

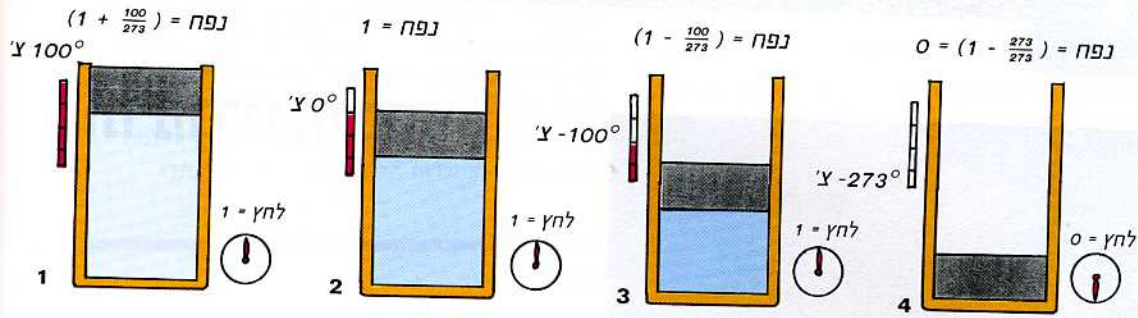
תרמודינמיקה

הצבעים בתרמוגרמה (תמונת חום) מראים את המקומות שבהם נפלט חום מהבניין. הצבע האדום והכתום מצביעים על אזורים חמים; הכחול והסגול מצביעים על אזורים קרים יותר.

התחום העוסק בחום ובדרכי הפיכתו לאנרגיה מכנית נקרא **תרמודינמיקה** (מקור השם במילים יווניות שפירושן "תנועת חום"). מדע התרמודינמיקה התפתח בתחילת המאה ה-19, עוד בטרם היתה מובנת התורה האטומית והמולקולרית של החומר. אם בפרקים הקודמים דנו בחום במונחים של ההתנהגות המיקרוסקופית של האטומים והמולקולות המתנוודדים, הרי שבפרק זה נשתמש רק במושגים מקרוסקופיים - כמו עבודה מכנית, לחץ וטמפרטורה - ונדון בתפקידיהם בשינויי האנרגיה. התרמודינמיקה היא תחום מדעי עיוני רב-עוצמה המתעלם כליל מהפרטים המולקולריים של המערכות. יסודה בשימור האנרגיה ובעובדה שחום עובר ממקום חם למקום קר ולא להיפך. זה הבסיס לתורת מכוונת החום, החל בטורבינות קיטור וכורי היתוך, וכלה בתורת המקררים ומשאבות החום. נפתח את לימודי התרמודינמיקה במבט על אחד הרעיונות המוקדמים בתחום - הגבול התחתון של הטמפרטורה.

עקרונית לא קיים גבול עליון לטמפרטורה. כאשר התנועה התרמית מתגברת, חומר מוצק מותך בתחילה ולאחר מכן מתאדה; ככל שהטמפרטורה ממשיכה לעלות, המולקולות נפרדות לאטומים והאטומים מאבדים חלק מהאלקטרונים או את כולם, וכך נוצר ענן של חלקיקים טעונים חשמלית - פלסמה. מצב זה קיים בכוכבים, שבהם שוררת טמפרטורה של מיליוני מעלות צלסיוס.

האפס המוחלט



איור 17.1 (למעלה)

כל שינוי ב- 1° צלסיוס בטמפרטורה של גז, שלחצו נותר קבוע, גורר שינוי בשיעור של $\frac{1}{273}$ מנפח הגז ב- 0° . (1) ב- 100° הנפח גדול ב- $\frac{100}{273}$ מהנפח ב- 0° . (2) כאשר טמפרטורת הגז יורדת ל- 100° - נפח הגז קטן ב- $\frac{100}{273}$ מנפחו ב- 0° . (3) כאשר טמפרטורת הגז יורדת ל- 273° - נפח הגז אמור לקטון ב- $\frac{273}{273}$ ולהתאפס. (4)

לעומת זאת, בקצה האחר של סקלת הטמפרטורות קיים גבול מוגדר כשמחממים גזים הם מתפשטים, ובקירור הם מתכווצים. ניסויים שנערכו במאה ה-19 הראו שכל עוד הלחץ נותר קבוע, שינוי הטמפרטורה של גז במעלה אחת צלסיוס גורם לשינוי נפחו ב- $\frac{1}{273}$ מהנפח ב- 0° צלסיוס, ללא תלות בלחץ או בנפח ההתחלתי. אם נקרר גז מטמפרטורה של 0° ב- 273 מעלות, נפחו יתכווץ ב- $\frac{273}{273}$ משיעורו הקודם ולכן, לכאורה, נפחו אמור להתאפס. כמובן שלא ייתכן חומר בעל נפח אפס. כמו כן התגלה כי לחצו של גז הנמצא במכל שנפחו קבוע משתנה ב- $\frac{1}{273}$ מערכו עם שינוי הטמפרטורה במעלה אחת צלסיוס. לפיכך, גז במכל בעל נפח קבוע, שיקורר ל- 273° צלסיוס מתחת לאפס, אמור להיות חסר לחץ. למעשה, כל גז מתעבה לפני הגיעו לטמפרטורה זו. עם זאת, ירידות אלה בשיעור של $\frac{1}{273}$ רמזו על קיום טמפרטורה נמוכה ביותר: 273° צלסיוס. קיים איפוא גבול לקור. כאשר אטומים ומולקולות מאבדים את כל האנרגיה הקינטית שלהם הם מגיעים לטמפרטורת האפס המוחלט*. מחומר בטמפרטורת האפס המוחלט אי אפשר להפיק עוד אנרגיה קינטית ואין אפשרות להמשיך ולהוריד את הטמפרטורה שלו. למעשה, הטמפרטורה הגבולית היא 273.15 מעלות צלסיוס מתחת לאפס.

בסקלת הטמפרטורה המוחלטת, סקלת קלווין**, האפס המוחלט הוא 0 קלווין (0 K) בכתוב לועזי, אין אומרים או כותבים: "0 מעלות קלווין". בסקלת קלווין אין מספרים שליליים. מרווחי המעלות בסקלת קלווין שווים בגודלם למרווחי המעלות בסקלת צלסיוס. נקודת הקיפאון של קרח, אם כן, היא 273.15 קלווין ונקודת הרתיחה של מים היא 373.15 קלווין.

איור 17.2 (מימין)
טמפרטורות מוחלטות

* גם באפס המוחלט עדיין יש למולקולות אנרגיה קינטית זעומה, הנקראת אנרגיית האפס. למשל, תנועת ההליום באפס המוחלט מונעת את קפיאתו. להסבר התופעה נדרש ידע בתורת הקוונטים.
** הסקלה נקראת על שמו של הפיזיקאי הסקוטי המפורסם לורד קלווין, שטבע את המונח תרמודינמיקה והיה הראשון שהציע את הסקלה התרמודינמית הזאת למדידת טמפרטורות.



שאלות

1. מה גדול יותר, מעלה צלסיוס או יחידת קלווין?
2. הטמפרטורה של פיסת מתכת היא 0° צלסיוס. למה מתכוונים כשאומרים שפיסת מתכת אחרת, זהה לראשונה, חמה כפליים? מהי הטמפרטורה שלה?

לכולנו ידוע שכמויות עצומות של אנרגיה אגורות בצורות שונות בכל החומרים - למשל בספר זה. דפי הספר מורכבים ממולקולות הנמצאות בתנועה מתמדת. הן בעלות אנרגיה קינטית. הן גם בעלות אנרגיה פוטנציאלית שמקורה בכוחות ששוררים ביניהן לבין מולקולות סמוכות. את הדפים ניתן לשרוף בקלות, ולכן אנו יודעים שהם מכילים אנרגיה כימית, שהיא למעשה ביטוי לאנרגיה פוטנציאלית חשמלית ברמה המולקולרית. אנו יודעים גם שכמויות עצומות של אנרגיה קשורות לגרעיני האטומים. כמו כן קיימת אנרגיה הקשורה בעצם קיום החומר ומתוארת בנוסחה הידועה $E=mc^2$ (הנוסחה המקשרת בין מסה לאנרגיה). כל האנרגיה המצויה בתוך החומר בצורות אלו ואחרות נקראת **אנרגיה פנימית***. גם בחומר הפשוט ביותר, האנרגיה הפנימית עשויה להיות מורכבת למדי. אבל בלימודינו בנושא שינויי החום ומעבריו נדון רק בשינויים באנרגיה הפנימית של החומר. שינויים בטמפרטורה יצביעו על שינויים כאלה באנרגיה הפנימית.

אנרגיה פנימית

לפני למעלה ממאה שנה חשבו כי החום הוא זורם בלתי נראה, שכונה קלוריק, וכי הוא הזורם, כמו מים, מגופים חמים לגופים קרים. הקלוריק, כך סברו, נשמר בתהליכים שבהם הוא מעורב, ותגלית זו היתה למעשה מעין גרסה מוקדמת של חוק שימור האנרגיה. במחצית שנות ה-80 של המאה ה-19 התברר שזרימת החום אינה אלא זרימת אנרגיה. בהדרגה נזנחה תורת הקלוריק של החום**.

כיום אנו רואים בחום צורת אנרגיה שאינה יכולה להיווצר או להיהרס.

החוק הראשון של התרמודינמיקה

תשובות:

1. אף אחת. הן שוות.

2. כשאומרים שפיסת המתכת השנייה חמה כפליים, מתכוונים לכך שיש לה אנרגיה פנימית כפולה. פירושו של דבר שהטמפרטורה המוחלטת שלה כפולה, או כפליים מ-273 קלווין, כלומר, 546 קלווין או 273° צלסיוס.

* אילו הנחנו ספר זה בקצהו של שולחן, היתה לו אנרגיה פוטנציאלית כובדית; אם היינו זורקים אותו באוויר, היתה לו אנרגיה קינטית. אך אלו אינן דוגמאות לאנרגיה פנימית, מפני שאינן קשורות למרכיבי הפנימיים של הספר. הן כוללות אינטראקציה כבידתית עם כדור הארץ ותנועה ביחס אליו. אם נרצה לכלול צורות אלו בחישוב האנרגיה, נצטרך להרחיב את "המערכת" שלנו - לדון במערכת הכוללת את הספר ואת כדור הארץ גם יחד. אנרגיות אלו אינן חלק מהאנרגיה הפנימית של הספר עצמו.

** כאשר דעות מקובלות מופרכות הן אינן מושלכות מיד. אנשים נוטים להזדהות עם רעיונות שאפיינו את תקופתם; לעיתים קרובות הדור הצעיר הוא הפתוח לתגליות, מוכן לקבל רעיונות חדשים ומקדם את ההתפתחות האנושית.

מהתאמת חוק שימור האנרגיה למערכות תרמיות מתקבל **החוק הראשון של התרמודינמיקה**. לרוב נוהגים לנסח אותו כך:

כשמתוסף חום למערכת הוא מומר בה לכמות שווה של אנרגיה לצורתיה.

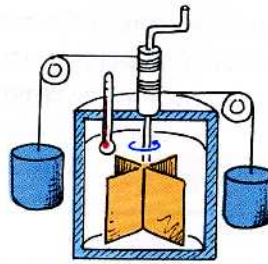
הכוונה במערכת היא לקבוצה מוגדרת היטב של אטומים, מולקולות, חלקיקים או עצמים. מערכת עשויה להיות הקיטור במכונת קיטור או אטמוספירת כדור הארץ כולה. היא יכולה להיות אפילו גופו של יצור חי. החשוב הוא שניתן להגדיר מה כלול במערכת ומה נמצא מחוץ לה. אם נוסיף חום לאדים במכונת קיטור, לאטמוספירת כדור הארץ או לגופו של יצור חי, נגדיל את האנרגיות הפנימיות של מערכות אלו. בזכות תוספת האנרגיה תוכלנה המערכות לבצע עבודה על גופים חיצוניים. לאנרגיה הנוספת יקרה אחד משני הדברים הבאים (או שניהם): (1) אם האנרגיה תישאר במערכת היא תגדיל את האנרגיה הפנימית שלה; (2) אם היא תצא מהמערכת היא תבצע עבודה על גופים החיצוניים למערכת. החוק הראשון קובע איפוא ביתר דיוק:

החום הנוסף למערכת = הגידול באנרגיה הפנימית + העבודה החיצונית שמבצעת המערכת.

החוק הראשון הוא עיקרון כללי שאינו דן בפרטי המנגנון הפנימי של המערכת עצמה. ללא תלות בפרטי ההתנהגות המולקולרית במערכת, אנרגיית החום הנוספת ממלאת שני תפקידים: היא מגדילה את האנרגיה הפנימית של המערכת או מאפשרת למערכת לבצע עבודה חיצונית (או שני הדברים גם יחד). אחת התכונות המופלאות של התרמודינמיקה היא יכולתה לתאר ולחזות את התנהגותן של מערכות שעלולות להיות מורכבות מדי לניתוח התהליכים האטומיים והמולקולריים בהן. התרמודינמיקה מחברת בין העולם המיקרוסקופי לעולם המקרוסקופי.

הניחו על כיריים כלי חתום ובו אוויר וחממו אותו. כיוון שנפחו של הכלי קבוע, לא מבוצעת עליו כל עבודה וכל החום הנכנס מגדיל את האנרגיה הפנימית של האוויר הכלוא. טמפרטורת האוויר עולה. אם נתאים לכלי בוכנה ניידת, האוויר המחומם יוכל לבצע עבודה בעת התפשטותו ולדחוף את הבוכנה. האם ברור לכם שבמקרה זה טמפרטורת האוויר הכלוא תהיה קטנה מהטמפרטורה שתהיה לו במקרה שבו לא נעשתה עבודה על הבוכנה? אם מוסיפים חום למערכת שאינה עושה עבודה חיצונית, כמות החום שנוספה שווה לגידול באנרגיה הפנימית של המערכת. אם המערכת מבצעת עבודה חיצונית אזי הגידול באנרגיה הפנימית יקטן בהתאמה. החוק הראשון של התרמודינמיקה אינו אלא הגרסה החומנית של חוק שימור האנרגיה.

חישבו על כמות מסוימת של חום שסופקה למכונת קיטור. הכמות שנוספה תבוא לידי ביטוי בגידול באנרגיה הפנימית של הקיטור ובעבודה המכנית שבוצעה. הסכום של הגידול באנרגיה הפנימית ושל העבודה שבוצעה שווה לתוספת החום. אין דרך שבה ניתן להפיק אנרגיה רבה יותר מזו המושקעת.



איור 17.3

מתקן בעל גלגל-משוטות ששימש לראשונה להשוואה בין אנרגיית חום לאנרגיה מכנית. עם ירידת המשקולות הן מאבדות אנרגיה פוטנציאלית ומחממות את המים. את הניסוי הזה ערך לראשונה ג'יימס ג'ול, ועל שמו נקראת יחידת האנרגיה.

שאלות

1. בכמה תגדל האנרגיה הפנימית של מערכת שנוספו לה 100 ג'ול של אנרגיה ושאינה מבצעת כל עבודה חיצונית?
2. בכמה תגדל האנרגיה הפנימית של מערכת שנוספו לה 100 ג'ול של אנרגיה ושמבצעת עבודה חיצונית בשיעור של 40 ג'ול?

תהליכים אדיאבטיים

הוספת חום למערכת המסוגלת לבצע עבודה מכנית היא רק אחד מיישומי החוק הראשון של התרמודינמיקה. אם במקום להוסיף חום למערכת נבצע עליה עבודה מכנית, אזי החוק הראשון אומר לנו למה עלינו לצפות: לגידול באנרגיה הפנימית. משאבת אופניים היא דוגמה טובה לכך. כאשר אנו מניעים את הידית, המשאבה מתחממת. מדוע? מפני שאנו מבצעים בעיקר עבודה מכנית על המערכת ומגדילים את האנרגיה הפנימית שלה. אם התהליך מהיר דיו כך שבמהלך הדחיסה רק כמות זעומה של חום יוצאת מהמערכת בהולכה, אזי רוב העבודה המושקעת מופנית להגדלת האנרגיה הפנימית, והמערכת מתחממת (איור 17.4).

ניפוח במשאבת אופניים הוא דוגמה לתהליך אדיאבטי. תהליך דחיסה והתפשטות של גז ללא כניסת חום למערכת או יציאתו ממנה נקרא אדיאבטי (מהמילה היוונית "בלתי-חדיר"). ניתן לקיים תהליך אדיאבטי בדחיסה או בהתפשטות כה מהירה של גז, שהזמן שבו החום עשוי להיכנס למערכת או לצאת ממנה קצר, או בבידוד תרמי של המערכת מסביבתה (למשל באמצעות שכבת "קלקר").

אם נאפס את אגף "החום הנוסף" בחוק הראשון, נראה כי השינויים החלים באנרגיה הפנימית שווים לעבודה הנעשית על המערכת*. אם מבצעים עבודה על המערכת - דחיסה למשל - האנרגיה הפנימית גדלה. טמפרטורת המערכת עולה. אם המערכת מבצעת עבודה - למשל מתפשטת בתוך שהיא מתגברת על התנגדות סביבתה - האנרגיה הפנימית קטנה. המערכת מתקררת. דוגמה נפוצה אחרת לתהליך אדיאבטי היא דחיסתם והתפשטותם של הגזים בבוכנות של מנוע מכונית (איור 17.5). הדחיסה וההתפשטות אורכות רק מאיות שנייה, זמן קצר מדי לפליטת כמות ניכרת של חום מתא השריפה. בדחיסה גבוהה, כזאת המתרחשת במנועי דיזל, הטמפרטורות המתקבלות בדחיסה גבוהות דיו להצתת תערובת הדלק ללא שימוש במצתים. ואכן, מנועי דיזל פועלים ללא מצתים.



איור 17.4

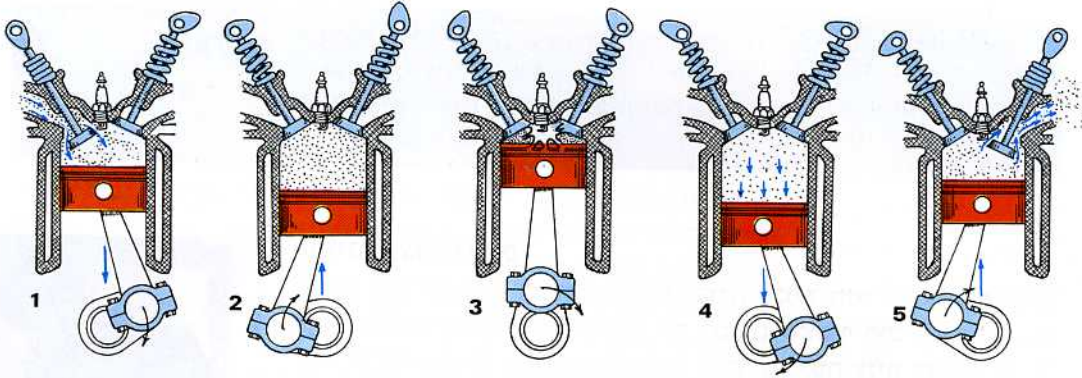
לחיצה על הבוכנה גורמת לכיווץ האוויר שבמשאבה ולביצוע עבודה עליה. מה קורה לטמפרטורת האוויר הכלוא? מה קורה לטמפרטורת האוויר אם האוויר מתפשט ודוחף את הבוכנה החוצה?

תשובות:

1. 100 ג'ול.

2. 60 ג'ול. אנו מסיקים זאת מהחוק הראשון של התרמודינמיקה: $40 \text{ ג'ול} + 60 \text{ ג'ול} = 100 \text{ ג'ול}$.

* מהשוויון: $0 = (\text{עבודה}) + (\text{אנרגיה פנימית}) - \Delta(\text{חום}) = \Delta(\text{חום}) - \Delta(\text{אנרגיה פנימית}) - (\text{עבודה})$.



איור 17.5

מנוע שריפה פנימית בעל ארבע פעימות. (1) כשהבוכנה נעה כלפי מטה, תערובת של דלק ואוויר נכנסת מהמאייד לתוך הגליל. (2) הבוכנה נעה כלפי מעלה וזוחסת אדיאבטית את התערובת, כי אין מעבר חום. (3) המצת מצית את התערובת והטמפרטורה שלה עולה. (4) ההתפשטות דוחפת את הבוכנה למטה וזאת פעימת האנרגיה. (5) הגזים שנוצרו בשריפה נדחים החוצה דרך צינור המפלט, אז נפתח שסתום הכניסה והתהליך מתחיל מחדש.

לפיכך, כאשר מבצעים עבודה על גז בדחיסה אדיאבטית, האנרגיה הפנימית של הגז גדלה והגז מתחמם. תופעה זו ניכרת בהתחממותה של משאבת אופניים כאשר האוויר נדחס. בהתפשטות אדיאבטית של גז, הגז מוסר חלק מהאנרגיה הפנימית ומתקרר. תוכלו להיווכח בכך בניסוי שניתן לבצע מיד: בפה פעור, נישפו על ידכם. נשיפתכם חמה. עתה חיזרו על הניסוי אך סיגרו את שפתותיכם וצרו פתח קטן כך שהאוויר שתנשפו יצטרך להתפשט בצאתו (איור 17.6). נשיפתכם קרה יותר באופן ניכר! אוויר שמתפשט, מתקרר.



איור 17.6

נישפו בפה פעור לחלוטין אוויר חם על ידכם. עתה הקטינו את הפתח בין שפתותיכם כך שבעת הנשיפה האוויר יתפשט. ההתפשטות אדיאבטית ולכן האוויר מתקרר.

מטאורולוגיה והחוק הראשון

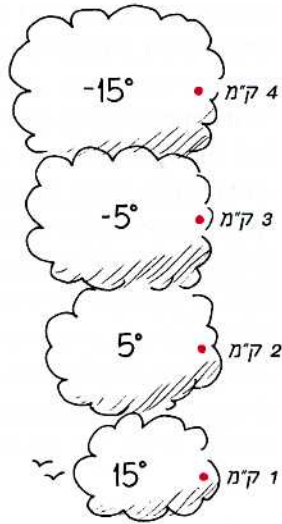
התרמודינמיקה מסייעת לחזאים בניתוח מזג האוויר. המטאורולוגים מנסחים את החוק הראשון של התרמודינמיקה באופן הבא:

שינוי הטמפרטורה ~ תוספת חום (או גריעתו) + שינוי הלחץ

ניתן לשנות את טמפרטורת האוויר בהוספת חום או בגריעתו, בשינוי לחץ האוויר או בשינוי האופנים גם יחד. האוויר מתחמם מקרינת השמש, מקרינת גלים בעלי אורך גל ארוך הנפלטים מכדור הארץ, מעיבוי הלחות או ממגע עם האדמה החמימה. כתוצאה מכך עולה טמפרטורת האוויר. האטמוספירה מאבדת חום בקרינה הנפלטת לחלל, מאידוי גשם היוורד כשהאוויר יבש, או עקב מגע עם משטחים קרים. התוצאה היא ירידת טמפרטורת האוויר. ישנם תהליכים אטמוספיריים רבים, המתרחשים בדרך כלל במהלך פרקי זמן של יממה או פחות, שבהם כמות החום המתוספת או הנגרעת קטנה מאוד - קטנה עד כדי כך שהתהליך הוא למעשה אדיאבטי. לתיאור תהליכים אלו מתאימה הצורה האדיאבטית של החוק הראשון:

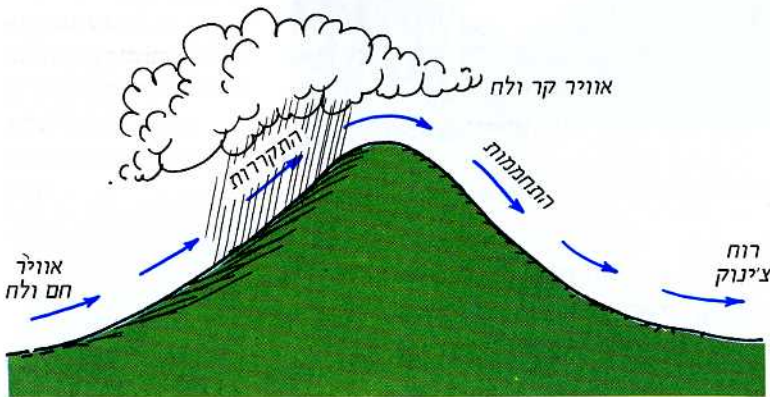
שינוי הטמפרטורה ~ שינוי הלחץ

באטמוספירה, תהליכים אדיאבטיים מאפיינים מסות גדולות של אוויר, הנקראות כיסים. ממדי הכיסים הינם מסדר גודל של קילומטרים. בשל גודלם הרב, ערבול של טמפרטורות שונות או של לחצי אוויר שונים בשוליים אינו משנה את ההרכב הכולל של הכיס במידה ניכרת, והוא מתנהג כאילו היה כולו בתוך שק מאריג דקיק וקל. כאשר כיס האוויר עולה במעלה הר, הלחץ קטן וכתוצאה מכך האוויר מתפשט ומתקרר. בעקבות הקטנת הלחץ הטמפרטורה יורדת*. ממדידות עולה כי הטמפרטורה של כיס אוויר יבש תרד ב- 10° צלסיוס אם ירדת הלחץ תתאים לעלייה בגובה של קילומטר אחד. אוויר יבש מתקרר איפוא ב- 10° לכל קילומטר של התרוממות (איור 17.7). אוויר שאורם מעל הרים נישאים או עולה בסערות או בציקלונים עשוי לשנות את גובהו בקילומטרים אחדים. אם כך, כשכיס אוויר יבש, שבגובה הקרקע היה בעל טמפרטורה נוחה של 25° , יתרומם ב-6 ק"מ, הטמפרטורה שלו תרד ל- 35° צלסיוס. לעומת זאת, אם אוויר הנמצא בגובה של 6 קילומטרים, שהטמפרטורה האופיינית שלו היא 20° -, ירד לקרקע, הטמפרטורה שלו תמריא ל- 40° . דוגמה דרמטית להתחממות אדיאבטית היא הצ'ינוק - רוח היורדת מהרי הרוקי למישורים הגדולים של ארה"ב. אוויר קר הנע במורדות ההרים נדחס במידה ניכרת, נפחו קטן, והוא מתחמם משמעותית. השפעת ההתפשטות והדחיסה על גזים היא תופעה מרשימה (איור 17.8)**.



25°C פני הקרקע

איור 17.7
טמפרטורת כיס האוויר היבש המתפשט אדיאבטית משתנה ב- 10° לכל התרוממות בקילומטר.



איור 17.8
צ'ינוקים - רוחות חמות ויבשות, המתרחשות כאשר אוויר יורד מהגבהים ומתחמם אדיאבטית.

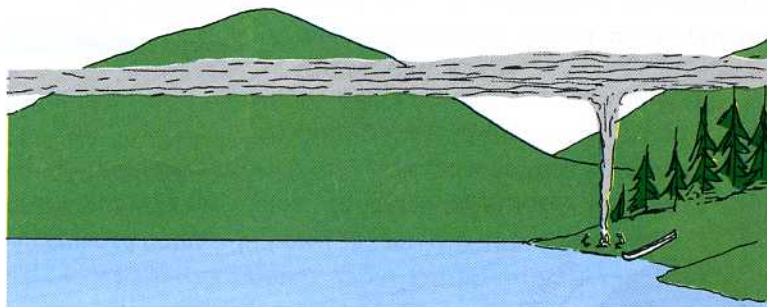
* כזכור, בפרק 15 דנו בהתקררות אוויר עולה מנקודת מבט מיקרוסקופית, תוך כדי ניתוח התנהגותן של מולקולות מתנגשות. בתרמודינמיקה אנו מקבלים אותן תוצאות מניית מדידות מיקרוסקופיות של טמפרטורה ולחץ. מעניין לנתח דברים מכמה נקודות מבט, ונעים במיוחד להסיק אותן מסקנות. ** מעניין לציין שכאשר טסים במרומים, אף על פי שהטמפרטורה החיצונית היא 35° -, חשים בנוח בתא המטוס - ולא מפני שמחממים אותו. תהליך הדחיסה של האוויר החיצוני לתוך התא, ללחצים הקרובים ללחץ שבגובה פני הים, היה מעלה את הטמפרטורה לטמפרטורה לוחטת - 55° . לכן צריך להשתמש במזגנים כדי להוציא חום מהאוויר הנדחס.

כיס אוויר עולה מתקרר תוך כדי התפשטותו. אך בגובה רב יותר גם האוויר שמסביבו קר יותר. הכיס ימשיך לעלות כל עוד הוא חם יותר (צפוף פחות) מסביבתו. אם הוא קר יותר (צפוף יותר) מסביבתו, הוא ישקע. בתנאים מסוימים, כיסים גדולים של אוויר קר שוקעים ונותרים בגובה נמוך וכך נוצר מצב שבו האוויר שמעליהם חם יותר. כאשר השכבות העליונות של האטמוספירה חמות יותר מהשכבות שמתחתיהן מתקבל **היפוך טמפרטורות**. רק אם האוויר החם שעולה צפוף פחות משכבה עליונה זו של אוויר חם, תימשך עלייתו. ניתן להבחין בתופעה זו מעל אגם קר שבו גזים נראים לעין וחלקיקים - כמו עשן - יוצרים שכבה שטוחה מעל לאגם, ואינם עולים ומתפזרים גבוה יותר באטמוספירה (איור 17.10). היפוכי טמפרטורה לוכדים ערפיח ומתפזרים גבוה, תרמיים אחרים. הערפיח של העיר לוס אנג'לס שבקליפורניה נלכד בהיפוך כזה, הנגרם עקב התהוות שכבה נמוכה של אוויר קר המגיע מהאוקיינוס, שמעליה נמצאת שכבה המגיעה ממדבר מוחבה הלוהט ועוברת מעל להרים. ההרים מסייעים בהחזקת האוויר הלכוד.



איור 17.9

מבשרת הרעם היא תוצאת קירור אדיאבטי מהיר של מסת אוויר לח שהתרומם.



איור 17.10

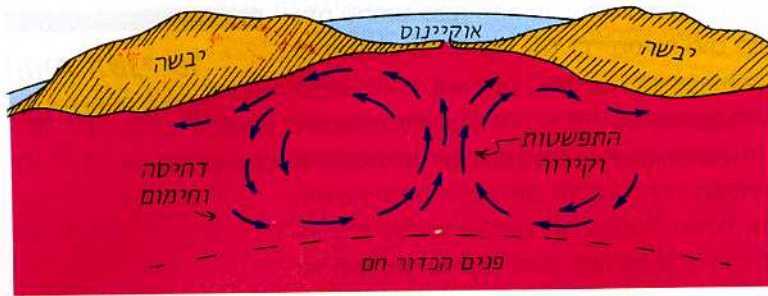
שכבת עשן המדורות מעידה על היפוך טמפרטורה. האוויר שמעל לעשן חם ממנו והאוויר שמתחת לעשן קר ממנו.

כיסים אדיאבטיים אינם מוגבלים לאטמוספירה והשינויים בכיסים אלה אינם בהכרח מהירים. גם בזרמי האוקיינוס קיימים כיסים כאלה. הסעה של חלק מזרמי האוקיינוס העמוקים הללו נמשכת אלפי שנים. מסות המים



איור 17.11

בעיר לוס אנג'לס הערפיח נלכד על ידי ההרים והיפוך הטמפרטורה שגורם האוויר החם המגיע ממדבר מוחבה ונמצא מעל לאוויר הקר המגיע מהאוקיינוס השקט.



איור 17.12
 האם מניעים זרמי הסעה בקרום כדור הארץ את היבשות הנודדות על פניו? האם הכיסים העולים של חומר מותך מתקררים מהר יותר או לאט יותר מהחומר בסביבתם? האם הכיסים השוקעים מתחממים לטמפרטורות גבוהות מטמפרטורת סביבתם או נמוכות ממנה? בשלב זה, התשובות לשאלות אלו אינן ידועות.

בכיסים אלו כה גדולות ושיעורי ההולכה בהם כה נמוכים שבמשך פרקי זמן ארוכים לא מועברות כמויות חום משמעותיות אל כיסים אלה או מהם. הם מתחממים או מתקררים אדיאבטית בשל שינויים בלחץ הפנימי. לשינויים בהסעה האדיאבטית באוקיינוס, המומחשת בזרמי אל-ניניו שבאוקיינוס השקט, השפעה רבה על אקלים כדור הארץ. ההסעה באוקיינוס מושפעת מהטמפרטורה בקרקעיתו, וזו מושפעת מזרמי ההסעה בחומר המותך שמתחת לקרום כדור הארץ (איור 17.12). קשה לדעת מהי התנהגות החומר המותך שבתוך כדור הארץ. האם כיס של חומר נוזלי הנמצא עמוק בליבת כדור הארץ ומתחיל לעלות ימשיך לעלות לתוך קרום כדור הארץ? או שמא קצב הקירור האדיאבטי שלו יגרום לו להיות קר יותר וצפוף יותר מסביבתו והוא יתחיל לשקוע? האם ההסעה תימשך בלא הפסק? המחקר הגיאופיזי עוסק בשאלות אלו.

שאלות

- מה תהיה הטמפרטורה של כיס אוויר המתפשט אדיאבטית תוך כדי התרוממות בשיפולי הר לגובה של 1 ק"מ, אם הטמפרטורה ההתחלתית שלו היא 0°? מה תהיה הטמפרטורה שלו בגובה 5 ק"מ?
- מה קורה לטמפרטורת האוויר בעמק כאשר אוויר קר הנושב מעל פסגות ההרים יורד אל העמק?
- דמיינו שק ענק שחוט קשור אליו, המלא באוויר בטמפרטורה של 10°- ומרחף כבלון בגובה של 6 ק"מ מעל לקרקע. מה תהיה בקירוב טמפרטורת האוויר אם נמשוך את השק במהירות לקרקע?

תשובות:

- בגובה של 1 ק"מ הטמפרטורה תהיה 10°-; בגובה של 5 ק"מ - 50°-.
- האוויר נדחס אדיאבטית והטמפרטורה בעמק עולה. זו הסיבה לכך שתושבי חלק מהערים בעמקים של הרי הרוקי, כמו סלידה וקולורדו, זוכים לאקלים טרופי באמצע החורף.
- אם השק נמשך מטה במהירות רבה באופן שהולכת החום זניחה, הוא יידחס אדיאבטית על ידי האטמוספירה ויתחמם לטמפרטורה לוחטת של 50°, בדיוק כמו האוויר המתחמם בעת דחיסתו במשאבת אופניים.

החוק השני של התרמודינמיקה

נניח שהנחנו לבנה חמה בצמוד ללבנה קרה במקום מבודד תרמית. אנו יודעים שהלבנה החמה תתקרר תוך כדי מסירת חום ללבנה הקרה, שתתחמם. הן יגיעו לטמפרטורה משותפת - לשיווי-משקל תרמי. בהתאם לחוק הראשון של התרמודינמיקה, לא יהיו איבודי אנרגיה. אך הניחו שהלבנה החמה קיבלה חום מהלבנה הקרה והתחממה. האם הדבר סותר את החוק הראשון של התרמודינמיקה? לא, אם הלבנה הקרה התקררה בהתאמה באופן שהאנרגיה הכוללת של שתי הלבנים לא השתנתה. ואולם, תהיה בכך הפרה של **החוק השני של התרמודינמיקה**. החוק השני מבחין בין כיווני מעבר של אנרגיה בתהליכים טבעיים. ניתן לנסח את החוק השני של התרמודינמיקה באופנים רבים, אך צורתו הפשוטה היא:

לעולם לא יעבור חום מעצמו מגוף קר לגוף חם.

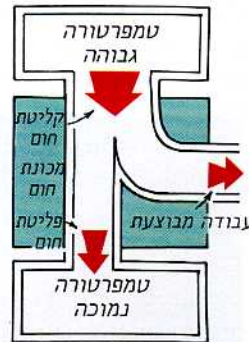
חום זורם בכיוון אחד - במורד, מהחם לקר. בחורף, חום יזרום מתוך בית מחומם החוצה לאוויר הקר. בקיץ, חום מהאוויר החם שבחוץ יזרום לפנים הצונן. כיוון זרימת החום הוא מהחם לקר. ניתן לגרום לחום לעבור בכיוון הנגדי, אולם רק בהשקעת מאמץ חיצוני - כמו במשאבות חום המעלות את טמפרטורת האוויר או במזגנים המורידים את טמפרטורת האוויר. בלא מאמץ חיצוני לא ניתן להשתמש בכמויות העצומות של האנרגיה הפנימית המוכלת באוקיינוסים אפילו להדלקת פנס אחד. אנרגיה לא תעבור בעצמה מהאוקיינוס, שבו הטמפרטורה נמוכה יותר, לתיל הלהט של הנורה השרוי בטמפרטורה גבוהה יותר. בלא מאמץ חיצוני, כיוון זרימת החום הוא מהחם לקר.

מכונות חום

ניתן לשנות בקלות ובאופן מלא עבודה לחום - פשוט שפשו את ידיכם בחוזקה או דחפו עגלה על הרצפה במהירות קבועה. כל העבודה שתשקיעו כדי להתגבר על החיכוך תהפוך במלואה לחום. אולם התהליך ההפוך - של הפיכת החום במלואו לעבודה - לא יתרחש לעולם. לכל היותר אפשר להפוך חלק מהחום לעבודה מכנית. המכונה הראשונה שביצעה זאת היתה מכונת הקיטור, שהומצאה בסביבות השנה 1700.

כל מכשיר המשנה אנרגיה פנימית לעבודה מכנית הוא **מכונת חום**. העיקרון העומד בבסיס פעולתה של כל מכונת חום - בין שזו מכונת קיטור, ובין שזהו מנוע שריפה פנימית או מנוע סילון - הוא שניתן להפיק עבודה מכנית רק כשחום זורם מטמפרטורה גבוהה לטמפרטורה נמוכה. בכל מכונת חום ניתן להפוך רק חלק מהחום לעבודה.

כל מכונת חום - תהא זו מכונת קיטור, מנוע בניזן או דיזל, טורבינת גז או מנוע סילון - (א) תקלוט אנרגיה פנימית ממאגר בעל טמפרטורה גבוהה יותר, (ב) תהפוך חלק מאנרגיה זו לעבודה מכנית ו-(ג) תפלוט את האנרגיה הנוותרת למכל הנמצא בטמפרטורה נמוכה יותר (איור 17.13). במנוע בניזן למשל (א) הדלק הנשרף בתא השריפה הוא המאגר בעל הטמפרטורה הגבוהה, (ב) העבודה המכנית נעשית על הבוכנה ו-(ג) האנרגיה העודפת נפלטת מהמפלט. החוק השני קובע שאין שום מכונת חום שתוכל להפוך את כל החום המסופק לעבודה



איור 17.13

ניתן להפוך לעבודה חלק מהחום העובר, במכונת חום כלשהי, מהמכל שבטמפרטורה גבוהה למכל שבטמפרטורה נמוכה. (אם מבצעים עבודה על מכונת החום תיתכן זרימת חום מהמכל שבטמפרטורה נמוכה אל המכל שבטמפרטורה גבוהה, כמו במקרה או במזגן.)

מכנית. ניתן להפוך רק חלק מהחום לעבודה, והיתרה נפלטת בתהליך. את החוק השני למכונות חום ניתן איפוא לנסח כך:

כאשר עבודה מתבצעת על ידי מכונת חום הפועלת בין שתי טמפרטורות, $T_{\text{ק}}$ ו- $T_{\text{ס}}$, רק חלק מהאנרגיה הנקלטת מהמכל ב- $T_{\text{ס}}$ יכולה להפוך לעבודה, והשאר נפלט כחום למכל בטמפרטורה $T_{\text{ק}}$.

תמיד תהיה פליטת אנרגיה, רצויה או בלתי רצויה. קיטור חם הנפלט במכבסה ביום חורף קר עשוי להיות רצוי למדי, אך התועלת שבפליטת אותו קיטור ביום קיץ חם היא עניין שונה לחלוטין. כאשר החום הנפלט אינו רצוי נוהגים לכנותו זיהום תרמי.

בטרם הובן החוק השני כראוי סברו שמכונת חום בעלת היכוד נמוך תוכל להפוך כמעט את כל האנרגיה המושקעת לעבודה מועילה. אך אין זה כך. ב-1824 ניתח המהנדס הצרפתי סאדי קרנו בקפידה את מחזורי הדחיסה וההתפשטות במכונת חום והסיק מסקנה עקרונית. הוא הוכיח שגם בתנאים אידיאליים קיים גבול עליון לחלק החום שניתן להפכו לעבודה מועילה, וכי גבול זה תלוי בהפרש הטמפרטורות בין המכל החם למכל הקר. משוואתו היא

$$\frac{(T_{\text{ס}} - T_{\text{ק}})}{T_{\text{ס}}} = \text{נצילות אידיאלית}$$

באשר $T_{\text{ס}}$ היא טמפרטורת המכל החם ו- $T_{\text{ק}}$ היא טמפרטורת המכל הקר*. הנצילות האידיאלית תלויה רק ביחס בין הפרשי הטמפרטורות של שני המכלים לבין הטמפרטורה הגבוהה. בכל מקרה שבו צריך לחשב יחסי טמפרטורות יש להשתמש בסקלת הטמפרטורה המוחלטת. $T_{\text{ס}}$ ו- $T_{\text{ק}}$ מבוטאים איפוא ביחידות קלווין. למשל, אם טמפרטורת המכל החם בטורבינת גז היא 400 קלווין (127° צלסיוס) וטמפרטורת המכל הקר 300 קלווין (27° צלסיוס), אזי הנצילות האידיאלית היא

$$\frac{400 - 300}{400} = \frac{1}{4}$$

פירוש הדבר הוא שגם בתנאים אידיאליים ניתן להפוך רק 25 אחוזים מהאנרגיה הפנימית של הקיטור לעבודה, ואילו 75 האחוזים הנותרים נפלטים כפסולת. זו הסיבה לכך שבמכונות קיטור ובתחנות כוח, הקיטור מחומם חימום יתר לטמפרטורות גבוהות. ככל שטמפרטורת הקיטור המפעיל את המנוע או המחולל גבוהה יותר, כן גבוהה יותר הנצילות של ייצור האנרגיה. (אם למשל נעלה את טמפרטורת ההפעלה ל-600 קלווין, היעילות תהיה $\frac{1}{2} = \frac{600 - 300}{600}$; כלומר, כפליים היעילות ב-400 קלווין.)

* נצילות = העבודה המופקת/החום המסופק

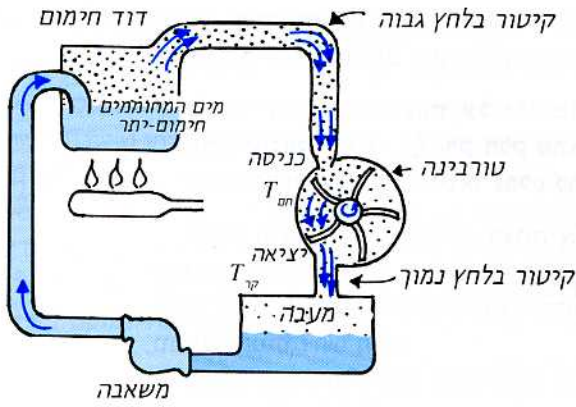
החום המסופק = העבודה המופקת + החום הנפלט בטמפרטורה הנמוכה (ראו איור 17.13). אם כך,

העבודה המופקת = החום המסופק - החום הנפלט.

והנצילות = (החום המסופק - החום הנפלט)/החום המסופק.

במקרה האידיאלי ניתן להוכיח שהיחס (החום הנפלט)/החום המסופק = $T_{\text{ק}}/T_{\text{ס}}$. אם כך,

הנצילות האידיאלית = $(T_{\text{ס}} - T_{\text{ק}})/T_{\text{ס}}$.



איור 17.14

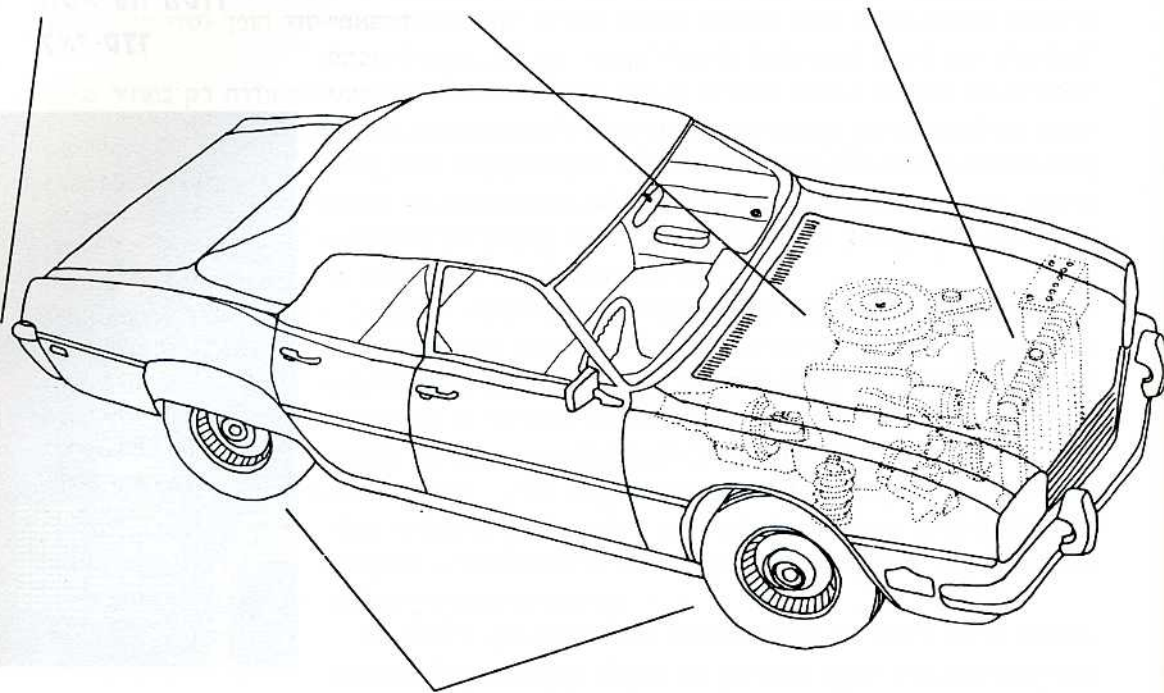
תרשים פשוט של טורבינת קיטור. הטורבינה מסתובבת כי הלחץ שמפעיל הקיטור מהדוד על צידם הקדמי של להבי הטורבינה גדול מהלחץ שמפעיל הקיטור בעל הטמפרטורה הנמוכה על צידם האחורי. בלא הפרש לחצים, הטורבינה לא תסתובב ולא תמסור אנרגיה לעומס החיצוני (למשל, למחולל חשמל). גם בלא חיכוך, קיומו של לחץ הקיטור הפועל על צידם האחורי של הלהבים מונע מהמכונה להיות בעלת נצילות מושלמת.

נוכל להמחיש את התפקיד שממלא הפרש הטמפרטורות בין המכל החם למכל הקר בפעולת טורבינת קיטור המתוארת באיור 17.14. המכל החם מכיל קיטור מהמחמם והמכל הקר הוא אזור הפליטה. הקיטור החם מפעיל לחץ ומבצע עבודה על הלהבים שעה שהוא דוחף את צידם הקדמי. נאה הדבר. אך לחץ הקיטור אינו מוגבל לצידם הקדמי של הלהבים; לחץ הקיטור פועל פעולה נגדית גם על צידם האחורי של הלהבים - ודבר זה אינו נאה כל כך. הלחץ על צידם האחורי של הלהבים קטן יותר, בעיקר משום שלאחר שהקיטור מסר חלק ניכר מהאנרגיה שלו ללהבים, הוא מתקרר (ובפועל הלחץ מוקטן גם עקב הורדת טמפרטורת הפליטה בתהליך של עיבוי המתרחש מחוץ לטורבינה). גם כשאין חיכוך, סך העבודה שמפיקה הטורבינה יהיה ההפרש בין העבודה שעושה הקיטור החם על הלהבים ובין העבודה שעושים הלהבים על הקיטור הקר, הגורמת לפליטתו. אנו יודעים שעבור קיטור כלוא, קיים קשר הדוק בין הלחץ לטמפרטורה - אם מקטינים את הטמפרטורה, הלחץ קטן. אם כך, הפרש הלחצים ההכרחי לפעולת מכונת חום קשור ישירות להפרש הטמפרטורות בין המכל החם לבין המכל הקר. ככל שהפרש הטמפרטורות גדל, הנצילות גדלה. משוואת קרנו מציגה את הגבול העליון לנצילותן של כל מכונות החום. ככל שטמפרטורת הפעולה של מכונת חום גבוהה יותר (ביחס לטמפרטורת הפליטה) - בין שמדובר במכונת רגילה, בספינה המונעת בדלק גרעיני או במטוס סילון - כן גדלה נצילות המכונה. למעשה, בכל המכונות קיים חיכוך, והנצילות קטנה תמיד מהנצילות האידיאלית*. לפיכך, אף כי חיכוך הוא הגורם היחיד לאי היעילות של מכשירים רבים, הרי שבמקרה של מכונות חום הגורם המרכזי הוא החוק השני של התרמודינמיקה; גם בלא חיכוך, ניתן להפוך לעבודה רק חלק מהחום המושקע.

* הנצילות האידיאלית של מכונת רגילה היא בסביבות 56 אחוזים, אולם בפועל הנצילות היא בסביבות 25 אחוזים. מנועים שטמפרטורת הפעולה בהם גבוהה יותר (בהשוואה לטמפרטורת המכל הקר) יהיו בעלי נצילות גבוהה יותר, אולם נקודת ההתכה של החומרים שמהם המנועים עשויים מגבילה את הטמפרטורות העליונות שבהן הם יכולים לפעול. לשם השגת נצילויות גבוהות יותר עלינו להמתין לחומרים שנקודות ההתכה שלהם גבוהות יותר. צפו למנועי קרמיקה!

$$\text{אנרגיית הדלק} = \text{איבודים במי הקירור} + \text{תפוקת האנרגיה של המנוע} + \text{איבודי אנרגיה במפלט}$$

$$100\% = 36\% + 26\% + 38\%$$



$$\text{תפוקת האנרגיה של המנוע} = \text{אנרגיית ההאצה} + \text{חיכוך הגלגול} + \text{אנרגיה לאביזרים הנוספים}$$

$$26\% = 3\% + 6\% + 3\%$$

$$\text{איבודים במצב הסרק} + \text{התנגדות האוויר} + \text{איבודי מערכת התמסורת}$$

$$4\% + 7\% + 3\%$$

איור 17.15

רק 26 אחוזים מאנרגיית החום הנוצרת משריפת הדלק במכונת הופכים לאנרגיה מכנית מועילה, בעוד רובה מתבזבז בחיכוך ובהתגברות על התנגדות האוויר. האיבודים המתוארים באיור זה מאפיינים מכונת אמריקאית טיפוסית והם ממוצעים של מצבי נהיגה שונים. (באדיבות האקספלורטוריום, מוזיאון המדע של סן פרנציסקו.)

שאלות

1. מה תהיה הנצילות האידיאלית של מכונה אם טמפרטורות המכל החם והקר שוות - נביח ל-400 קלווין?

2. מה תהיה הנצילות האידיאלית של מכונה אם טמפרטורת המכל החם היא 400 קלווין וטמפרטורת המכל הקר היא האפס המוחלט, 0 קלווין?

תשובות:

1. הנצילות היא אפס; $0 = (400 - 400) / 400$. אם כך, בשום מכונת חום לא תתקבל עבודה מופקת, אלא אם כן קיים הפרש טמפרטורות בין המכל החם לבין המכל הקר.

2. $1 = (400 - 0) / 400$; רק במקרה האידיאלי הזה תיתכן נצילות אידיאלית של 100 אחוז.

השאיפה מסדר לאי-סדר



איור 17.16

גורדי השחקים שבתמונה מחוממים באמצעות התאורה החשמלית ולכן רוב הזמן דולקים בהם האורות.



איור 17.18

מולקולות הגז נעות מהצננת החוצה, לאוויר, ולא להיפך.

החוק הראשון של התרמודינמיקה קובע כי לא ניתן ליצור אנרגיה וגם אי אפשר להשמידה. החוק השני מסייג זאת בקביעה שבשינויי אנרגיה, האנרגיה "מאבדת מאיכותה" בהפכה לצורות הניתנות פחות ופחות לניצול. האנרגיה מתפזרת ובסופו של דבר הופכת לפסולת. דרך אחרת להציג זאת היא לומר שאנרגיה מסודרת (מרוכזת ועל כן מועילה) הופכת לאנרגיה לא מסודרת (אנרגיה שאינה ניתנת לשימוש). האנרגיה בדלק היא מסודרת ומועילה. כאשר הדלק נשרף במנוע המכונית, חלק מהאנרגיה שלו מבצע עבודה מועילה, חלק מחמם את המכונית ואת סביבתה וחלק נפלט החוצה דרך המפלט. אנרגיה שניתנת לניצול הופכת לצורות לא שימושיות של אנרגיה, שלא ניתן לנצלן לביצוע עבודה - למשל להנעת רכב אחר.

האנרגיה המסודרת של החשמל, המאירה את נורות החשמל בבתינו ובבנייני משרדים, הופכת לאנרגיית חום. זו השיטה העיקרית לחימום בנייני משרדים רבים המצויים באזורים שבהם האקלים נוח, כמו גורד השחקים שבאיור 17.16. כל האנרגיה החשמלית של הנורות, ובכללה החלק הזעיר שבמשך זמן קצר קיים כאנרגיית אור, הופכת לאנרגיית חום, המשמשת לחימום הבניינים. זאת הסיבה לכך שבבניינים אלה האורות דולקים כמעט תמיד. לאנרגיה הנוצרת כך אין שימוש נוסף. בלא מאמץ חיצוני לא ניתן להשתמש באנרגיית החום שבבניינים אלו אפילו להארת נורה אחת. החום הוא בית העלמין של האנרגיה המועילה.

כל תמורה באנרגיה גורמת איפוא לירידה באיכותה. צורות אנרגיה מסודרות נוטות להשתנות לצורות לא מסודרות. במבט רחב, ניתן לנסח את החוק השני בצורה אחרת:

מערכות טבעיות נוטות להתפתח למצב שבו אי-סדר רב יותר

איור 17.17

דחפו ארגז כבד על רצפה מחוספסת, וכל עבודתכם תושקע בחימום הרצפה והארגז. העבודה שבוצעה כנגד החיכוך הופכת לאנרגיה לא-מסודרת.



סוף-סוף סידרתם את חדרכם. כל האבק הוסר וכל חפץ נמצא במקומו. לאחר שבוע הכול שוב הפוך. אתם עורמים ערמה של שקלים על שולחנכם, כשערך המטבע פונה מעלה. מישהו נכנס לחדר ונתקל בטעות בשולחן, כל המטבעות נופלים ארצה, ובוודאי לא כולם נופלים כך שהערך הנקוב שלהם פונה מעלה. אתם עובדים בחברה גדולה ואחד העובדים תלה שלט מצחיק שבו נאמר: "אם אתם סבורים שכעת העניינים מבולבלים, חכו למה שעוד יקרה". אלו הן דוגמאות לנטיית היקום וכל אשר בתוכו לאי-סדר. במובן הרחב, זהו המסר של החוק השני של התרמודינמיקה. במונח אי-סדר, הכוונה היא ליתר אקראיות. לדוגמה, מולקולות גז הנעות כולן בהתאמה יוצרות מצב מסודר - אך זה גם מצב בלתי מסתבר. לעומת זאת, מולקולות של גז הנעות בכיוונים אקראיים ובמהירויות אקראיות יוצרות מצב לא מסודר - אך מצב מסתבר יותר. אם תסירו את המכסה מבקבוק המכיל גז כלשהו, מולקולות הגז תיפלטנה לחדר ותיצורנה מצב של אי-סדר רב יותר (איור 17.18).

סדר יחסי הופך לאי-סדר. אינכם מצפים כי יתרחש התהליך ההפוך; אינכם מצפים שהמולקולות תחזורנה ותסתדרנה מעצמן בתוך הבקבוק ובתוך כך תיצורנה מצב מסודר יותר. תהליכים שבהם אי-סדר הופך לסדר פשוט אינם מתרחשים.

אנרגיה בלתי-מסודרת יכולה להפוך לאנרגיה מסודרת רק במחיר מאמץ ארגוני או השקעת עבודה. למשל, המים במקפיא קופאים והופכים מסודרים יותר מפני שבמחזור הקירור במקרר נעשית עבודה; גז יהפוך מסודר יותר באזור מצומצם אם נשקיע עבודה במדחס. אך איננו מכירים תהליכים טבעיים שבהם, בלא שתבוצע עבודה חיצונית, יתקבל בסך הכל גידול בסדר.

הרעיון של ירידה ב"איכות" האנרגיה גלום במושג **אנטרופיה***. אנטרופיה היא מידה של כמות אי-הסדר. החוק השני של התרמודינמיקה קובע כי בטווח הארוך, האנטרופיה תמיד גדלה. מולקולות הגז הנפלטות מבקבוק עוברות ממצב מסודר יחסית למצב מסודר פחות. אי-הסדר גדל; האנטרופיה גדלה. כאשר מערכת פיסיקלית יכולה לחלק את האנרגיה שלה ללא מגבלות, היא עושה זאת תמיד באופן שהאנטרופיה גדלה בעוד כמות האנרגיה המסוגלת לבצע עבודה קטנה.

היזכרו בחידה ישנה: "כיצד ניתן להפוך ביצה טרופה (מקושקשת) ללא-טרופה?" התשובה פשוטה: "האכילו בה תרנגולת." אך גם אז לא תקבלו בחזרה את כל הביצה המקורית - גם בייצור ביצה יש חוסר יעילות. כל היצורים החיים, מחיידקים לעצים ועד בני אדם, קולטים אנרגיה מסביבתם ומשתמשים בה להגדלת הארגון בתוכם. ביצורים החיים, האנטרופיה קטנה. אך הסדר בחיים לצורותיהם ניוון מהגדלת האנטרופיה במקום אחר; סך האנטרופיה הכוללת של החיים לצורותיהם ושל חומרי הפסולת שלהם גדל**. כדי לקיים את החיים יש לספק אנרגיה למערכות החיות. אם לא תסופק ליצור החי אנרגיה, הוא ימות עד מהרה ויעבור בהדרגה למצב של אי-סדר.

אנטרופיה



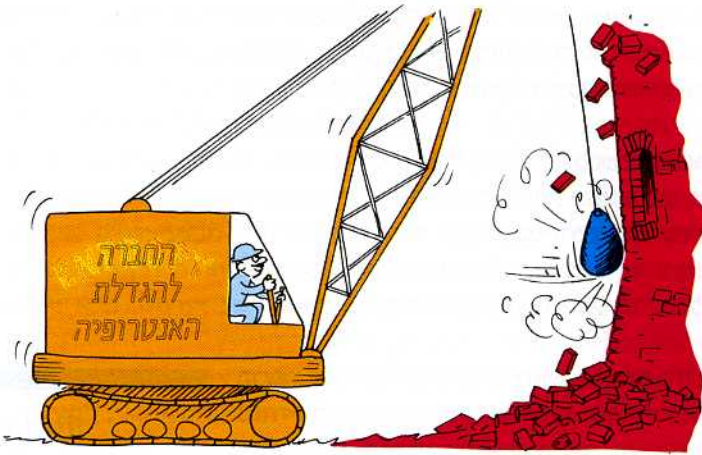
איור 17.19
אנטרופיה.

* ניתן לבטא את האנטרופיה בנוסחה מתמטית, הקובעת כי הגידול באנטרופיה ΔS במערכת תרמודינמית אידיאלית שווה לכמות החום ΔQ שנוספה למערכת, מחולקת בטמפרטורה T של המערכת: $\Delta S = \Delta Q/T$.

** מעניין לציין שהסופר האמריקאי ראלף וולדו אמרסון, שחי בתקופה שבה היה החוק השני של התרמודינמיקה הנושא שבחזית הדיון המדעי, טען שמבחינה פילוסופית לא בכול גדל אי-הסדר עם הזמן, והביא כדוגמה את המחשבה האנושית. ככל שחולפים הדורות, הרעיונות על טבע הדברים הופכים יותר ויותר מזוקקים ומאורגנים. המחשבה האנושית מתפתחת לכיוון של יתר סדר.

איור 17.20

מדוע מתאימה לקבלן זה הפרסומת: "סיסמתנו - הגדלת האנטרופיה"?



החוק הראשון של התרמודינמיקה הוא חוק כללי, אוניברסלי, שלא נצפו לו יוצאים מהכלל. אולם החוק השני הוא קביעה הסתברותית. בהינתן זמן ארוך דיו, גם המצבים הלא-מסתברים ביותר עשויים להתרחש; לעיתים ייתכן שהאנטרופיה תקטן. למשל, התנועות האקראיות של המולקולות בגז עשויות להפוך מסודרות, רגעית, באחת מפינות החדר, בדיוק כשם שיייתכן שאם מחבית מלאה מטבעות של שקל יתגלגלו כל המטבעות על הרצפה, הם ייפלו כשהערך הנקוב של כולם פונה כלפי מעלה. מצבים אלו ייתכנו - אך הם אינם סבירים. החוק השני קובע את ההתפתחות הסבירה של המאורעות, אך אין זאת האפשרות היחידה. לעיתים מנסחים את חוקי התרמודינמיקה כך: אינכם יכולים להרוויח (כי אינכם יכולים להפיק ממערכת אנרגיה רבה יותר מזו שהשקעתם בה), אינכם יכולים להגיע לתיקו (כי אינכם יכולים להפיק אפילו את כל האנרגיה שהשקעתם) ואפילו אינכם יכולים לפרוש מהמשחק (האנטרופיה ביקום גדלה תמיד).

תהליך אדיאבטי תהליך, בדרך כלל דחיסה או התפשטות, שבו חום אינו נוסף למערכת ואינו נפלט ממנה.

היפוך טמפרטורה מצב שבו שכבות עליונות באטמוספירה חמות יותר מהשכבות שמתחתיהן.

החוק השני של התרמודינמיקה לעולם לא יעבור חום באופן טבעי מגוף קר לגוף חם. כמו כן, אין מכונה שיכולה להפוך בשלמות אנרגיה לעבודה; חלק מהאנרגיה המושקעת יתבזבז כחום. ולבסוף, עם חלוף הזמן, כל המערכות נוטות להפוך ליותר ויותר לא-מסודרות.

מכונת חום מכשיר ההופך אנרגיה פנימית לעבודה מכנית.

אנטרופיה מידת אי-הסדר של מערכת. כל עוד אנרגיה משתנה באופן חופשי מצורה לצורה, השינוי המתרחש הוא בכיוון של הגדלת אי-הסדר ולכן בכיוון של הגדלת האנטרופיה.

תקציר מונחים

תרמודינמיקה חקר החום והמרתו לצורות אנרגיה אחרות.

האפס המוחלט הטמפרטורה הנמוכה ביותר שיכולה להיות לחומר; הטמפרטורה שבה למולקולות החומר אנרגיה קינטית מזערית.

אנרגיה פנימית סכום כל האנרגיות המולקולריות - אנרגיה קינטית ואנרגיה פוטנציאלית - שבחומר. עיקר עיסוקה של התרמודינמיקה הוא בשינויים באנרגיה הפנימית.

החוק הראשון של התרמודינמיקה ניסוח מחדש של חוק שימור האנרגיה, בעיקר בהקשר למערכות שחלים בהן שינויים בטמפרטורה: החום הנוסף למערכת שווה לסכום של הגידול באנרגיה הפנימית ושל העבודה החיצונית שעושה המערכת.

17. מהו ציינוק?

18. מהו היפוך טמפרטורה?

19. האם מתרחשים באוקיינוסים תהליכים אדיאבטיים בכמויות גדולות של מים? נמקו את תשובתכם.

החוק השני של התרמודינמיקה

20. מה הקשר בין החוק השני של התרמודינמיקה לבין כיוון זרימת החום?

מכונות חום

21. מהם שלושת התהליכים המתרחשים בכל מכונת חום?

22. מהו בדיוק זיהום תרמי?

23. אילו ניתן היה לסלק ממכונת חום את כל החיכוך, האם היתה נצילותה 100 אחוז? הסבירו.

24. למה הכוונה במשפט "כאשר אנרגיה משתנה היא הופכת למפוזרת יותר"?

השאיפה מסדר לאי-סדר

25. מנו לפחות שתי דוגמאות להבדלים בין אנרגיה מסודרת לאנרגיה לא-מסודרת.

26. איזה חלק מהאנרגיה החשמלית של נורה חשמלית רגילה הופך לאנרגיית חום?

27. כיצג נוהגות מערכות טבעיות מבחינת מצבי סדר ואי-סדר? האם ייתכן שמצב לא-מסודר יהפוך אי פעם למצב מסודר? הסבירו.

אנטרופיה

28. מהו המונח הפיסיקלי לכמות הבלגן?

29. מהו הקשר בין החוק השני של התרמודינמיקה לאנטרופיה?

30. מה ההבדל בין החוק הראשון לחוק השני של התרמודינמיקה מבחינת אפשרויות קיומם של יוצאים מהכלל?

תרגילים

1. האם יגרום נייעור חוזר ונשנה של פחית ובה נוזל לעליית טמפרטורת הנוזל? (נסו והיווכחו).

2. מדוע עולה הטמפרטורה של אוויר שנדחס?

3. כאשר מנפחים צמיג במשאבת אופניים, גליל המשאבה מתחמם. הציעו שתי סיבות לכך.

שאלות חזרה

1. מהן המילים היווניות שבמקור המילה תרמודינמיקה?

2. האם עוסקת התרמודינמיקה בעיקר בתהליכים מיקרוסקופיים או בתהליכים מקרוסקופיים?

האפס המוחלט

3. בכמה קטן נפחו של גז ב- 0° צלסיוס, המוחזק בלחץ קבוע, עם כל ירידה בטמפרטורה במעלה אחת צלסיוס?

4. בכמה קטן לחצו של גז ב- 0° , המוחזק בנפח קבוע, עם כל ירידה בטמפרטורה במעלה אחת צלסיוס?

5. לאיזה נפח ישאף נפחו של גז ב- 0° אם נקררו ב-273 מעלות צלסיוס, בהנחה שהגז אינו מתעבה לנוזל?

6. מהי הטמפרטורה הנמוכה ביותר האפשרית בסולם צלסיוס? בסולם קלווין?

אנרגיה פנימית

7. מה תמיד גדול יותר, האנרגיה הקינטית המולקולרית של החומר או האנרגיה הפנימית שלו?

8. האם התרמודינמיקה עוסקת בעיקר בכמות האנרגיה הפנימית בחומר או בשינויים באנרגיה זו?

החוק הראשון של התרמודינמיקה

9. מה הקשר בין חוק שימור האנרגיה לחוק הראשון של התרמודינמיקה?

10. מה קורה לאנרגיה הפנימית של מערכת כאשר עושים עליה עבודה מכנית? מה קורה לטמפרטורה שלה?

11. מה הקשר בין החום הנוסף למערכת, האנרגיה הפנימית והעבודה החיצונית שעושה המערכת?

תהליכים אדיאבטיים

12. מה התנאי שצריך להתקיים כדי שתהליך יהיה אדיאבטי?

13. אם עבודה נעשית על מערכת, האם האנרגיה הפנימית של המערכת גדלה או קטנה? אם עבודה נעשית על ידי מערכת, האם האנרגיה הפנימית של המערכת גדלה או קטנה?

מטאורולוגיה והחוק הראשון

14. מנו לפחות שש דרכים שבהן ניתן לשנות את טמפרטורת האוויר.

15. מה קורה, בדרך כלל, לטמפרטורה של אוויר המתרומם כלפי מעלה?

16. מה קורה, בדרך כלל, לטמפרטורה של אוויר ששוקע?

18. האם יש בזבוז בהדלקת כל הנורות בבניינים המוסקים בחשמל? האם יש בזבוז בהדלקת כל הנורות אם הבניין מקורר בעזרת מזגנים?
19. בהסתמך על החוק הראשון והשני של התרמודינמיקה, הצדיקו את הטענה ש-100 אחוז מהאנרגיה החשמלית המושקעת בנורה דולקת הופכים לאנרגיית חום.
20. האם האנרגיה הניתנת לניצול ביקום הולכת ופוחתת עם הזמן? הסבירו.
21. לאחר התאדות המים מתמיסת מי-מלח נותרים גבישי מלח שבהם המולקולות מסודרות יותר מהמולקולות הנעות אקראית בתמיסה. האם הופך עקרון האנטרופיה? נמקו.
22. מים שהוכנסו למקפיא שבמקרר עוברים בעת קפיאתם למצב שבו המולקולות מסודרות יותר. האם זאת דוגמה היוצאת מן הכלל של עקרון האנטרופיה? הסבירו.

בעיות

1. התבוננו בפיסת מתכת בטמפרטורה של 10° . מה תהיה טמפרטורת הפיסה אם נכפיל את חומה (האנרגיה הפנימית שלה תוכפל)?
2. ביום קריר שבו הטמפרטורה היא 10° צלסיוס אומרת לך ידידתך, האוהבת מזג אוויר קר, כי היתה רוצה שהיום יהיה קריר כפליים. חשבו את הטמפרטורה המתאימה לפירוש המילולי של דבריה.
3. דמיינו שק ענקי מלא אוויר בטמפרטורה של 35° - המרחף כבלון בגובה של 10 ק"מ מעל לקרקע כשחוט מחובר אליו. העריכו את הטמפרטורה שתהיה לאוויר שבשק אם תצליחו להורידו במהירות אל פני כדור הארץ.
4. מנוע השורף דלק מייצר 68 קילו-גיול של חום בטמפרטורה של 900 קלווין ופולט חום למכל בטמפרטורה של 400 קלווין. חשבו: (א) את הנצילות האידיאלית; (ב) את הנצילות בפועל אם מבוצעת עבודה בשיעור של 18 קילו-גיול.
5. מכונת חום קולטת 100 קילו-גיול של אנרגיה ממקרר שהטמפרטורה שלו היא 800 קלווין ופולטת 50 קילו-גיול למכל שהטמפרטורה שלו היא 300 קלווין. חשבו: (א) את הנצילות האידיאלית של המכונה; (ב) את הנצילות בפועל.

4. האם ניתן להפוך כליל כמות נתונה של עבודה מכנית לחום? האם ניתן להפוך כליל כמות נתונה של חום לעבודה מכנית? ציינו דוגמאות להדגמת תשובותיכם.
5. מדוע פועלים מנועי דיזל ללא מצתים?
6. הכול יודעים שאוויר חם עולה למעלה. אם כך, לכאורה יכולנו לצפות לכך שטמפרטורת האוויר בפסגות ההרים תהיה גבוהה יותר מהטמפרטורה שלמרגלותיהם. אך בדרך כלל המצב הפוך. מדוע?
7. אנו טוענים שבשינויי אנרגיה, האנרגיה "מאבדת מאיכותה". האם עומד הדבר בסתירה לחוק הראשון של התרמודינמיקה? נמקו את תשובתכם.
8. האנרגיה הקינטית המולקולרית הכוללת של מולקולות המים במכל גדול מאוד גדולה מהאנרגיה הקינטית המולקולרית הכוללת של מולקולות המים בכוס תה חם. הניחו שאתם טובלים חלקית את כוס התה במכל המים הקרים, והתה קולט 10 יחידות אנרגיה מהמים ומתחמם בעוד המים במכל, שמסרו 10 יחידות אנרגיה, מתקררים. האם מעבר אנרגיה זה סותר את החוק הראשון של התרמודינמיקה? את החוק השני של התרמודינמיקה? הסבירו.
9. מדוע המונח זיהום תרמי הוא עניין יחסי?
10. האם ניתן לתכנן מכונת חום שלא תיצור זיהום תרמי? נמקו את תשובתכם.
11. בטורבינה המופעלת באמצעות קיטור, מדוע רצוי להשתמש בקיטור חם ככל האפשר?
12. מה הקשר בין הנצילות האידיאלית של מכונת לבין טמפרטורת המנוע וטמפרטורת הסביבה שבה היא פועלת? פרטו.
13. מה קורה לנצילות של מכונת חום אם מורידים את הטמפרטורה של המכל שקולט את החום הנפלט?
14. כדי להגדיל את נצילותה של מכונת חום, האם עדיף להגדיל את טמפרטורת המכל החם בלא לשנות את טמפרטורת המכל הקר, או להקטין את טמפרטורת המכל הקר בלא לשנות את טמפרטורת המכל החם? הסבירו.
15. באילו תנאים תהיה הנצילות של מכונת חום 100 אחוז?
16. הניחו שאתם רוצים לקרר את המטבח בפתיחת דלת המקרר ובסגירת דלת המטבח וחלונותיו. מה יקרה לטמפרטורת המטבח? מדוע?
17. מדוע מקרר שבו תכולה קבועה של מזון יצרוך יותר אנרגיה ביום חם מאשר ביום קר?