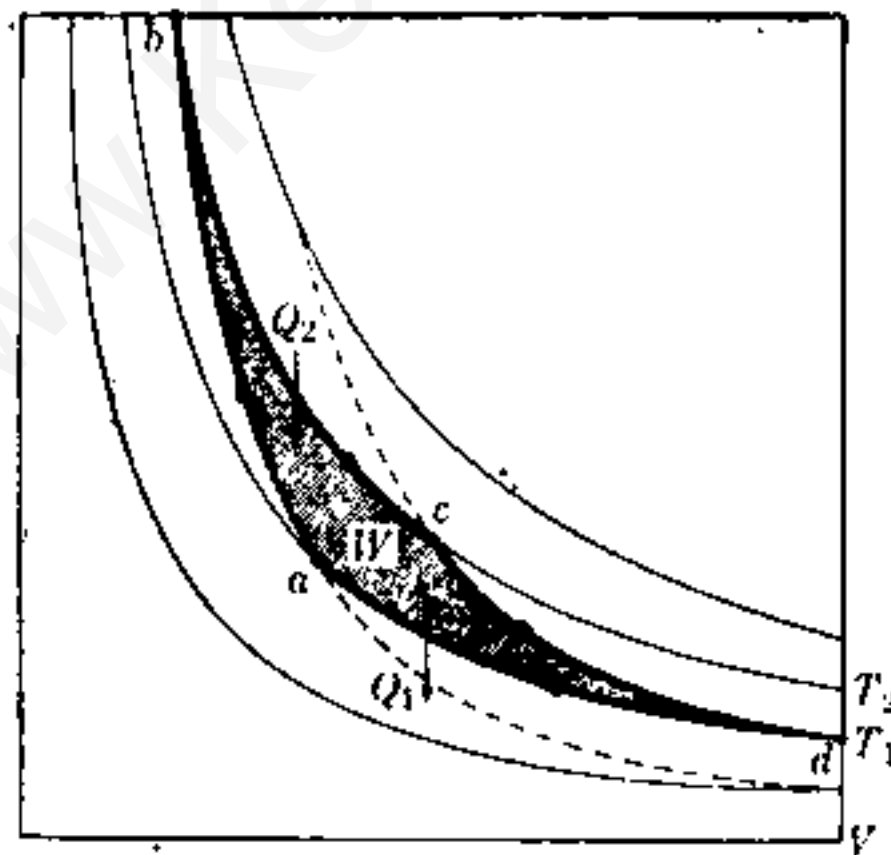
ممکن نیست تحولی صورت پذیرد که نتیجه مطلق آن ، فقط انتقال گرما از یک جسم سرد بیک جسم گرم باشد .

در ابتدا چنین بنظر میآید که بین دو بیان مذکور برای اصل دوم ترمودینامیک رابطه ای وجود ندارد . ولی میتوان نشان داد که هر دو بیان مذکور ، هم ارز یکدیگر اند . هر دستگاه فرضی که نتیجه تحول آن باینکی از بیان های مذکور میانیت داشته باشد ، با دیگری نیز مغایرت خواهد داشت .

۱۹-۲۰، سیکل کارنو

با آنکه بازده سیکل‌های مختلفی که مورد بحث قرار گرفت با یکدیگر متفاوت است، بازده هیچیک از آنها ۱۰۰٪ نیست. باید باین سؤال جواب داده شود که، هرگاه چند سیکل با دو چشمه سرد و گرم معین و ارتباط داشته باشد، بازده ماکزیموم متعلق به کدام سیکل است؟ سیکل ایده‌آلی را که دارای بازده ماکزیموم باشد، اولین بار سادی کارنو Sadi Carnot در ۱۸۲۴ اختراع نمود و به همین جهت آنرا سیکل کارنو مینامند. سیکل کارنو در شکل ۱۹-۱۵ نشان داده شده و تفاوت آن با سیکل‌های اوتو و دیزل در این است که این سیکل، با دو تحول آدیاباتیکی و دو تحول ایزوترم، محدود میشود. یعنی گرمایی که چشمه گرم بدستگاه میدهد، دردمای ثابت و معینی منتقل میشود و نیز گرمایی که دستگاه، بچشمه سرد میدهد، دردمای ثابت، انتقال مینماید. (آنرا باشکلهای ۱۹-۱۰ و ۱۹-۱۱ که در آنها دما در طول‌های خطوط bc و da متفاوت است، مقایسه کنید.)

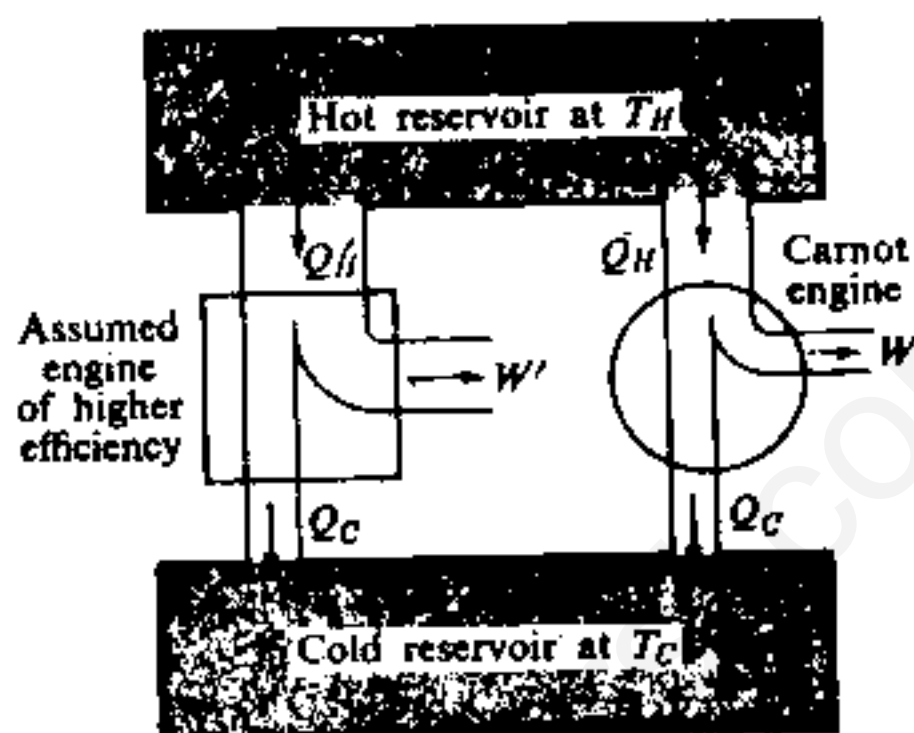
اما آنچه گفته شد، تنها مشخصه سیکل کارنو نیست. در سیکل کارنو تحول برگشت ناپذیر، نظیر انفجار یا خفگان، وجود ندارد تحول‌های ایزوترم و آدیاباتیکی سیکل کارنو، حالت ایده‌آلی دارند و تحولات حقیقی نیستند. جهت سیکل را میتوان با تغییر جزئی در فشار خارجی، تغییر داد. اصطکاک وجود ندارد و ماده انجام دهنده کار، همیشه بوضع تعادل بسیار نزدیک است.



شکل ۱۹-۱۵ سیکل کارنو

هرگاه در تحولی عامل به‌مزدن تعادل (نیروی غیر متعادل یا اختلاف دمای قابل ملاحظه) وجود نداشته باشد و نیز عوامل تلف‌کننده انرژی (نیروی اصطکاک یا مقاومت الکتریکی در بین نباشد تحول را برگشت ناپذیر یا reversible مینامند. تحول برگشت ناپذیر ترمودینامیک تحولی است ایده‌آلی، همانطور که در مکانیک، سطح بدون اصطکاک، نقطه

مادی، طناب بی وزن و قابل انعطاف و قرقره بدون اصطکاک و با ممان دینرسی صفر ایده آلی ولی بطور تقریبی می توانند وجود داشته باشند، تحول برگشت پذیر نیز بطور تقریبی وجود دارد.



شکل ۱۹-۱۶ ماشین کارنو و ماشین فرضی غیر کارنو که بازده آن بیش از بازده ماشین کارنو فرض شده و هر دو با چشمه های یکسان ارتباط دارند و هر دو با چشمه سرد گرمای مساوی پس میدهند.

تحول های آدیاباتیکی و ایزوترم سیکل کارنو، ممکن است در هر دو جهت صورت پذیرد. در شکل ۱۹-۱۵ گرمای Q_2 دارد موتور شده، Q_1 از آن خارج میشود و کار W بوسیله موتور انجام میشود. هر گاه جهت سهمها در شکل مذکور، عوض شود ماشین کارنو به یخچال کارنو تبدیل میشود و از همه مهمتر اینکه همان Q_1 که ماشین در هر سیکل از چشمه گرم میگیرد، یخچال در هر سیکل باین چشمه پس میدهد و نیز W کاری که ماشین در هر سیکل انجام میدهد برابر کاری است که یخچال در هر سیکل دریافت میکند و بالاخره Q_1 گرمائی که ماشین بچشمه سرد پس میدهد برابر گرمائی است که یخچال در هر سیکل از چشمه سرد دریافت میدارد. در هیچ ماشینی این تساویها بصورت تساوی دقیقی وجود ندارد. فرض کنید دو ماشین که دیاگرام جریان آنها در شکل ۱۹-۱۶ نشان داده شده بین چشمه های سرد و گرم یکسانی کار کنند. ماشین کارنو که در سمت راست رسم شده است

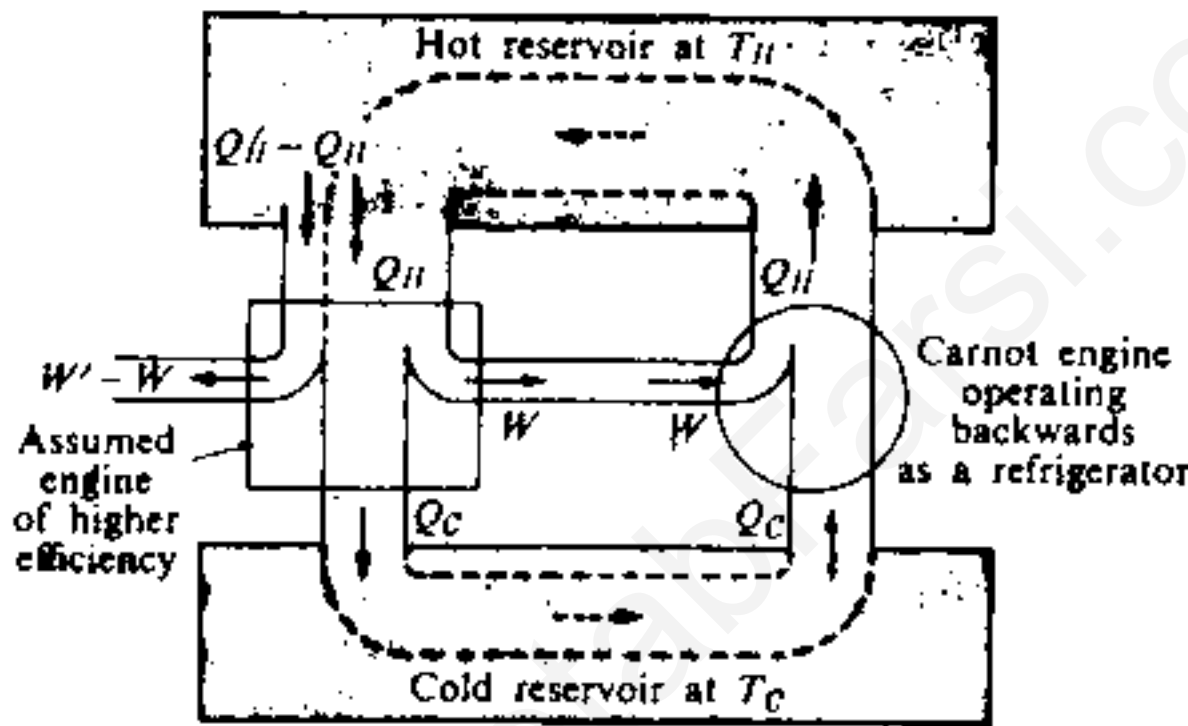
گرمای Q_C را به چشمه سرد داده و بازده آن $\frac{W}{Q_H}$ است. ماشینی که در سمت چپ رسم شده است و دارای سیکل نامشخص است (ماشین غیر کارنو)، گرمائی برابر Q_C بچشمه سرد میدهد ولی فرض بر این است که بازده آن بیش از بازده ماشین کارنو و برابر $\frac{W'}{Q_H}$ است. میخواهیم نشان دهیم که این فرض، با اصل دوم ترمودینامیک مبیانت دارد. بنا بر فرض

داریم $\frac{W'}{Q'_H} > \frac{W}{Q_H}$ و با استفاده از اصل اول ترمودینامیک میتوان نوشت :

$$\frac{Q'_H - |Q'_c|}{Q'_H} > \frac{Q_H - |Q_c|}{Q_H}$$

و از آنجا نتیجه میشود :

$$Q'_H > Q_H \quad \text{و} \quad W' > W$$



شکل ۱۷-۱۹ ماشین غیر کارنو که بنا بر فرض ، بازده بیشتری دارد ماشین کارنو را در جهت عکس حرکت در می آورد (یخچال کارنو) و نتیجه عمل با اصل دوم مابینت پیدا میکند

اما قبلاً گفتیم که سیکل کارنو میتواند در جهت عکس نیز عمل کند (و در اینحال، یخچال کارنو نامیده میشود) بدون اینکه در اندازه های Q_H و Q_c و W تغییری داده شود. فرض کنیم قسمتی از کار W' ماشین غیر کارنو، صرف گردانیدن یخچال کارنو شود. یخچال و ماشین را مانند شکل ۱۷-۱۹ بهم وصل میکنند. چشمه سرد، از یک طرف از ماشین غیر کارنو در هر سیکل Q_c دریافت و از طرف دیگر به یخچال کارنو گرمائی برابر Q_c میدهد. پس مبادله گرمائی کل چشمه سرد، برابر صفر است و میتوان فرض کرد که این چشمه وجود ندارد. گرمائی که یخچال بچشمه گرم میدهد فقط قسمتی از گرمای دریافتی ماشین غیر کارنو را تأمین میکند و چشمه گرم بقیه گرمای مورد نیاز ماشین غیر کارنو را تأمین میکند. از طرف دیگر، قسمتی از کار ماشین غیر کارنو صرف گردانیدن یخچال کارنو شده بقیه آن را میتوان برای منظور دیگری مورد استفاده قرار داد. وقتی این مجموعه کار میکند، نتیجه مطلق آن، دریافت گرما از چشمه گرم و تبدیل آن بکار مکانیکی است. یعنی ماشینی ساخته شده که از یک چشمه، گرما دریافت و تمام آن را بکار مکانیکی تبدیل نموده است. این بموجب اصل دوم ترمودینامیک، غیر ممکن است. پس فرض اینکه ماشین غیر کارنو بازده

بیش از ماشین کارنودارد غلط است و باید بازده سیکل کارنو بیشتر باشد .
 اکنون فرض کنیم دو ماشین کارنو ، بین چشمه های یکسان کار میکنند و بازده یکی
 بیش از دیگری است . فرض کنیم ماشینی که بازده آن بیشتر است ، در جهت عکس کار کرده
 مثل یخچال عمل کند . بازهم مجموعه دستگاه ، شبیه شکل ۱۹-۱۷ شده نتیجه آن ، گرفتن
 گرما از يك چشمه و تبدیل آن بکار است که با اصل دوم ترمودینامیک مبیانت دارد .
 یعنی هیچ ماشین کارنوئی پیدا نمیشود که بازده آن بیش از ماشین کارنوئی دیگر باشد .
 و یا بزبان دیگر بازده همه ماشینهای کارنو که بدو چشمه گرمای مشخص مربوط اند
 یکی است .

۱۹-۲۱، درجه بندی کلوین

از آنچه درباره سیکل کارنو گفته شد نتیجه میشود که بازده سیکل کارنو ، تابع جنس
 ماده انجام دهنده کار نبوده فقط تابع دمای دو چشمه است که ماشین مزبور بآن مربوط است .
 هر گاه چند ماشین کارنو با چند ماده انجام دهنده کار مختلف ، بین دو چشمه سرد و گرم
 معین کار کنند ، بازده گرمائی همه آنها یکسان و برابر است با :

$$\text{بازده گرمائی} = \frac{Q_H + Q_C}{Q_H} = 1 + \frac{Q_C}{Q_H} = \text{ثابت}$$

پس نسبت $\frac{Q_C}{Q_H}$ برای تمام ماشینهای کارنو یکی است . کلوین پیشنهاد میکند که نسبت
 دماهای دو چشمه را برابر قدر مطلق این نسبت ثابت تعریف کنیم چون Q_C منفی و Q_H مثبت
 است (یا بالعکس) $\frac{Q_C}{Q_H}$ منفی است و مینویسیم :

$$\frac{T_H}{T_C} = \frac{|Q_H|}{|Q_C|} = -\frac{Q_H}{Q_C} \quad (19-22)$$

چون نسبت دماها به خواص ماده بخصوصی بستگی ندارد . بنابراین دمای کلوین واقعاً
 مطلق است .

برای اینکه تعریف خود را کامل کنیم : همانطور که در فصل پانزدهم بیان شد ، T_p
 نقطه سه گانه آب را برابر 273.15°K اختیار میکنیم میتوانیم برای يك سیکل کارنو که
 دمای دو چشمه مربوط بآن T و T_p هستند بنویسیم :

$$\frac{|Q|}{|Q_c|} = \frac{T}{T_c}$$

و یا:

$$T = 273/16^\circ K \frac{|Q|}{|Q_c|} \quad (19-23)$$

میتوانیم این فرمول را با فرمول دماسنج گازی که ذیلا نوشته شده است مقایسه کنیم.

$$273/16^\circ K \lim_{P_c \rightarrow 0} \left(\frac{P}{P_c} \right) \text{ در حجم ثابت}$$

نتیجه میگیریم که Q در درجه بندی کلوین، نقش «خاصیت» ورود استفاده در دماسنجی را بعهده دارد. و چون خواص ماشین کارنو تابع جنس ماده انجام دهنده کار نیست. بنابراین انتخاب Q بعنوان «خاصیت» مورد استفاده در دماسنجی، نمیتواند مورد انتقاد واقع شود. باسانی میتوان نشان داد که هر گاه گاز کاملی بعنوان ماده انجام دهنده کار در سیکل

کارنو انتخاب شود نسبت $\frac{|Q_H|}{|Q_C|}$ در آن برابر $\frac{T_H}{T_C}$ دماهای دو چشمه است و این با شرطی

که در فصل پانزدهم در شرح دماسنج گازی و طرز درجه بندی آن گفته شد مشابهت دارد. اثبات این مطلب در اینجا ذکر نمی شود. چون نقطه سه گانه آب در هر دو درجه بندی $273/16^\circ$ فرض شده است نتیجه میگیریم که درجه بندی کلوین و درجه بندی مطلق دماسنج گازی، یکی هستند.

بازده ماشین کارنو که Q_C را بچشمه سرد داده Q_H را از چشمه گرم دریافت میکند (دمای چشمه های سرد و گرم بترتیب T_C و T_H فرض میشود) برابر است با:

$$\text{بازده} = 1 + \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$

و بنا بر تعریف درجه بندی کلوین:

$$\frac{|Q_C|}{|Q_H|} = \frac{T_C}{T_H}$$

بنابراین بازده سیکل کارنو برابر است با:

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_H} \quad (19-14)$$

(ماشین کارنو) بازده

فرمول ۱۹-۲۴ نشان میدهد که از چه طریق میتوان بازده یک ماشین واقعی نظیر دیزل ، انفجاری یا ماشین بخار را بالا برد. این بدین ترتیب ممکن است که تا حد امکان T_c را پائین و T_H را بالا بریم .

دمای چشمه سرد از دمای جسمی که گاز یا بخار خروجی را خنک می کند پائین تر نیست. پس دمای چشمه سرد ، دمای هوای جو یا دمای آب رودخانه یا دریاست . پس فقط یک راه باقی میماند و آن بالا بردن T_H است . دردیگ بخار ، با افزایش دما ، فشار بخار سریعاً افزایش مییابد . پس از اینجهت نیز محدودیت وجود دارد چه استحکام دیگ محدود و افزایش فشار باعث ترکیدن آن میشود . میتوان مایعی را انتخاب نمود که فشار بخار آن در دمای زیاد کم باشد . آزمایش های موفقیت آمیزی با جیوه انجام شده است . در دمای $200^\circ C$ فشار بخار اشباع آب 225 lb/in^2 است در حالیکه فشار اشباع جیوه در این دما 35 lb/in^2 است .

۱۹-۲۲ ، صفر مطلق

از فرمول ۱۹-۲۳ پیداست که گرمای منتقله در یک تحول ایزوترم ، که بین دو دما T_1 و T_2 آدیاباتیک صورت می پذیرد با کاهش دما ، کاهش مییابد. همچنین اگر Q کمترین مقدار را داشته باشد T نیز کمترین مقدار را دار است . کمترین مقدار ممکن Q صفر است و T نظیر آنرا صفر مطلق مینامیم . یعنی اگر در دستگاهی تحول ایزوترم بر پشت پذیری صورت گیرد و گرمائی منتقل نشود ، دمائی که در آن این تحول انجام یافته است صفر مطلق است. بعبارت دیگر در صفر مطلق تحول ایزوترم و آدیاباتیک یکسان هستند .

باید توجه داشت که صفر مطلق برای تمام اجسام ، بصورت یکسان تعریف شده و تابع خاصیت جسم بخصوصی نیست . از این گذشته این تعریف برای اجسام « ماکروسکپی » تعریف شده است و به انرژی ملکولی اجسام یا به خواص دیگر ملکولها بستگی ندارد . اینکه ممکن است بصفر مطلق رسید یا نه ، سئوالی است مهم و جالب . هلیوم معمولی (جرم اتمی ۴) پائین تر از $4/2^\circ K$ مایع میشود . برای رسیدن بدمای پائین تر ، لازم است بتوانیم بخارهای حاصل از تبخیر هلیوم مایع را (هرچه ممکن است سریعتر) خارج کنیم باین ترتیب با تبخیر سطحی میتوان هلیوم را تا $0/7^\circ K$ سرد کرد . ابعاد پمپها و لوله های هادی بخار باید بزرگ و بیشتر از حد معمول در آزمایشگاههای تولید دماهای پائین باشد . هرگاه همین

عمل را با هلیوم سبک (جرم اتمی ۳) که در دمای $3/2^\circ K$ مایع میشود انجام دهیم دما به $3^\circ K$ میرسد. با استفاده از خواص مغناطیسی اجسام، هنوز دما را از این هم پایین تر می‌آورند ولی آنچه مسلم شده است این است که هر چه بصرمطلق نزدیکتر شویم سردتر کردن، مشکلتر میشود. این نیز بعنوان یکی از خواص طبیعت و بعنوان اصل سوم ترمودینامیک شناخته شده است که میتوان دمای پائین تر و پائین تر تا نزدیکی صفرمطلق ایجاد نمود ولی وصول بصفرمطلق ممکن نیست (اصل غیروصول بودن صفرمطلق).

۱۹-۲۳، آنترופی

اصل اول ترمودینامیک اصل انرژی واصل دوم اصل آنترופی است و تمام تحولاتی که در طبیعت صورت می‌پذیرد، اعم از مکانیکی، الکتریکی، شیمیایی یا بیولوژیکی موافق با اصول فوق‌الذکر صورت می‌گیرد.

کتابی نظیر آنچه در دست شماست، جایی برای بحث مفصل در اصل دوم ترمودینامیک و بسط تعریف آنترופی ندارد. لذا ما فقط آنترופی را تعریف کرده تغییرات آنرا ضمن ذکر چند مثال، محاسبه میکنیم و باختصار، خواص آنرا بیان میکنیم.

هر گاه قسمت ۱۹-۴ را مجدداً بخوانید می‌بینید، تجربه نشان داده است که هر گاه دستگاهی از وضعی بوضع دیگر منتقل شود تفاضل گرمای مبادله شده با محیط، با کار انجام شده، فقط تابع وضع ابتدائی و انتهائی دستگاه است یعنی تغییرات $(Q - W)$ بر مسیرهای مختلف مقادیر ثابتی دارد. میتوانیم تفاضل $Q - W$ را تغییرات انرژی داخلی جسم نامیده بدین ترتیب مفهوم انرژی داخلی را در ذهن خود مجسم کنیم.

آنترופی یا بهتر بگوئیم تغییر آنترופی یک دستگاه نیز بطریق مشابهی میتواند تفهیم شود. فرض کنیم چند مسیر برگشت پذیر بین دو وضع موجود باشد. (نباید تصور کنید که شرط برگشت پذیری مسیر، با تغییر انرژی داخلی رابطه‌ای دارد) با وجود آنکه مقدار گرمای مبادله شده در مسیرهای مختلف برگشت پذیر مذکور، مساوی نیستند میتوان ثابت کرد که هر گاه نسبت گرمائی که در هر نقطه از مسیر، مبادله میشود، به دمای دستگاه در آن نقطه را حساب کرده مجموعه این نسبت‌ها را برای تمام نقاط بدست آوریم، این مجموعه نیز، برای تمام مسیرهای برگشت پذیر مقدار ثابت است. بزبان ریاضی میتوان نوشت:

$$\int \frac{dQ}{T} = \text{ثابت} \quad (\text{برای کلیه مسیرهای برگشت پذیر بین وضع ۱ و ۲})$$

بنابراین ممکن است تابعی را چنان پیدا کرد (این مطلب که تعریف این تابع متضمن چه فایده‌ای است، بعداً مورد بحث قرار می‌گیرد) که اختلاف اندازه‌های آنها بین وضع (۱) و (۲) برابر اندازه انتگرال فوق باشد. اندازه این تابع در وضع کاملاً معینی از یک دستگاه را می‌توان هر مقدار ثابت دلخواه فرض کرد ولی پس از فرض این مقدار، اندازه آن در اوضاع دیگر دستگاه، کاملاً مشخص خواهد شد.

چنین تابعی را آنترپی دستگاه نامیده آنرا با حرف S نمایش می‌دهند. بنابراین داریم:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (\text{در طول کلبه مسیرهای برگشت پذیر}) \quad (19-25)$$

هرگاه تغییرات بینهایت کوچک در نظر گرفته شود باید نوشت $dS = \frac{dQ}{T}$ واحد آنترپی $\text{Joule}/^\circ\text{K}$ ، $\text{cal}/^\circ\text{K}$ یا $\text{Btu}/^\circ\text{R}$ و غیره است.

مثال ۱- یک کیلو گرم یخ 0°C ذوب و به آب 0°C تبدیل می‌شود. تغییرات آنترپی آنرا حساب کنید.

چون دما ثابت و برابر 273°K است T را از انتگرال خارج می‌نویسیم. خواهیم داشت:

$$S_2 - S_1 = \frac{1}{T} \int dQ = \frac{Q}{T}$$

اما Q مقدار گرمائی است که صرف ذوب یک کیلو گرم یخ شده است یعنی برابر است با ۸۰۰۰۰ کالری. پس خواهیم داشت:

$$S_2 - S_1 = \frac{80000}{273} = 293 \text{ cal}/^\circ\text{K}$$

و افزایش آنترپی دستگاه $293 \text{ cal}/^\circ\text{K}$ است. در هر تحول برگشت پذیر پذیرایزوترم، تغییر آنترپی برابر نسبت گرمای مبادله شده بدماست.

مثال ۲- یک کیلو گرم آب 0°C را تا 100°C گرم می‌کنیم. تغییر آنترپی را حساب کنید.

دما ثابت نیست پس باید گرمای مبادله شده بصورت تابعی از دما معلوم باشد تا انتگرال قابل محاسبه شود میتوان نوشت:

$$dQ = mc dT$$

واز آنجا :

$$S_2 - S_1 = \int_{273}^{373} mc \frac{dT}{T} = mc \ln \frac{373}{273} = 312 \text{ cal/}^\circ\text{K}$$

مثال ۳- گازی بصورت آدیاباتیك و برگشت پذیر ، انبساط مییابد . تغییر آنتروپی آن چه اندازه است ؟

در تحول آدیاباتیك ، مبادله گرمای دستگناه با خارج ، صفر است . نتیجه میگیریم که آنتروپی هر تحول آدیاباتیك برگشت پذیر ثابت است . بهمین جهت ، این نوع تحول را ایزآنتروپیک نیز مینامند .

مثال ۴- گاز کمالی را بطرفی که کاملاً تخلیه شده است مربوط مینمائیم تا انبساط آزاد پیدا کند . (نظیر تجربه ژول شکل ۱۹-۵) تغییر آنتروپی آن چقدر است ؟ دعای گاز از اول تا آخر ثابت است ، کاری انجام نمیگیرد و گرمائی نیز مبادله نمی شود . تحول آدیاباتیك است و چنین بنظر میاید که آنتروپی آن ثابت است . اما چنین نیست ، زیرا با وجود آنکه تحول آدیاباتیك است برگشت پذیر نیست (گاز از تعداد زیادی وضع تعادل عبور نمی کند) و

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

را فقط برای تحول برگشت پذیر میتوان نوشت .

برای محاسبه تغییر آنتروپی در يك تحول برگشت ناپذیر ، تحول برگشت پذیری در نظر میگیریم که در همان دستگناه و بین همان دو وضع ابتدائی و انتهائی صورت پذیرد . در این مثال ساده ترین تحول برگشت پذیر ، انبساط ایزوترم برگشت پذیر خواهد بود . چون در این انبساط $dU = 0$ است ، میتوانیم با استفاده از معادله مشخصه و بنا بر اصل اول بنویسیم :

$$dQ = dW = p dV = \frac{nRT}{V} dV$$

و چون حجم از V_1 به V_2 افزایش مییابد :

$$S_2 - S_1 = \int_{V_1}^{V_2} \frac{dQ}{T} = nR \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nR \ln \frac{V_2}{V_1}$$