

ΔΙΑΛΕΞΗ 5  
10/11/2020

## Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

## 4.2 Ενεργειακό Ισοζύγιο Κλειστών Συστημάτων

Το ενεργειακό ισοζύγιο για οποιοδήποτε σύστημα υφίσταται οποιαδήποτε διεργασία διατυπώθηκε ως (βλ. Κεφάλαιο 2)

$$\underbrace{E_{in} - E_{out}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά} \\ \text{ενέργειας μέσω θερμότητας,} \\ \text{έργου, και μάζας}}} = \underbrace{\Delta E_{system}}_{\substack{\text{Μεταβολή εσωτερικής,} \\ \text{κινητικής, δυναμικής κλπ.} \\ \text{ενέργειας}} \quad (\text{kJ}) \quad (4.11)$$

$$(Q_{in}, W_{in}, m_{in,}) - (Q_{out}, W_{out}, m_{out,}) = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

$$(Q_{in}, W_{in}, m_{in,}) - (Q_{out}, W_{out}, m_{out,}) = m(u_2 - u_1) + 1/2 m (u_2^2 - u_1^2) + m g (z_2 - z_1)$$

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

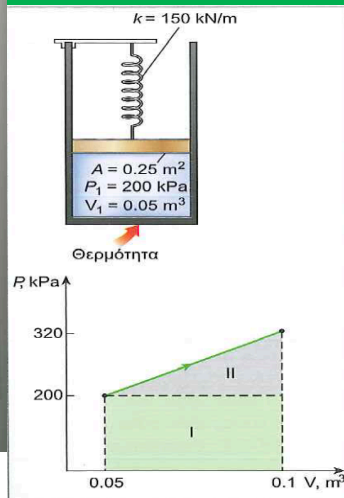
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-4: Εκτόνωση ενός Αερίου Αντίθετη σε ένα Ελατήριο

Μια διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου περιέχει  $0,05 \text{ m}^3$  ενός αερίου, αρχικά σε πίεση  $200 \text{ kPa}$ . Στην κατάσταση αυτή, ένα γραμμικό ελατήριο που έχει μια σταθερά ελατηρίου  $150 \text{ kN/m}$  εφάπτεται στο έμβολο αλλά δεν εξασκεί καμία δύναμη σε αυτό. Τώρα μεταφέρεται θερμότητα στο αέριο, αναγκάζοντας το έμβολο να ανέλθει και να συμπίσει το ελατήριο, μέχρι ο όγκος στο εσωτερικό του κυλίνδρου να διπλασιαστεί. Εάν το εμβαδό της εγκάρσιας διατομής του εμβόλου είναι  $0,25 \text{ m}^2$ , να προσδιορίσετε (α) την τελική πίεση στο εσωτερικό του κυλίνδρου, (β) το συνολικά παραγόμενο έργο από το αέριο, και (γ) το κλάσμα αυτού του παραγόμενου έργου αντίθετα προς το ελατήριο, ώστε αυτό να συμπιεστεί.

**Λύση:** Ένα αέριο στο εσωτερικό μιας διάταξης εμβόλου-κυλίνδρου εξοπλισμένης με ένα γραμμικό εκτονώνεται ως αποτέλεσμα θέρμανσης. Να προσδιοριστούν η τελική πίεση του αερίου, το συνολικά παραγόμενο έργο, και το κλάσμα του έργου αυτού για τη συμπίεση του ελατηρίου.

**Παραδοχές 1** Η διεργασία εκτόνωσης είναι ψευδοστατική. **2** Το ελατήριο είναι γραμμικό στην περιοχή ενδιαφέροντος.

**Ανάλυση** Ένα σκαρίφημα του συστήματος και το διάγραμμα  $P-V$  της διεργασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 4-10.



**Σχήμα 4-10:** Σχηματική αναπαράσταση και διάγραμμα  $P-V$  του Παραδείγματος 4-4

(β) Ένας εύκολος τρόπος εύρεσης του παραγόμενου έργου είναι ο σχεδιασμός της διεργασίας σε ένα διάγραμμα  $P-V$  και εύρεσης του εμβαδού κάτω από την καμπύλη της διεργασίας. Από το Σχήμα 4-10 η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη (ένα τραπέζιο) προσδιορίζεται ότι είναι

$$W = (\text{εμβαδόν}) = \frac{(200 + 320) \text{ kPa}}{2} [(0,1 - 0,05) \text{ m}^3] \left( \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 13 \text{ kJ}$$

Παρατηρήστε ότι το έργο παράγεται από το σύστημα.

(γ) Το έργο που αναπαρίσταται από το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο (περιοχή I) παράγεται αντίθετα στο έμβολο και στην ατμόσφαιρα, ενώ το έργο που αναπαρίσταται από την τριγωνική επιφάνεια (περιοχή II) παράγεται αντίθετα προς το ελατήριο. Επομένως,

$$W_{\text{ελατ.}} = \frac{1}{2} [(320 - 200) \text{ kPa}] (0,05 \text{ m}^3) \left( \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 3 \text{ kJ}$$

**Συζήτηση** Το αποτέλεσμα αυτό θα μπορούσε να ληφθεί από τη σχέση

$$W_{\text{ελατ.}} = \frac{1}{2} k (x_2^2 - x_1^2) (150 \text{ kN/m}) [(0,2 \text{ m})^2 - 0^2] \left( \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 3 \text{ kJ}$$

## 4.2 Ενεργειακό Ισοζύγιο Κλειστών Συστημάτων

Το ενεργειακό ισοζύγιο για οποιοδήποτε σύστημα υφίσταται οποιαδήποτε διεργασία διατυπώθηκε ως (βλ. Κεφάλαιο 2)

$$\underbrace{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}_{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\text{Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας}} \quad (\text{kJ}) \quad (4.11)$$

ή στη μορφή ρυθμού μεταβολής, ως

## 4.2 Ενεργειακό Ισοζύγιο Κλειστών Συστημάτων

Το ενεργειακό ισοζύγιο για οποιοδήποτε σύστημα υφίσταται οποιαδήποτε διεργασία διατυπώθηκε ως (βλ. Κεφάλαιο 2)

$$\underbrace{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά} \\ \text{ενέργειας μέσω θερμότητας,} \\ \text{έργου, και μάζας}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\substack{\text{Μεταβολή εσωτερικής,} \\ \text{κινητικής, δυναμικής κλπ.} \\ \text{ενέργειας}} \quad (\text{kJ}) \quad (4.11)$$

ή στη μορφή **ρυθμού μεταβολής**, ως

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{\frac{dE_{system}}{dt}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας}} \quad (\text{kW}) \quad (4.12)$$

Για σταθερούς ρυθμούς μεταβολής, οι συνολικές ποσότητες κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος  $\Delta t$  σχετίζονται με τις ποσότητες ανά μονάδα χρόνου ως

$$Q = \dot{Q}\Delta t, \quad W = \dot{W}\Delta t, \quad \text{και} \quad \Delta E = \frac{dE}{dt}\Delta t \quad (\text{kJ}) \quad (4.13)$$

Το ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να διατυπωθεί ως προς τη **μοναδιαία μάζα** ως

$$e_{in} - e_{out} = \Delta e_{system} \quad (\text{kJ/kg}), \quad (4.14)$$

σχέση που λαμβάνεται διαιρώντας όλες τις ποσότητες της Εξίσωσης 4.11 με τη μάζα  $m$  του συστήματος. Το ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί επίσης να εκφραστεί σε διαφορική μορφή ως

$$\delta E_{in} - \delta E_{out} = dE_{system} \quad \text{ή} \quad \delta e_{in} - \delta e_{out} = de_{system} \quad (4.15)$$

Για ένα κλειστό σύστημα που υποβάλλεται σε έναν **κύκλο**, η αρχική και η τελική του κατάσταση ταυτίζονται και επομένως  $\Delta E_{system} = E_2 - E_1 = 0$ . Τότε, το ενεργειακό ισοζύγιο για έναν κύκλο απλοποιείται σε  $E_{in} - E_{out} = 0$  ή  $E_{in} = E_{out}$ . Παρατηρώντας ότι ένα κλειστό σύστημα δεν εμπεριέχει ροή μάζας διαμέσου των ορίων του, το ενεργειακό ισοζύγιο ενός κύκλου μπορεί να εκφραστεί σε όρους αλληλεπίδρασης θερμότητας και έργου ως

$$W_{ol,out} = Q_{ol,in} \quad \text{ή} \quad \dot{W}_{ol,out} = \dot{Q}_{ol,in} \quad (\text{ανά κύκλο}) \quad (4.16)$$

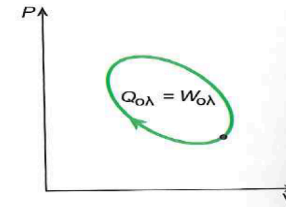
Αυτό σημαίνει ότι το συνολικό έργο εξόδου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ισούται με τη συνολική θερμότητα εισόδου (Σχήμα 4-11).

Οι σχέσεις του ενεργειακού ισοζυγίου (ή του πρώτου νόμου) που δόθηκαν ήδη είναι διαισθητικής φύσεως και εύκολες στη χρήση τους, όταν είναι γνωστά τα μέτρα και οι κατευθύνσεις των μεταφοράς θερμότητας και έργου. Ωστόσο, όταν πραγματοποιείται μια γενική αναλυτική μελέτη ή επίλυση ενός προβλήματος που εμπεριέχει μια άγνωστη αλληλεπίδραση θερμότητας ή έργου, χρειάζεται να υποθέσουμε μια κατεύθυνση για τις αλληλεπιδράσεις θερμότητας και έργου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η συνήθης πρακτική είναι να χρησιμοποιούμε τη σύμβαση προσήμου της κλασσικής θερμοδυναμικής και να υποθέτουμε ότι η θερμότητα μεταφέρεται *προς το σύστημα* (θερμότητα εισόδου) σε ποσότητα  $Q$  ενώ το έργο που παράγεται από το *σύστημα* (έργο εξόδου) σε ποσότητα  $W$ , και στη συνέχεια να επιλύσουμε το πρόβλημα. Στην περίπτωση αυτή, η σχέση για το ενεργειακό ισοζύγιο για ένα κλειστό σύστημα γίνεται

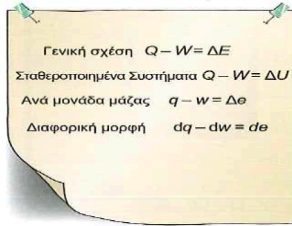
$$Q_{ol,in} - W_{ol,out} = \Delta E_{system} \quad \text{ή} \quad Q - W = \Delta E \quad (4.17)$$

όπου  $Q = Q_{ol,in} = Q_{in} - Q_{out}$  είναι η *συνολική θερμότητα εισόδου* και  $W = W_{ol,out} = W_{out} - W_{in}$  είναι το *συνολικό έργο εξόδου*. Εάν λάβουμε μια αρνητική ποσότητα για τη θερμότητα  $Q$ , απλά σημαίνει ότι η υποθεθείσα κατεύθυνση για τη συγκεκριμένη ποσότητα είναι λανθασμένη και θα πρέπει να αντιστραφεί. Διάφορες μορφές αυτής της «παραδοσιακής» σχέσης του πρώτου νόμου για κλειστά συστήματα δίνονται στο Σχήμα 4-12.

Ο πρώτος νόμος δεν μπορεί να αποδειχθεί μαθηματικά, ωστόσο δεν είναι γνωστή κάποια διεργασία στη φύση που έχει παραβιάσει τον πρώτο νόμο, και αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μία επαρκής απόδειξη. Σημειώστε, ότι εάν ήταν δυνατόν να αποδείξουμε τον πρώτο νόμο με βάση κάποιες φυσικές αρχές, τότε αυτός θα αποτελούσε μια συνέπεια αυτών των αρχών αντί να αποτελεί ο ίδιος ένα θεμελιώδη νόμο της φύσης.



**Σχήμα 4-11:**  
Για έναν κύκλο  $\Delta E = 0$ , επομένως  $Q = W$ . ( $Q_{ol} = W_{ol}$ )



**Σχήμα 4-12:** Διάφορες μορφές του πρώτου νόμου για κλειστά συστήματα.

Η θερμότητα και το έργο, ως ενεργειακές ποσότητες, δεν είναι τόσο διαφορετικές και πιθανώς να έχετε αναρωτηθεί για ποιόν λόγο εξακολουθούμε να τις διακρίνουμε. Μετά από όλα αυτά, η μεταβολή στο ενεργειακό περιεχόμενο ενός συστήματος ισούται με την ποσότητα της ενέργειας που διαπερνά τα όρια του συστήματος και δεν έχει καμιά διαφορά εάν η ενέργεια διαπερνά τα όρια ως θερμότητα ή έργο. Φαίνεται ότι οι σχέσεις του πρώτου νόμου θα μπορούσαν να είναι πολύ απλούστερες εάν υπήρχε μια ποσότητα που θα μπορούσε να ονομάζεται *ενεργειακή αλληλεπίδραση* για να αναπαριστά τόσο τη θερμότητα όσο και το έργο. Δικαιολογημένα, σύμφωνα με την άποψη του πρώτου νόμου, η θερμότητα και το έργο δεν παρουσιάζουν καμία διαφορά μεταξύ τους. Ωστόσο, σύμφωνα με την άποψη του δεύτερου νόμου, η θερμότητα και το έργο είναι πολύ διαφορετικά μεγέθη, όπως θα συζητηθεί σε επόμενα κεφάλαια.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-5: Ηλεκτρική Θέρμανση ενός Αερίου υπό Σταθερή Πίεση

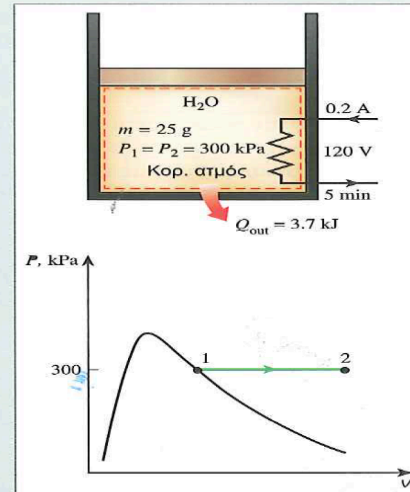
Μια διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου περιέχει 25 g κορεσμένων υδρατμών οι οποίοι διατηρούνται υπό σταθερή πίεση στα 300 kPa. Μια ηλεκτρική αντίσταση θέρμανσης εντός του κυλίνδρου τίθεται σε λειτουργία και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα 0,2 A για 5 min από μια πηγή τάσης 120 V. Ταυτόχρονα, λαμβάνει χώρα και απώλεια θερμότητας 3,7 kJ. (α) Να αποδείξετε ότι για ένα κλειστό σύστημα το έργο ογκομεταβολής  $W_b$ , και η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας  $\Delta U$  στη σχέση του πρώτου νόμου μπορούν να συνδυαστούν σε έναν όρο,  $\Delta H$ , για μια διεργασία υπό σταθερή πίεση. (β) να προσδιορίσετε την τελική θερμοκρασία των υδρατμών.

**Λύση:** Κορεσμένοι υδρατμοί εντός διάταξης εμβόλου - κυλίνδρου εκτονώνονται υπό σταθερή πίεση, ως αποτέλεσμα θέρμανσής τους. Ζητείται να δειχθεί ότι  $\Delta U + W_b = \Delta H$  και να προσδιοριστεί η τελική θερμοκρασία.

**Παραδοχές 1** Το δοχείο είναι ένα σταθεροποιημένο σύστημα και επομένως οι μεταβολές της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας είναι μηδενικές,  $\Delta E_{κιν} = \Delta E_{δυν} = 0$ . Επομένως  $\Delta E = \Delta U$  και η εσωτερική ενέργεια είναι η μόνη μορφή ενέργειας του συστήματος που μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας. **2** Οι ηλεκτρικοί αγωγοί αποτελούν ένα πολύ μικρό μέρος του συστήματος και επομένως η μεταβολή ενέργειας των αγωγών μπορεί να αγνοηθεί.

**Ανάλυση** Θεωρούμε ως σύστημα τα περιεχόμενα του κυλίνδρου, συμπεριλαμβανομένων των αγωγών της ηλεκτρικής αντίστασης (Σχήμα 4-13). Αυτό είναι ένα *κλειστό σύστημα*, εφόσον δεν παρατηρείται μεταφορά μάζας διαμέσου των ορίων του συστήματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Παρατηρούμε ότι μια τέτοια διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου τυπικά περιλαμβάνει ένα κινούμενο όριο και κατά συνέπεια έργο ογκομεταβολής,  $W_b$ . Η πίεση παράμεινε σταθερή κατά τη διάρκεια της διεργασίας και επομένως  $P_2 = P_1$ . Επίσης υπάρχει απώλεια θερμότητας και ηλεκτρικό έργο  $W_e$  που παράγεται επάνω στο σύστημα.

(α) Αυτό το τμήμα της λύσης εμπεριέχει μια γενική ανάλυση για ένα κλειστό σύστημα που υφίσταται μια ψευδοστατική διεργασία υπό σταθερή πίεση, και επομένως θεωρούμε ένα γενικευμένο κλειστό σύστημα. Λαμβάνουμε ότι η κατεύθυνση της μεταφοράς θερμότητας  $Q$  είναι προς το σύστημα, και ότι το έργο  $W$  παράγεται από το σύστημα. Επιπλέον, εκφράζουμε το έργο ως το άθροισμα του έργου ογκομεταβολής και άλλων μορφών έργου (όπως είναι το ηλεκτρικό έργο και το αξονικό έργο). Τότε, το ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να εκφράζεται ως



**Σχήμα 4-13:** Σχηματική αναπαράσταση και διάγραμμα  $P-V$  του Παραδείγματος 4-5.

$$\frac{E_{in} - E_{out}}{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \frac{\Delta E_{system}}{\text{Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας}}$$

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

$$Q - W = \Delta U + \cancel{\Delta E_{\text{κιν}}^0} + \cancel{\Delta E_{\text{δυν}}^0}$$

$$Q - W_{\text{other}} - W_b = U_2 - U_1$$

Για μια διεργασία υπό σταθερή πίεση, το έργο ογκομεταβολής δίνεται ως  $W_b = P_0 (V_2 - V_1)$ . Αντικαθιστώντας τη σχέση αυτή στην προηγούμενη έκφραση, έχουμε

$$Q = W_{\text{other}} - P_0 (V_2 - V_1) = U_2 - U_1$$

Ωστόσο

$$P_0 = P_2 = P_1 \rightarrow Q - W_{\text{other}} = (U_2 + P_2 V_2) - (U_1 + P_1 V_1)$$

Επίσης  $H = U + PV$  και επομένως

$$Q - W_{\text{other}} = H_2 - H_1 \quad (4.18)$$

που είναι η επιθυμητή σχέση (Σχήμα 4-14). Η εξίσωση αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη κατά την ανάλυση κλειστών συστημάτων στα οποία λαμβάνει χώρα μια **ψευδοστατική διεργασία υπό σταθερή πίεση**, αφού τότε το έργο ογκομεταβολής λαμβάνεται αυτόματα υπ' όψιν από τους όρους της ενθαλπίας, χωρίς να απαιτείται να προσδιοριστεί ξεχωριστά.

(β) Η μόνη διαφορετική μορφή έργου στην περίπτωση αυτή είναι το ηλεκτρικό έργο, που μπορεί να προσδιοριστεί ως

$$W_e = VI \Delta t = (120 \text{ V}) (0,2 \text{ A}) (300 \text{ s}) \left( \frac{1 \text{ kJ/s}}{1.000 \text{ VA}} \right) = 7,2 \text{ kJ}$$

Κατάσταση 1:  $P_1 = 300 \text{ kPa}$   
 κορεσμένος ατμός }  $h_1 = h_{g@300 \text{ kPa}} = 2.724,9 \text{ kJ/kg}$  (Πίνακας Α-5)

Η ενθαλπία στην τελική κατάσταση μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα από την Εξίσωση 4.18 εκφράζοντας τη μεταφορά θερμότητας από το σύστημα και το έργο που παράγεται επάνω στο σύστημα ως αρνητικές ποσότητες (αφού οι κατευθύνσεις τους είναι αντίθετες από αυτές που είχαν αρχικά υποθεθεί). Εναλλακτικά, μπορούμε να χρησιμοποιούμε τη γενική σχέση του ενεργειακού ισοζυγίου με την απλοποίηση ότι το έργο ογκομεταβολής λαμβάνεται αυτόματα υπ' όψιν εάν αντικαθιστώντας το  $\Delta U$  με το  $\Delta H$  για μια διεργασία εκτόνωσης ή συμπίεσης υπό σταθερή πίεση

$$\underbrace{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}_{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\text{Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας}}$$

$$W_{e,\text{in}} - Q_{\text{out}} - W_b = \Delta U$$

$$W_{e,\text{in}} - Q_{\text{out}} = \Delta H = m (h_2 - h_1) \quad (\text{εφόσον } P = \text{σταθ.})$$

$$7,2 \text{ kJ} - 3,7 \text{ kJ} = (0,025 \text{ kg}) (h_2 - 2.724,9) \text{ kJ/kg}$$

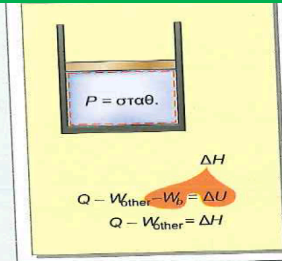
$$h_2 = 2.864,9 \text{ kJ/kg}$$

Τώρα η τελική κατάσταση είναι πλήρως καθορισμένη, αφού γνωρίζουμε τόσο την πίεση όσο και την ενθαλπία. Η θερμοκρασία στην κατάσταση αυτή είναι

Κατάσταση 2:  $P_2 = 300 \text{ kPa}$   
 $h_2 = 2.864,9 \text{ kJ/kg}$  }  $T_2 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  (Πίνακας Α-6)

Επομένως, στο τέλος αυτής της διεργασίας, ο υδρατμός θα βρίσκεται στους  $200^\circ\text{C}$ .

**Συζήτηση** Κυριολεκτώντας, η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας του ατμού σε αυτήν τη διεργασία δεν είναι μηδενική, αφού το κέντρο βάρους του ατμού ανέβηκε σε κάποιο βαθμό. Υποθέτοντας μια μεταβολή



**Σχήμα 4-14:** Για ένα κλειστό σύστημα που υφίσταται μια ψευδοστατική, υπό σταθερή πίεση διεργασία,  $\Delta U + W_b = \Delta H$ . Παρατηρείστε ότι η σχέση αυτή  $\Delta EN$  ισχύει για κλειστά συστήματα στα οποία, κατά τη διάρκεια της διεργασίας, η πίεση  $\Delta EN$  παραμένει σταθερή.

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

στην ανυψωση του εμβόλου ίση με 1 m (μια μάλλον ακραία περίπτωση), η μεταβολή στη δυναμική ενέργεια του υδρατμού θα ήταν 0,0002 kJ, που είναι εξαιρετικά μικρή, συγκρινόμενη με τους άλλους όρους στη σχέση του πρώτου νόμου. Επομένως, σε προβλήματα αυτού του τύπου, παραλείπεται πάντοτε ο όρος της δυναμικής ενέργειας.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-6: Απρόσκοπη Διαστολή του Νερού

Ένα άκαμπτο δοχείο διαιρείται σε δύο ίσα τμήματα μέσω ενός χωρίσματος. Αρχικά, η μία πλευρά του δοχείου περιέχει 5 kg νερού σε 25°C και 200 kPa ενώ η άλλη πλευρά έχει εκκενωθεί. Στη συνέχεια το χωρίσμα αφαιρείται και το νερό εκτονώνεται καταλαμβάνοντας ολόκληρο τον όγκο του δοχείου. Το νερό αφήνεται να ανταλλάξει θερμότητα με το περιβάλλον του, μέχρι η θερμοκρασία στο δοχείο να επανέλθει στην αρχική τιμή των 25°C. Να προσδιορίσετε (α) τον όγκο του δοχείου, (β) την τελική πίεση, και (γ) τη μεταφορά θερμότητας για τη διεργασία αυτή.

**Αδση:** Το ήμισυ ενός άκαμπτου δοχείου γεμίζει με υγρό νερό, ενώ το άλλο μισό εκκενώνεται. Το χωρίσμα ανάμεσα στα δύο τμήματα αφαιρείται και το νερό αφήνεται να εκτονωθεί και να καταλάβει ολόκληρο τον όγκο του δοχείου ενώ η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή. Να προσδιοριστούν ο όγκος του δοχείου, η τελική πίεση, και η μεταφερόμενη θερμότητα.

**Παραδοχές 1** Το σύστημα είναι σταθεροποιημένο και επομένως οι μεταβολές της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας είναι μηδενικές,  $\Delta E_{κιν} = \Delta E_{δυν} = 0$  και  $\Delta E = \Delta U$ . 2 Η κατεύθυνση της μεταφοράς θερμότητας είναι προς το σύστημα (απολαβή θερμότητας,  $Q_{in}$ ). Ένα αρνητικό πρόσημο για την  $Q_{in}$  υποδηλώνει ότι η υποθετίσα κατεύθυνση είναι λανθασμένη και επομένως αυτή είναι μια απώλεια θερμότητας. 3 Ο όγκος του άκαμπτου δοχείου παραμένει σταθερός και συνεπώς δεν υπάρχει μεταφορά ενέργειας με τη μορφή έργου ογκομεταβολής. 4 Δεν εμπειρεύεται ηλεκτρικό, αξονικό ή οποιαδήποτε άλλη μορφή έργου.

**Ανάλυση** Ως σύστημα θεωρούνται τα περιεχόμενα του δοχείου, συμπεριλαμβανομένου και του κενού χώρου (Σχήμα 4-15). Αυτό είναι ένα κλειστό σύστημα, αφού κατά τη διάρκεια της διεργασίας δεν υπάρχει μεταφορά μάζας διαμέσου των ορίων του συστήματος. Παρατηρούμε ότι μετά την απομάκρυνση του χωρίσματος το νερό καταλαμβάνει ολόκληρο το διαθέσιμο χώρο του δοχείου (ενδεχομένως ως μίγμα υγρού και ατμού).

(α) Αρχικά το νερό εντός του δοχείου βρίσκεται στην κατάσταση συμπιεσμένου υγρού, αφού η πίεση του (200 kPa) είναι μεγαλύτερη της πίεσης κορεσμού στους 25°C (η οποία είναι 3,1698 kPa). Προσεγγίζοντας το συμπιεσμένο υγρό ως κορεσμένο υγρό για τη δοθείσα θερμοκρασία, βρίσκουμε

$$v_1 = v_{f@25^\circ\text{C}} = 0,001003 \text{ m}^3 / \text{kg} = 0,001 \text{ m}^3 / \text{kg} \quad (\text{Πίνακας Α-4})$$

Επομένως, ο αρχικός όγκος του νερού είναι

$$V_1 = m v_1 = (5 \text{ kg})(0,001 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0,005 \text{ m}^3$$

Ο συνολικός όγκος του δοχείου είναι διπλάσιος του  $V_1$

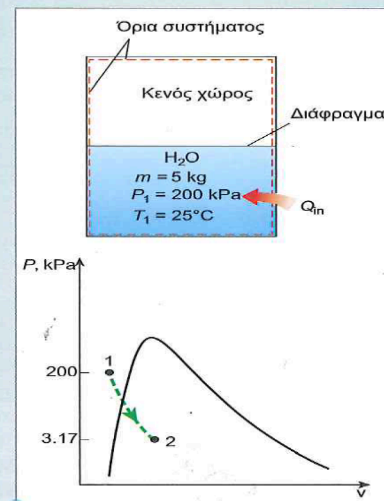
$$V_{\text{tank}} = 2 \cdot 0,005 \text{ m}^3 = \mathbf{0,01 \text{ m}^3}$$

(β) Στην τελική κατάσταση, ο ειδικός όγκος του νερού είναι

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{0,01 \text{ m}^3}{5 \text{ kg}} = 0,002 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

τιμή η οποία είναι διπλάσια από την αρχική τιμή του ειδικού όγκου. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο εφόσον ο όγκος διπλασιάζεται ενώ η μάζα παραμένει σταθερή.

$$\text{Στους } 25^\circ\text{C}: \quad v_f = 0,001003 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ και } v_g = 43,340 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{Πίνακας Α-4})$$



**Σχήμα 4-15:** Σχηματική αναπαράσταση και διάγραμμα P-V του Παραδείγματος 4-6.



Εφόσον  $v_f < v_2 < v_g$ , το νερό στην τελική κατάσταση είναι ένα κορεσμένο μίγμα υγρού-ατμών, και συνεπώς η πίεση του είναι η πίεση κορεσμού στους 25°C:

$$P_2 = P_{\text{sat}@25^\circ\text{C}} = 3,1698 \text{ kPa} \quad (\text{Πίνακας A-4})$$

(γ) Υπό τις διατυπωθείσες παραδοχές και παρατηρήσεις, το ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος μπορεί να εκφραστεί ως

$$\frac{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}{\substack{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας} \\ \text{μέσω θερμότητας, έργου, και} \\ \text{μάζας}}} = \frac{\Delta E_{\text{system}}}{\substack{\text{Μεταβολή εσωτερικής,} \\ \text{κινητικής, δυναμικής κλπ.} \\ \text{ενέργειας}}$$

$$Q_{\text{in}} = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

Παρατηρείστε ότι παρ' όλο που το νερό εκτονώνεται κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας, το επιλεγμένο σύστημα περιλαμβάνει μόνο σταθερά όρια (οι διακεκομμένες γραμμές) και επομένως το έργο ογκομεταβολής είναι μηδέν (Σχήμα 4-16). Τότε  $W = 0$  εφόσον το σύστημα δεν εμπεριέχει καμία άλλη μορφή έργου. (Μπορείτε να καταλήξετε στο ίδιο συμπέρασμα, θεωρώντας μόνο το νερό ως σύστημα.) Αρχικά,

$$u_1 \equiv u_{f@25^\circ\text{C}} = 104,83 \text{ kJ/kg}$$

Η ποιότητα σε αυτήν την τελική κατάσταση προσδιορίζεται από την πληροφορία που δίνει ο ειδικός όγκος:

$$x_2 = \frac{v_2 - v_f}{v_{fg}} = \frac{0,002 - 0,001}{43,34 - 0,001} = 2,3 \times 10^{-5}$$

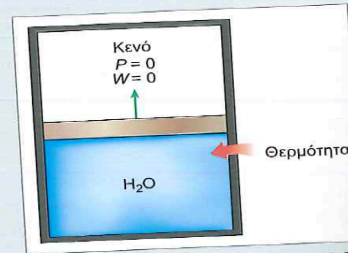
Επομένως,

$$u_2 = u_f + x_2 u_{fg} = 104,83 \text{ kJ/kg} + (2,3 \times 10^{-5})(2.304,3 \text{ kJ/kg}) = 104,88 \text{ kJ/kg}$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει

$$Q_{\text{in}} = (5 \text{ kg}) [(104,88 - 104,83) \text{ kJ/kg}] = 0,25 \text{ kJ}$$

**Συζήτηση** Το θετικό πρόσημο δείχνει ότι η υποθεθείσα κατεύθυνση είναι σωστή και μεταφέρεται θερμότητα στο νερό.



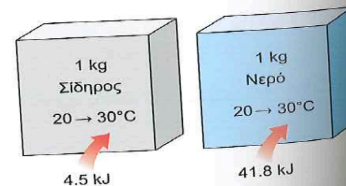
Σχήμα 4-16: Η εκτόνωση στο κενό δεν εμπεριέχει έργο και επομένως ούτε μεταφορά ενέργειας

### 4.3 Ειδικές Θερμότητες

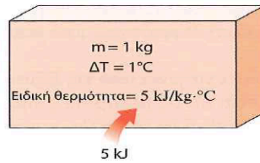
Από την εμπειρία μας γνωρίζουμε ότι απαιτούνται διαφορετικές ποσότητες ενέργειας για να ανυψώσουμε τη θερμοκρασία ίδιας ποσότητας μάζας, αλλά διαφορετικών ουσιών, κατά έναν βαθμό. Για παράδειγμα, απαιτούνται περίπου 4,5 kJ ενέργειας για την άνοδο της θερμοκρασίας μιας μάζας 1 kg σιδήρου από τους 20°C στους 30°C, ενώ για την ίδια άνοδο της θερμοκρασίας μιας ίσης ποσότητας μάζας νερού, απαιτείται εννεαπλάσια ενέργεια (ακριβής τιμή: 41,8 kJ) (βλ. Σχήμα 4-17). Επομένως, είναι επιθυμητό να έχουμε μια ιδιότητα η οποία θα μας επιτρέπει να συγκρίνουμε τις δυνατότητες ενεργειακής αποθήκευσης των διαφόρων ουσιών. Μια τέτοια ιδιότητα είναι η ειδική θερμότητα.

Η **ειδική θερμότητα** ορίζεται ως η ενέργεια που απαιτείται για την άνοδο της θερμοκρασίας της μοναδιαίας μάζας μιας ουσίας κατά έναν βαθμό (Σχήμα 4-18). Γενικά, η ενέργεια αυτή εξαρτάται από τον τρόπο εκτέλεσης της διεργασίας. Στη θερμοδυναμική, ενδιαφερόμαστε για δύο τύπους ειδικής θερμότητας: **ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο  $c_v$**  και η **ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση  $c_p$** .

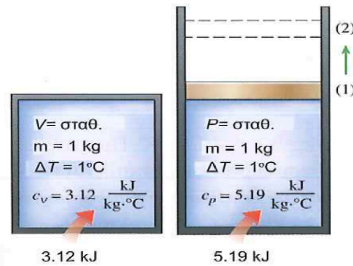
Σύμφωνα με τους φυσικούς νόμους, η ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο  $c_v$  μπορεί να θεωρηθεί ως η ενέργεια που απαιτείται για την



Σχήμα 4-17: Για την άνοδο κατά το ίδιο ποσό της θερμοκρασίας διαφορετικών σωμάτων, απαιτούνται διαφορετικά ποσά ενέργειας.



**Σχήμα 4-18:**  
Η ειδική θερμότητα είναι η ενέργεια που απαιτείται για την άνοδο της θερμοκρασίας μιας μοναδιαίας μάζας κατά έναν βαθμό, με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο.



**Σχήμα 4-19:**  
Ειδικές θερμότητες υπό σταθερό όγκο  $c_v$  και υπό σταθερή πίεση  $c_p$  (οι τιμές αναφέρονται στο αέριο ήλιο).

Παρόμοια, μπορεί να ληφθεί μια έκφραση για την ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση  $c_p$  θεωρώντας μια διεργασία εκτόνωσης ή συμπίεσης υπό σταθερή πίεση. Προκύπτει

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (4.20)$$

Οι Εξισώσεις 4.19 και 4.20 είναι οι εξισώσεις ορισμού των ειδικών θερμότητων  $c_v$  και  $c_p$  και η ερμηνεία τους δίνεται στο Σχήμα 4.20.

Σημειώστε ότι οι ειδικές θερμότητες  $c_v$  και  $c_p$  εκφράζονται ως συναρτήσεις άλλων ιδιοτήτων και επομένως πρέπει και αυτές να θεωρούνται ως ιδιότητες. Όπως κάθε άλλη ιδιότητα, οι ειδικές θερμότητες μιας ουσίας εξαρτώνται από την κατάσταση που, γενικά, καθορίζεται από δύο ανεξάρτητες μεταξύ τους εντατικές ιδιότητες.



**Σχήμα 4-20:**  
Ακριβείς ορισμοί των  $c_v$  και  $c_p$ .

άνοδο της θερμοκρασίας μιας μοναδιαίας μάζας κατά ένα βαθμό, καθώς ο όγκος διατηρείται σταθερός. Η ενέργεια η οποία απαιτείται για να κάνουμε το ίδιο καθώς η πίεση διατηρείται σταθερή είναι η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση  $c_p$ . Αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 4-19. Η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση  $c_p$  είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την  $c_v$ , επειδή υπό σταθερή πίεση το σύστημα αφήνεται να εκτονωθεί και η ενέργεια για το έργο εκτόνωσης θα πρέπει επίσης να προσφερθεί στο σύστημα.

Ας προσπαθήσουμε τώρα να εκφράσουμε τις ειδικές θερμότητες ως συνάρτηση άλλων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων. Κατ' αρχήν, θεωρούμε μια ορισμένη μάζα εντός ενός σταθεροποιημένου κλειστού συστήματος, η οποία υφίσταται μια διεργασία υπό σταθερό όγκο (και επομένως δεν εμπιρεύεται κάποιο έργο εκτόνωσης ή συμπίεσης). Η αρχή διατήρησης της ενέργειας,  $e_{in} - e_{out} = \Delta e_{system}$ , για αυτήν τη διεργασία, μπορεί να εκφραστεί στη διαφορική της μορφή ως

$$\delta e_{in} - \delta e_{out} = du$$

Το αριστερό μέλος αυτής της εξίσωσης αναπαριστά το συνολικό ποσό ενέργειας το οποίο μεταφέρεται στο σύστημα. Από τον ορισμό της  $c_v$ , η ενέργεια αυτή θα πρέπει να ισούται με  $c_v dT$ , όπου  $dT$  είναι η διαφορική μεταβολή της θερμοκρασίας. Επομένως,

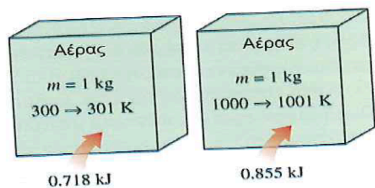
$$c_v dT = du \text{ υπό σταθερό όγκο}$$

ή

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (4.19)$$

Δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται για την άνοδο της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό είναι διαφορετική για διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις (Σχήμα 4-21). Αλλά αυτή η διαφορά δεν είναι συνήθως πολύ μεγάλη.

Από τις Εξισώσεις 4.19 και 4.20 μπορούν να διατυπωθούν κάποιες παρατηρήσεις. Κατ' αρχήν οι εξισώσεις αυτές είναι *σχέσεις μεταξύ ιδιοτήτων* και ως τέτοιες είναι *ανεξάρτητες* από το είδος των διεργασιών. Ισχύουν για *κάθε* ουσία, η οποία υπόκειται σε μια οποιαδήποτε διεργασία. Η μόνη σχέση που έχει η  $c_v$  με μια διεργασία υπό σταθερό όγκο είναι ότι η  $c_v$  συμβαίνει να είναι η ενέργεια που μεταφέρεται σε ένα σύστημα κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σταθερού όγκου ανά μονάδα μάζας, ανά βαθμό ανόδου της θερμοκρασίας. Αυτός είναι ο τρόπος μέσω του οποίου προσδιορίζονται οι τιμές της  $c_v$ . Παρόμοια, η ενέργεια που μεταφέρεται σε ένα σύστημα ανά μονάδα μάζας ανά μονάδα θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σταθερής πίεσης συμβαίνει να είναι ίση με  $c_p$ . Αυτός είναι ο τρόπος μέσω του οποίου



**Σχήμα 4-21:**  
Η ειδική θερμότητα μιας ουσίας μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία.

μπορούν να προσδιορίζονται οι τιμές της  $c_p$  και επίσης εξηγεί την προέλευση του ονόματος *ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση*.

Μια άλλη παρατήρηση που μπορεί να γίνει από τις Εξισώσεις 4.19 και 4.20 είναι ότι η  $c_v$  σχετίζεται με τις μεταβολές της *εσωτερικής ενέργειας*, ενώ η  $c_p$  με τις μεταβολές της *ενθαλπίας*. Στην πραγματικότητα, θα ήταν πιο κατάλληλος ο ορισμός της  $c_v$  ως η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας μιας ουσίας ανά μονάδα μεταβολής της θερμοκρασίας, υπό σταθερό όγκο. Παρόμοια η  $c_p$  μπορεί να οριστεί ως η μεταβολή της ενθαλπίας μιας ουσίας ανά μονάδα μεταβολής της θερμοκρασίας, υπό σταθερή πίεση. Με άλλα λόγια, η  $c_v$  αποτελεί ένα μέτρο της μεταβολής της εσωτερικής

ενέργειας με τη θερμοκρασία, και η  $c_p$  είναι ένα μέτρο της μεταβολής της ενθαλπίας μιας ουσίας με τη θερμοκρασία.

Τόσο η εσωτερική ενέργεια, όσο και η ενθαλπία μιας ουσίας μπορεί να μεταβληθεί, μέσω μεταφοράς ενέργειας σε οποιαδήποτε μορφή, με τη θερμότητα να είναι μόνο μία από αυτές. Επομένως, ο όρος *ειδική ενέργεια* είναι μάλλον καταλληλότερος από τον όρο *ειδική θερμότητα*, ο οποίος υποδηλώνει ότι η ενέργεια μεταφέρεται (και αποθηκεύεται) με τη μορφή θερμότητας.

Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μονάδα για τις ειδικές θερμότητες είναι  $\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ , ή  $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ . Παρατηρείστε ότι αυτές οι δύο μονάδες είναι *ταυτόσημες*, αφού  $\Delta T(^\circ\text{C}) = \Delta T(\text{K})$  και μια θερμοκρασιακή μεταβολή κατά  $1^\circ\text{C}$  είναι ισοδύναμη με μια μεταβολή κατά  $1\text{ K}$ . Οι ειδικές θερμότητες δίνονται μερικές φορές σε *γραμμωμοριακή βάση*. Τότε δηλώνονται με τα σύμβολα  $\bar{c}_v$  και  $\bar{c}_p$  και έχουν τη μονάδα  $\text{kJ/kmol}\cdot^\circ\text{C}$  και  $\text{kJ/kmol}\cdot\text{K}$ .

## 4.4 Εσωτερική Ενέργεια, Ενθαλπία και Ειδικές Θερμότητες Ιδανικών Αερίων

Ορίζουμε ένα ιδανικό αέριο ως ένα αέριο του οποίου η θερμοκρασία, η πίεση και ο ειδικός όγκος σχετίζονται με την εξίσωση

$$Pv = RT$$

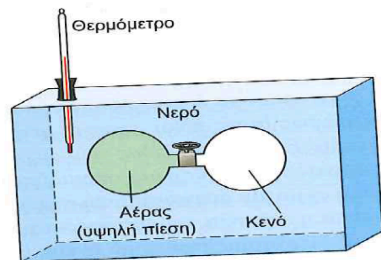
Έχει αποδειχθεί μαθηματικά (Κεφάλαιο 12) και πειραματικά (Joule, 1843), ότι για ένα ιδανικό αέριο η εσωτερική ενέργεια είναι συνάρτηση μόνον της θερμοκρασίας. Δηλαδή,

$$u = u(T) \tag{4.21}$$

Στα κλασικά του πειράματα, ο Joule βύθισε δύο δοχεία συνδεδεμένα μέσω ενός σωλήνα και μιας στρόφιγγας εντός μιας υδάτινης δεξαμενής, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4-22. Αρχικά, το ένα δοχείο περιείχε αέρα σε υψηλή πίεση, ενώ το άλλο δοχείο ήταν κενό. Μετά την επίτευξη της θερμικής ισορροπίας, άνοιξε τη στρόφιγγα και άφησε τον αέρα να περάσει από το ένα δοχείο στο άλλο, μέχρι να επέλθει εξίσωση πίεσεων. Ο Joule δεν παρατήρησε μεταβολή στη θερμοκρασία της υδάτινης δεξαμενής και υπέθεσε ότι δεν έλαβε χώρα κάποια μεταφορά θερμότητας, από ή προς τον αέρα. Εφόσον δεν υπήρχε επίσης παραγόμενο έργο, συμπέρανε ότι η εσωτερική ενέργεια του αέρα παρέμεινε αμετάβλητη, αν και ο όγκος και η πίεση άλλαξαν. Επομένως, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η εσωτερική ενέργεια είναι συνάρτηση μόνον της θερμοκρασίας και όχι της πίεσης ή του ειδικού όγκου. (Ο Joule αργότερα απέδειξε ότι για αέρια που αποκλίνουν σημαντικά από τη συμπεριφορά των ιδανικών αερίων, η εσωτερική ενέργεια δεν είναι πλέον συνάρτηση αποκλειστικά και μόνο της θερμοκρασίας).

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της ενθαλπίας και την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων έχουμε

$$\left. \begin{aligned} h &= u + Pv \\ Pv &= RT \end{aligned} \right\} \Rightarrow h = u + RT$$



**Σχήμα 4-22:**  
Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποίησε ο Joule.

Εφόσον η  $R$  είναι σταθερή και  $u = u(T)$ , προκύπτει ότι η ενθαλπία ενός ιδανικού αερίου είναι και αυτή συνάρτηση μόνον της θερμοκρασίας

$$h = h(T) \quad (4.22)$$

Εφόσον οι  $u$  και  $h$  ενός ιδανικού αερίου εξαρτώνται μόνον από τη θερμοκρασία, οι ειδικές θερμότητες  $c_v$  και  $c_p$  θα εξαρτώνται και αυτές το πολύ από τη θερμοκρασία και μόνον. Επομένως, σε μια δεδομένη θερμοκρασία, οι ιδιότητες  $u$ ,  $h$ ,  $c_v$  και  $c_p$  ενός ιδανικού αερίου έχουν σταθερές τιμές, ανεξάρτητες από τον ειδικό όγκο ή την πίεση (Σχήμα 4-23). Άρα, για τα ιδανικά αέρια, οι μερικές παράγωγοι των Εξισώσεων 4.19 και 4.20 μπορούν να αντικατασταθούν από συνήθεις παραγώγους. Τότε οι διαφορικές μεταβολές στην εσωτερική ενέργεια και στην ενθαλπία ενός ιδανικού αερίου μπορούν να γραφούν ως

$$du = c_v(T) dT \quad (4.23)$$

και

$$dh = c_p(T) dT \quad (4.24)$$

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ή της ενθαλπίας ενός ιδανικού αερίου κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας από την κατάσταση την 1 στην κατάσταση 2, προσδιορίζεται ολοκληρώνοντας αυτές τις εξισώσεις:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T) dT \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4.25)$$

και

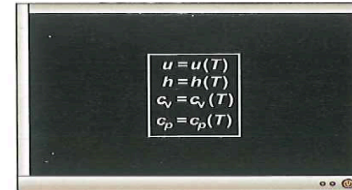
$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 c_p(T) dT \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4.26)$$

Για την πραγματοποίηση αυτών των ολοκληρώσεων, χρειάζεται να διαθέτουμε τις σχέσεις των  $c_v$  και  $c_p$  ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας.

Σε χαμηλές πιέσεις, όλα τα πραγματικά αέρια προσεγγίζουν τη συμπεριφορά των ιδανικών αερίων και επομένως οι ειδικές τους θερμότητες εξαρτώνται μόνον από τη θερμοκρασία. Οι ειδικές θερμότητες των πραγματικών αερίων σε χαμηλές πιέσεις ονομάζονται *ειδικές θερμότητες κατάστασης ιδανικού αερίου*, ή *ειδικές θερμότητες μηδενικής πίεσης*, και συμβολίζονται συνήθως ως  $c_{p0}$  και  $c_{v0}$ . Είναι διαθέσιμες ακριβείς αναλυτικές εκφράσεις για τις ειδικές θερμότητες κατάστασης ιδανικού αερίου, οι οποίες βασίζονται σε άμεσες μετρήσεις ή υπολογισμούς από τη στατιστική συμπεριφορά των μορίων και δίνονται ως πολυώνυμα τρίτου βαθμού στο Παράρτημα (Πίνακας A-2γ) για διάφορα αέρια. Στο Σχήμα 4-24 δίνεται ένα σχεδιάγραμμα τιμών  $\bar{c}_{p0}(T)$  για κάποια συνηθισμένα αέρια.

Η χρήση δεδομένων ειδικών θερμοτήτων κατάστασης ιδανικού αερίου περιορίζεται στις χαμηλές πιέσεις, αλλά αυτά τα δεδομένα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και σε σχετικά υψηλές πιέσεις, με μια αξιοσημείωτη ακρίβεια όσο τα αέρια δεν αποκλίνουν σημαντικά από τη συμπεριφορά ιδανικών αερίων.

Οι ολοκληρώσεις στις Εξισώσεις 4.25 και 4.26 μπορούν να πραγματοποιηθούν άμεσα, αλλά μάλλον είναι χρονοβόρες και επομένως χωρίς πρακτική αξία. Προκειμένου να αποφεύγονται τέτοιοι επίπονοι υπολογισμοί, δεδομένα  $u$  και  $h$  για ένα πλήθος αερίων έχουν οργανωθεί υπό μορφή πινάκων για μικρά διαστήματα θερμοκρασιών. Οι πίνακες αυτοί λαμβάνονται επιλέγοντας ένα αυθαίρετο σημείο αναφοράς και πραγματοποιώντας τις ολοκληρώσεις των Εξισώσεων 4.25 και 4.26, θεωρώντας την κατάσταση αναφοράς ως κατάσταση 1. Στους πίνακες των ιδανικών αερίων που δίνονται στο Παράρτημα, έχει επιλεγεί η τιμή 0 kelvin ως θερμοκρασία της κατάστασης αναφοράς, και η ενθαλπία και η εσωτερική ενέργεια σε αυτήν την κατάσταση αντιστοιχίζονται με μηδενικές τιμές (Σχήμα 4-25). Η επιλογή της κατάστασης αναφοράς δεν έχει καμία επίπτωση στους υπολογισμούς των  $\Delta u$  ή  $\Delta h$ . Τα δεδομένα των  $u$  και  $h$  για τον αέρα δίνονται σε kJ/kg (Πίνακας A-17) και συνήθως σε kJ/kmol για άλλα αέρια. Η μονάδα kJ/kmol είναι εξαιρετικά εύχρηστη κατά τη θερμοδυναμική ανάλυση των χημικών αντιδράσεων.



**Σχήμα 4-23:**

Για τα ιδανικά αέρια, οι ιδιότητες  $u$ ,  $h$ ,  $c_v$  και  $c_p$  μεταβάλλονται μόνον με τη θερμοκρασία.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-7: Αποτίμηση της Δυ ενός Ιδανικού Αερίου

Αέρας σε 300 K και 200 kPa θερμαίνεται υπό σταθερή πίεση μέχρι τους 600 K. Να προσδιορίσετε τη μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια του αέρα, ανά μονάδα μάζας, χρησιμοποιώντας (α) δεδομένα από τον πίνακα αέρα (Πίνακας A-17), (β) τη συναρτησιακή μορφή της ειδικής θερμότητας (Πίνακας A-2γ), και (γ) τις μέσες τιμές ειδικών θερμότητων (Πίνακας A-2β).

**Λύση:** Να προσδιοριστεί η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του αέρα με τρεις διαφορετικούς τρόπους.

**Παραδοχές** Σε συγκεκριμένες συνθήκες, ο αέρας μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ιδανικό αέριο, αφού βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία και χαμηλή πίεση, συγκριτικά με τις τιμές των αντίστοιχων ιδιοτήτων για το κρίσιμο σημείο του.

**Ανάλυση** Η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια Δυ των ιδανικών αερίων εξαρτάται μόνον από την αρχική και την τελική θερμοκρασία και όχι από τον τύπο της διεργασίας. Επομένως, η ακόλουθη λύση είναι έγκυρη για κάθε είδος διεργασίας.

(α) Ένας τρόπος προσδιορισμού της μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας του αέρα είναι η λήψη των τιμών της u σε θερμοκρασίες T<sub>1</sub> και T<sub>2</sub> από τον Πίνακα A-17 και η αφαίρεση τους

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{@ 300 \text{ K}} = 214,07 \text{ kJ/kg} \\ u_2 &= u_{@ 600 \text{ K}} = 434,78 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Επομένως

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (434,78 - 214,07) \text{ kJ/kg} = \mathbf{220,71 \text{ kJ/kg}}$$

(β) Η  $\bar{c}_p(T)$  του αέρα δίνεται στον Πίνακα A-2γ με τη μορφή ενός πολυωνόμου τρίτου βαθμού και εκφράζεται ως

$$\bar{c}_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

όπου  $a = 28,11$ ,  $b = 0,1967 \times 10^{-2}$ ,  $c = 0,4802 \times 10^{-5}$ , και  $d = -1,966 \times 10^{-9}$ . Από την Εξίσωση 4.30,

$$\bar{c}_v(T) = \bar{c}_p(T) - R_u = (a - R_u) + bT + cT^2 + dT^3$$

Από την Εξίσωση 4.25,

$$\Delta \bar{u} = \int_{T_1}^{T_2} \bar{c}_v(T) dT = \int_{T_1}^{T_2} [(a + R_u) + bT + cT^2 + dT^3] dT$$

Πραγματοποιώντας την ολοκλήρωση και αντικαθιστώντας τις τιμές, λαμβάνουμε

$$\Delta \bar{u} = 6,447 \text{ kJ / kmol}$$

Η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα μάζας προσδιορίζεται από τη διαίρεση της παραπάνω τιμής με τη γραμμομοριακή μάζα του αέρα (Πίνακας A-1):

$$\Delta u = \frac{\Delta \bar{u}}{M} = \frac{6,447 \text{ kJ / kmol}}{28,97 \text{ kg / kmol}} = \mathbf{222,5 \text{ kJ/kg}}$$

τιμή η οποία διαφέρει από την αναγραφόμενη στον Πίνακα κατά 0,8%.

(γ) Η μέση τιμή της ειδικής θερμότητας υπό σταθερό όγκο  $c_{v,avg}$  προσδιορίζεται από τον Πίνακα A-26 στη μέση θερμοκρασία των  $(T_1 + T_2)/2 = 450 \text{ K}$  ως

$$c_{v,avg} = c_{v@450 \text{ K}} = 0,733 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Επομένως,

$$\Delta u = c_{v,avg} (T_2 - T_1) = [0,733 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}](600 - 300) \text{ K} = 220 \text{ kJ/kg}$$

**Συζήτηση** Το τελευταίο αυτό αποτέλεσμα διαφέρει από την αναγραφόμενη στον Πίνακα τιμή (220,71 kJ/kg) μόνο κατά 0,4%. Αυτή η σύμπτωση τιμών δεν πρέπει να προκαλεί έκπληξη, αφού η παραδοχή ότι η  $c_v$  μεταβάλλεται γραμμικά με τη θερμοκρασία είναι λογική σε θερμοκρασιακά διαστήματα εύρους των λίγων μόνον εκατοντάδων βαθμών. Εάν είχαμε χρησιμοποιήσει την τιμή της  $c_v$  στη θερμοκρασία  $T_1 = 300 \text{ K}$  αντί της  $T_{avg}$ , το αποτέλεσμα θα ήταν 215,4 kJ/kg, που ενέχει σφάλμα περίπου 2%. Σφάλματα αυτού του μεγέθους είναι αποδεκτά για την πλειονότητα των εφαρμογών μηχανικής.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-8: Θέρμανση ενός Αερίου σε ένα Δοχείο μέσω Ανάδευσης

Ένα μονωμένο άκαμπτο δοχείο αρχικά περιέχει 0,7 kg ηλίου σε 27°C και 350 kPa. Ένας ελικοφόρος αναδευτήρας ονομαστικής ισχύος 0,015 kW τίθεται σε λειτουργία εντός του δοχείου για 30 min. Να προσδιορίσετε (α) την τελική θερμοκρασία και (β) την τελική πίεση του αερίου ηλίου.

**Λύση:** Αέριο ήλιον εντός άκαμπτου μονωμένου δοχείου αναδύεται μέσω ελικοφόρου αναδευτήρα. Να προσδιοριστούν η τελική θερμοκρασία και η τελική πίεση του ηλίου.

**Παραδοχές 1** Το ήλιον είναι ένα ιδανικό αέριο αφού βρίσκεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, συγκριτικά με την αντίστοιχη κρίσιμη τιμή των -268°C. **2** Για το ήλιον μπορούν να χρησιμοποιηθούν σταθερές τιμές για τις ειδικές θερμότητες. **3** Το σύστημα βρίσκεται σε σταθεροποιημένη κατάσταση και επομένως οι μεταβολές της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας είναι μηδενικές,  $\Delta E_{κιν} = \Delta E_{δυν} = 0$  και  $\Delta E = \Delta U$ . **4** Ο όγκος του δοχείου παραμένει σταθερός και επομένως δεν υπάρχει έργο ογκομεταβολής. **5** Το σύστημα είναι αδιαβατικό και επομένως δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας.

**Ανάλυση** Θεωρούμε ως σύστημα τα περιεχόμενα του δοχείου (Σχήμα 4-30). Αυτό είναι ένα *κλειστό σύστημα* επειδή κατά τη διάρκεια της διεργασίας καμία ποσότητα μάζας δεν διαπερνά τα όρια του συστήματος. Παρατηρούμε ότι παράγεται αξονικό έργο πάνω στο σύστημα.

(α) Το ποσό του έργου του ελικοφόρου αναδευτήρα πάνω στο σύστημα είναι

$$W_{αξ} = \dot{W}_{αξ} \Delta t = (0,015 \text{ kW})(30 \text{ min}) \left( \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = 27 \text{ kJ}$$

Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις και παρατηρήσεις, το ενεργειακό ισοζύγιο για το σύστημα γράφεται ως

$$\underbrace{E_{in} - E_{out}}_{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{\Delta E_{system}}_{\text{Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας}}$$

$$W_{αξ, in} = \Delta U = m(u_2 - u_1) = m c_{v, avg} (T_2 - T_1)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι ειδικές θερμότητες κατάστασης ιδανικού αερίου των μονατομικών αερίων (με το ήλιον να είναι ένα από αυτά) είναι σταθερές. Η τιμή της  $c_v$  για το ήλιον προσδιορίζεται από τον Πίνακα Α-2α ίση με  $c_v = 3,1156 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ . Αντικαθιστώντας την τιμή αυτή καθώς και τις άλλες γνωστές ποσότητες στην προηγούμενη εξίσωση λαμβάνουμε

$$27 \text{ kJ} = (0,7 \text{ kg}) (3,1156 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}) (T_2 - 27^\circ\text{C})$$

$$T_2 = 39,4^\circ\text{C}$$

(β) Η τελική πίεση προσδιορίζεται από τη σχέση των ιδανικών αερίων

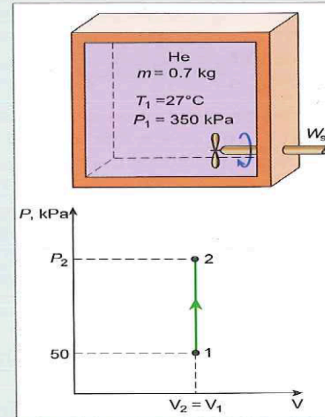
$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

όπου τα  $V_1$  και  $V_2$  είναι ίσα μεταξύ τους και απαλείφονται. Τότε, η τελική πίεση γίνεται

$$\frac{350 \text{ kPa}}{(27 + 273) \text{ K}} = \frac{P_2}{(39,4 + 273) \text{ K}}$$

$$P_2 = 364 \text{ kPa}$$

**Συζήτηση** Σημειώστε ότι η πίεση στη σχέση των ιδανικών αερίων είναι πάντοτε η απόλυτη πίεση.



**Σχήμα 4-30:** Σχηματική αναπαράσταση και διάγραμμα P-V του Παραδείγματος 4-8.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-9: Θέρμανση ενός Αερίου μέσω Θερμαντικής Αντίστασης

Μια διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου περιέχει αρχικά 0,5m<sup>3</sup> αερίου αζώτου σε 27°C και 400 kPa. Μια ηλεκτρική θερμαντική αντίσταση εντός της διάταξης τίθεται σε λειτουργία και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης 2 A για χρόνο 5 min από μια πηγή 120 V. Το άζωτο εκτονώνεται υπό σταθερή πίεση και κατά τη διάρκεια της διεργασίας παρατηρείται απώλεια θερμότητας 2.800 J. Να προσδιορίσετε την τελική θερμοκρασία του αζώτου.

**Λύση:** Αέριο άζωτο εντός διάταξης εμβόλου - κυλίνδρου θερμαίνεται μέσω ηλεκτρικής θερμαντικής αντιστάσεως. Το άζωτο εκτονώνεται υπό σταθερή πίεση ενώ κάποια θερμότητα χάνεται. Να προσδιοριστεί η τελική θερμοκρασία του αζώτου.

**Παραδοχές 1** Το άζωτο είναι ένα ιδανικό αέριο, εφόσον βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία και χαμηλή πίεση, συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές των ιδιοτήτων κρίσιμου σημείου,  $-147^\circ\text{C}$  και  $3,39 \text{ MPa}$ . **2** Το σύστημα είναι σταθεροποιημένο και συνεπώς οι μεταβολές της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας είναι μηδενικές,  $\Delta E_{\text{κιν}} = \Delta E_{\text{δυν}} = 0$  και  $\Delta E = \Delta U$ . **3** Η πίεση παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της διεργασίας, άρα  $P_2 = P_1$ . **4** Το άζωτο έχει σταθερές τιμές ειδικών θερμοτήτων σε θερμοκρασία δωματίου.

**Ανάλυση** Θεωρούμε ως σύστημα τα περιεχόμενα του κυλίνδρου (Σχήμα 4-31). Αυτό είναι ένα κλειστό σύστημα, αφού κατά τη διάρκεια της διεργασίας δεν υπάρχει κάποια μάζα που διαπερνά τα όρια του συστήματος. Παρατηρούμε ότι η διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου τυπικά περιλαμβάνει ένα μετακινούμενο όριο και επομένως έργο ογκομεταβολής  $W_b$ . Επίσης, χάνεται θερμότητα από το σύστημα και παράγεται ηλεκτρικό έργο  $W_e$  επάνω στο σύστημα.

Αρχικά, ας προσδιορίσουμε το παραγόμενο ηλεκτρικό έργο επάνω στο άζωτο:

$$W_e = \mathbf{VI}\Delta t = (120\text{V})(2\text{A})(5 \cdot 60\text{s}) \left( \frac{1\text{kJ/s}}{1.000\text{VA}} \right) = 72\text{kJ}$$

Η μάζα του αζώτου προσδιορίζεται από τη σχέση των ιδανικών αερίων:

$$m = \frac{PV_1}{RT_1} = \frac{(400\text{kPa})(0,5\text{m}^3)}{(0,297\text{kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K})(300\text{K})} = 2,245\text{kg}$$

Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις και παρατηρήσεις, το ενεργειακό ισοζύγιο για το σύστημα, μπορεί να εκφραστεί ως

$$\underbrace{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}_{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\text{Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας}}$$

$$W_{e,\text{in}} - Q_{\text{out}} - W_{b,\text{out}} = \Delta U$$

$$W_{e,\text{in}} - Q_{\text{out}} = \Delta H = m(h_2 - h_1) = m c_p (T_2 - T_1)$$

εφόσον  $\Delta U + W_b = \Delta H$ , για ένα κλειστό σύστημα το οποίο υπόκειται σε μια ψευδοστατική διεργασία εκτόνωσης ή συμπίεσης υπό σταθερή πίεση. Από τον Πίνακα Α-2<sup>α</sup>,  $c_p = 1,039 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  για το άζωτο σε θερμοκρασία δωματίου. Η μόνη άγνωστη ποσότητα στην προηγούμενη εξίσωση είναι η  $T_2$ , και βρίσκεται να είναι

$$72 \text{ kJ} - 2,8 \text{ kJ} = (2,245\text{kg})(1,039\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(T_2 - 27^\circ\text{C})$$

$$T_2 = 56,7^\circ\text{C}$$

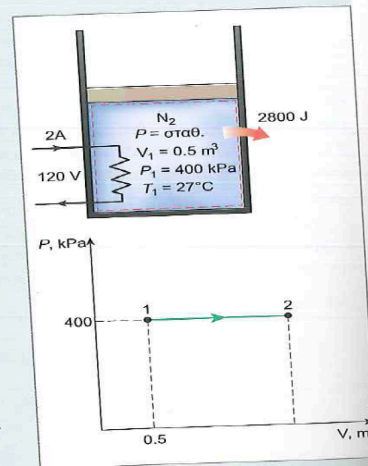
**Συζήτηση** Παρατηρείστε ότι θα μπορούσαμε επίσης να επιλύσουμε το πρόβλημα αυτό προσδιορίζοντας το έργο ογκομεταβολής και τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας, αντί της μεταβολής της ενθαλπίας.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-10: Θέρμανση ενός Αερίου υπό Σταθερή Πίεση

Μια διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου αρχικά περιέχει αέρα  $27^\circ\text{C}$  και  $150 \text{ kPa}$ . Στην κατάσταση αυτή, το έμβολο ηρεμεί επάνω σε ένα ζεύγος ανασχετήρων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4-32 και ο εσωτερικός όγκος της διάταξης είναι  $400 \text{ L}$ . Η μάζα του εμβόλου είναι τέτοια ώστε να απαιτείται πίεση  $350 \text{ kPa}$  για να το μετακινήσει. Τώρα ο αέρας εντός της διάταξης θερμαίνεται, μέχρι ο όγκος του να διπλασιαστεί. Να προσδιορίσετε (α) την τελική θερμοκρασία, (β) το έργο που παράγεται από τον αέρα, και (γ) το συνολικό ποσό θερμότητας που μεταφέρεται στον αέρα.

**Λύση:** Αέρας εντός διάταξης εμβόλου - κυλίνδρου εφοδιασμένης με ένα ζεύγος ανασχετήρων θερμαίνεται μέχρι να διπλασιαστεί ο όγκος του. Να προσδιοριστεί η τελική θερμοκρασία, το παραγόμενο έργο, και το συνολικό ποσό θερμότητας που μεταφέρεται.

**Παραδοχές 1** Ο αέρας είναι ένα ιδανικό αέριο εφόσον βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία και χαμηλή πίεση συγκριτικά με τις τιμές των ιδιοτήτων του κρίσιμου σημείου. **2** Το σύστημα είναι σταθεροποιημένο και



Σχήμα 4-31: Σχηματική αναπαράσταση και διάγραμμα P-V του Παραδείγματος 4-9.

επομένως οι μεταβολές της κινητικής και δυναμικής ενέργειας είναι μηδενικές,  $\Delta E_{\text{κιν}} = \Delta E_{\text{δυν}} = 0$  και  $\Delta E = \Delta U$ . Ο όγκος παραμένει σταθερός μέχρι το έμβολο αρχίσει να μετακινείται και μετά από αυτό η πίεση παραμένει σταθερή. 4 Δεν εμπεριέχονται ηλεκτρικό, αζονικό, ή άλλες μορφές έργου.

**Ανάλυση** Θεωρούμε ως σύστημα τα περιεχόμενα του κυλίνδρου (Σχήμα 4-32). Αυτό είναι ένα κλειστό σύστημα, αφού κατά τη διάρκεια της διεργασίας δεν υπάρχει κάποια μάζα που διαπερνά τα όρια του συστήματος. Παρατηρούμε ότι η διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου τυπικά περιλαμβάνει ένα μετακινούμενο όριο και επομένως έργο ογκομεταβολής  $W_b$ . Επίσης το έργο ογκομεταβολής παράγεται από το σύστημα, και θερμότητα μεταφέρεται προς το σύστημα.

(α) Η τελική θερμοκρασία μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση των ιδανικών αερίων μεταξύ των καταστάσεων 1 και 3, στην ακόλουθη μορφή:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_3 V_3}{T_3} \Rightarrow \frac{(150 \text{ kPa})(V_1)}{300 \text{ K}} = \frac{(350 \text{ kPa})(2V_1)}{T_3}$$

$$T_3 = 1400 \text{ K}$$

(β) Το παραγόμενο έργο μπορεί να προσδιοριστεί με ολοκλήρωση, αλλά για την περίπτωση αυτή είναι πολύ ευκολότερη η εύρεσή του από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της διεργασίας σε ένα διάγραμμα  $P-V$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-32:

$$A = (V_2 - V_1) P_2 = (0,4 \text{ m}^3)(350 \text{ kPa}) = 140 \text{ m}^3 \cdot \text{kPa}$$

$$W_{13} = 140 \text{ kJ}$$

Άρα,

Το έργο παράγεται από το σύστημα (για να ανυψώσει το έμβολο και να ωθήσει μακριά τον ατμοσφαιρικό αέρα), και επομένως είναι έργο εξόδου.

(γ) Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις και παρατηρήσεις, το ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος, μεταξύ της αρχικής και της τελικής του κατάστασης (διεργασία 1 → 3), μπορεί να εκφραστεί ως

$$\underbrace{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας} \\ \text{μέσω θερμότητας, έργου, και} \\ \text{μάζας}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\substack{\text{Μεταβολή εσωτερικής} \\ \text{κινητικής, δυναμικής κλπ.} \\ \text{ενέργειας}}}$$

$$Q_{\text{in}} - W_{b,\text{out}} = \Delta U = m(u_3 - u_1)$$

Η μάζα του συστήματος μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση των ιδανικών αερίων:

$$m = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{(150 \text{ kPa})(0,4 \text{ m}^3)}{(0,287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K})(300 \text{ K})} = 0,697 \text{ kg}$$

Οι εσωτερικές ενέργειες προσδιορίζονται από τον πίνακα του αέρα (Πίνακας Α-17) και είναι

$$u_1 = u_{@300\text{K}} = 214,07 \text{ kJ/kg}$$

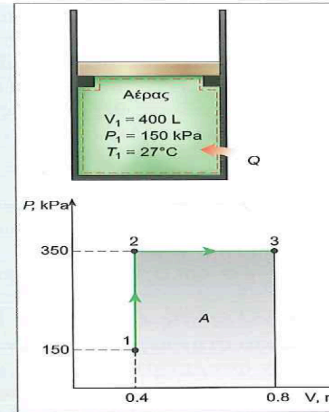
$$u_2 = u_{@1400\text{K}} = 1.113,52 \text{ kJ/kg}$$

Επομένως,

$$Q_{\text{in}} - 140 \text{ kJ} = (0,697 \text{ kg}) [(1113,52 - 214,07) \text{ kJ/kg}]$$

$$Q_{\text{in}} = 767 \text{ kJ}$$

**Συζήτηση** Το θετικό πρόσημο επιβεβαιώνει ότι η θερμότητα μεταφέρεται προς το σύστημα.



**Σχήμα 4-32:** Σχηματική αναπαράσταση και διάγραμμα  $P-V$  του Παραδείγματος 4-10.

## 4.5 Εσωτερική Ενέργεια, Ενθαλπία και Ειδικές Θερμότητες Στερεών και Υγρών

Μια ουσία ο ειδικός όγκος (ή η πυκνότητα) της οποίας παραμένει σταθερός, ονομάζεται **ασυμπίεστη ουσία**. Οι ειδικοί όγκοι των στερεών και των υγρών παραμένουν ουσιαστικά σταθεροί κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας (Σχήμα 4-33). Επομένως τα υγρά και τα στερεά μπορούν κατά προσέγγιση να θεωρηθούν ως ασυμπίεστες ουσίες, χωρίς μεγάλη απώλεια της ακρίβειας. Η υπόθεση περί του σταθερού όγκου θα πρέπει να ληφθεί για να υποδηλώσει ότι η ενέργεια που σχετίζεται με τη μεταβολή του όγκου είναι αμελητέα σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας. Διαφορετικά, η υπόθεση αυτή θα ήταν παράλογη όσον αφορά στη μελέτη των θερμικών καταπονήσεων των στερεών (οι οποίες προκαλούνται από τη μεταβολή του όγκου με τη θερμοκρασία), ή την ανάλυση των θερμομέτρων στήλης υγρών.



Μπορεί να αποδειχθεί μαθηματικά (βλ. Κεφάλαιο 12) ότι οι ειδικές θερμότητες υπό σταθερή πίεση και υπό σταθερό όγκο συμπίπτουν για ασυμπίεστες ουσίες (Σχήμα 4-34). Επομένως, για τα στερεά και τα υγρά, οι δείκτες στις  $c_p$  και  $c_v$  μπορούν να παραλείπονται και αμφότερες οι ειδικές θερμότητες μπορούν να αναπαρίστανται με ένα απλό σύμβολο  $c$ . Δηλαδή,

$$c_p = c_v = c \quad (4.32)$$

Το αποτέλεσμα αυτό θα μπορούσε επίσης να προκύψει από τους φυσικούς ορισμούς των ειδικών θερμότητων υπό σταθερό όγκο και υπό σταθερή πίεση. Οι τιμές των ειδικών θερμότητων για μερικά κοινά υγρά και στερεά σώματα δίνονται στον Πίνακα Α-3.

### Μεταβολές της Εσωτερικής Ενέργειας

Όπως και στην περίπτωση των ιδανικών αερίων, οι ειδικές θερμότητες των ασυμπίεστων ουσιών εξαρτώνται μόνον από τη θερμοκρασία. Επομένως, τα μερικά διαφορικά στην εξίσωση ορισμού της  $c_v$  μπορεί να αντικατασταθεί από τα συνήθη διαφορικά, που οδηγεί στη σχέση

$$du = c_v dT = c(T) dT \quad (4.33)$$

η μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια μεταξύ των καταστάσεων 1 και 2 λαμβάνεται τότε με ολοκλήρωση:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c(T) dT \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4.34)$$

Η μεταβολή της ειδικής θερμότητας  $c$  με τη θερμοκρασία θα πρέπει να είναι γνωστή πριν την πραγματοποίηση αυτής της ολοκλήρωσης. Για μικρά διαστήματα θερμοκρασιών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια τιμή της  $c$  στη μέση θερμοκρασία και να θεωρηθεί σταθερή, αποδίδοντας

$$\Delta u = c_{\text{avg}} (T_2 - T_1) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4.35)$$

### Μεταβολές της Ενθαλπίας

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της ενθαλπίας  $h = u + Pv$  και παρατηρώντας ότι ο  $v$ =σταθερός, η διαφορική μορφή της μεταβολής της ενθαλπίας των ασυμπίεστων ουσιών μπορεί να προσδιοριστεί μέσω διαφορίσσης και είναι

$$dh = du + v dP + P d\check{v}^0 = du + v dP \quad (4.36)$$

Ολοκληρώνοντας

$$\Delta h = \Delta u + v \Delta P \equiv c_{\text{avg}} \Delta T + v \Delta P \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4.37)$$

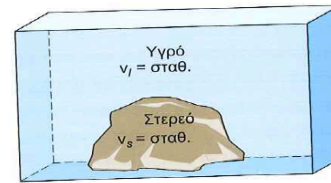
Για τα στερεά, ο όρος  $v \Delta P$  είναι ασήμαντος και επομένως  $\Delta h = \Delta u \equiv c_{\text{avg}} \Delta T$ . Για τα υγρά, αντιμετωπίζονται συνήθως δύο περιπτώσεις:

1. Διεργασίες σταθερής πίεσης, όπως στα συστήματα θέρμανσης ( $\Delta P = 0$ ):  $\Delta h = \Delta u \equiv c_{\text{avg}} \Delta T$ .
2. Διεργασίες σταθερής θερμοκρασίας, όπως στις αντλίες ( $\Delta T = 0$ ):  $\Delta h = v \Delta P$ .

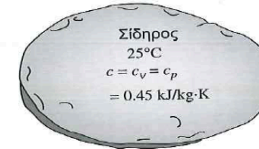
Για μια διεργασία μεταξύ των καταστάσεων 1 και 2, η τελευταία αυτή σχέση μπορεί να εκφραστεί ως  $h_2 - h_1 = v(P_2 - P_1)$ . Θεωρώντας ότι η κατάσταση 2 αντιστοιχεί στην κατάσταση συμπιεσμένου υγρού σε μια δεδομένη  $P$  και  $T$ , και η κατάσταση 1 αντιστοιχεί στην κατάσταση κορεσμένου υγρού στην ίδια θερμοκρασία, η ενθαλπία του συμπιεσμένου υγρού μπορεί να εκφραστεί ως

$$h_{@P,T} \approx h_{f@T} + v_{f@T}(P - P_{\text{sat}@T}) \quad (4.38)$$

όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 3. Αυτή αποτελεί μια βελτίωση ως προς την υπόθεση ότι η ενθαλπία του κορεσμένου υγρού μπορεί να ληφθεί ως  $h_f$  σε μια δεδομένη θερμοκρασία (δηλαδή,  $h_{f@P,T} \approx h_{f@T}$ ). Ωστόσο, η συνεισφορά του τελευταίου όρου της σχέσης αυτής είναι συχνά πολύ μικρή, και παραλείπεται. (Σημειώστε ότι σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, η Εξίσωση 4.38 μπορεί να διορθώσει υπερβολικά την ενθαλπία και να έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο σφάλμα, από την προσέγγιση ότι  $h \approx h_{f@T}$ ).



**Σχήμα 4-33:** Οι ειδικοί όγκοι των ασυμπίεστων ουσιών παραμένουν σταθεροί κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας.



**Σχήμα 4-34:** Οι τιμές των  $c_v$  και  $c_p$  των ασυμπίεστων ουσιών συμπίπτουν και σημαίνονται με  $c$ .

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-11: Ενθαλπία Συμπιεσμένου Υγρού

Να προσδιορίσετε την ενθαλπία του υγρού νερού σε 100°C και 15 MPa (α) χρησιμοποιώντας πίνακες συμπιεσμένου υγρού, (β) προσεγγίζοντας το υγρό νερό ως ένα κορεσμένο υγρό και (γ) χρησιμοποιώντας τη διόρθωση που δίνει η Εξίσωση 4.38.

**Λύση:** Να προσδιοριστεί επακριβώς και προσεγγιστικά η ενθαλπία του υγρού νερού.

**Ανάλυση** Στους 100°C, η πίεση κορεσμού του νερού είναι 101,42 kPa, και επειδή  $P > P_{\text{sat}}$ , το νερό στη δεδομένη κατάσταση υφίσταται ως συμπιεσμένο υγρό.

(α) Από τους πίνακες κορεσμένου υγρού, βρίσκουμε ότι

$$\left. \begin{array}{l} P = 15 \text{ MPa} \\ T = 100^\circ\text{C} \end{array} \right\} h = 430,39 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Πίνακας A-7})$$

Αυτή είναι η ακριβής τιμή της ενθαλπίας.

(β) Προσεγγίζοντας το συμπιεσμένο υγρό ως ένα κορεσμένο υγρό στους 100°C, που συμβαίνει συνήθως, λαμβάνουμε

$$h = h_{f@100^\circ\text{C}} = 419,17 \text{ kJ/kg}$$

Η τιμή έχει σφάλμα περίπου 2,6%.

(γ) Από την Εξίσωση (4.38),

$$\begin{aligned} h_{@P,T} &\equiv h_{f@T} + V_{f@T}(P - P_{f@T}) \\ &= (419,17 \text{ kJ/kg}) + (0,001 \text{ m}^3/\text{kg})[(15.000 - 101,42) \text{ kPa}] \left( \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 434,07 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

**Συζήτηση** Παρατηρείστε ότι στην προκειμένη περίπτωση, η ύπαρξη του διορθωτικού όρου ελάττωσε το σφάλμα από 2,6% σε περίπου 1%. Παρ' όλα αυτά όμως, αυτή η βελτίωση στην ακρίβεια συχνά δεν αντισταθμίζει την επιπρόσθετη προσπάθεια που προϋποθέτει.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-12: Ψύξη Μάζας Σιδήρου σε Υδάτινη Δεξαμενή

Ένα τεμάχιο σιδήρου 50 kg στους 80°C βυθίζεται εντός μιας μονωμένης δεξαμενής, η οποία περιέχει 0,5 m<sup>3</sup> υγρού νερού θερμοκρασίας 25°C. Να προσδιορίσετε την τελική θερμοκρασία, όταν επέλθει θερμική ισορροπία.

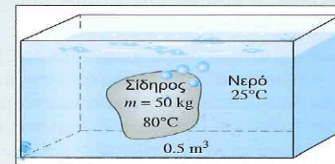
**Λύση:** Ένα τεμάχιο σιδήρου βυθίζεται σε μια μονωμένη υδάτινη δεξαμενή. Να προσδιοριστεί η τελική θερμοκρασία όταν επέλθει θερμική ισορροπία.

**Παραδοχές 1** Τόσο το νερό, όσο και ο σίδηρος είναι ασυμπίεστες ουσίες. **2** Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σταθερές ειδικές θερμότητες για το νερό και το σίδηρο στη θερμοκρασία δωματίου. **3** Το σύστημα είναι σταθεροποιημένο και επομένως οι μεταβολές της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας είναι μηδενικές,  $\Delta E_{\text{κιν}} = \Delta E_{\text{δυν}} = 0$  και  $\Delta E = \Delta U$ . **4** Δεν εμπεριέχονται ηλεκτρικό, αζονικό, ή άλλες μορφές έργου. **5** Το σύστημα είναι επαρκώς μονωμένο και επομένως δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας.

**Ανάλυση** Θεωρούμε ως σύστημα τα περιεχόμενα της δεξαμενής (Σχήμα 4-35). Αυτό είναι ένα κλειστό σύστημα, επειδή κατά τη διάρκεια της διεργασίας καμία μάζα δεν διαπερνά τα όρια του συστήματος. Παρατηρούμε ότι ο όγκος της άκαμπτης δεξαμενής παραμένει σταθερός, και επομένως δεν υπάρχει έργο ογκομεταβολής. Το ενεργειακό ισοζύγιο για το σύστημα μπορεί να εκφραστεί ως

$$\underbrace{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}_{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\text{Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας}}$$

$$0 = \Delta U$$



**Σχήμα 4-35:** Σχηματική αναπαράσταση του Παραδείγματος 4-12.

Η ολική εσωτερική ενέργεια  $U$  είναι μια εκτατική ιδιότητα, και επομένως μπορεί να διατυπωθεί ως το άθροισμα των επιμέρους εσωτερικών ενεργειών των μερών του συστήματος. Τότε, η μεταβολή της ολικής εσωτερικής ενέργειας του συστήματος γίνεται

$$\Delta U_{\text{συστ}} = \Delta U_{\text{σιδ}} + \Delta U_{\text{νερ}} = 0$$

$$[mc(T_2 - T_1)]_{\text{σιδ}} + [mc(T_2 - T_1)]_{\text{νερ}} = 0$$

Ο ειδικός όγκος του υγρού νερού σε (περίπου) συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου μπορεί να ληφθεί 0,001 m<sup>3</sup>/kg. Επομένως η μάζα του νερού είναι

$$m_{\text{νερ}} = \frac{V}{v} = \frac{0,5 \text{ m}^3}{0,001 \text{ m}^3 / \text{kg}} = 500 \text{ kg}$$

Οι ειδικές θερμότητες του σιδήρου και του υγρού νερού προσδιορίζονται από τον Πίνακα Α-3:  $c_{\text{σιδ}} = 0,45 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$  και  $c_{\text{νερ}} = 4,18 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ . Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου, λαμβάνουμε

$$(50 \text{ kg})(0,45 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C})(T_2 - 80^\circ\text{C}) + (500 \text{ kg})(4,18 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C})(T_2 - 25^\circ\text{C}) = 0$$

$$T_2 = 25,6^\circ\text{C}$$

Επομένως, όταν επέλθει θερμική ισορροπία, τόσο το νερό όσο και ο σίδηρος θα βρίσκονται σε θερμοκρασία 25,6°C.

**Συζήτηση** Η μικρή άνοδος της θερμοκρασίας του νερού οφείλεται στην μεγάλη μάζα του και στη μεγάλη ειδική του θερμότητα.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-13: Θέρμανση Ράβδων Αλουμινίου σε ένα Κλίβανο

Μεγάλες κυλινδρικές ράβδοι αλουμινίου ( $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$  και  $c_p = 0,973 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ) διαμέτρου 5 cm υφίστανται θερμική επεξεργασία από τους 20°C έως μια μέση θερμοκρασία 400°C, μέσω έλξης με ταχύτητα 8 m/min διαμέσου ενός κλιβάνου μεγάλου μήκους. Να προσδιορίσετε το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας του κλιβάνου στις ράβδους στον κλίβανο.

**Λύση:** Ράβδοι αλουμινίου πρόκειται να θερμανθούν εντός κλιβάνου μέχρι μια συγκεκριμένη μέση θερμοκρασία. Να προσδιοριστεί ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας σε αυτές.

**Παραδοχές 1** Οι θερμικές ιδιότητες των ράβδων παραμένουν σταθερές. **2** Δεν υπάρχουν μεταβολές στην κινητική και στη δυναμική τους ενέργεια. **3** Οι ράβδοι βρίσκονται σε μια ομοιόμορφη θερμοκρασία όταν εγκαταλείπουν τον κλίβανο.

**Ανάλυση** Οι ράβδοι αλουμινίου διέρχονται από το εσωτερικό του κλιβάνου με μια σταθερή ταχύτητα 8 m/min. Δηλαδή, ένας εξωτερικός παρατηρητής θα βλέπει ότι σε κάθε λεπτό μια ψυχρή ράβδος των 8m θα εισέρχεται στον κλίβανο, ενώ μια θερμή ράβδος των 8m θα εγκαταλείπει τον κλίβανο. Θεωρούμε ως σύστημα ένα τμήμα της ράβδου μήκους 8 m. Το ενεργειακό ισοζύγιο για το κλειστό αυτό σύστημα μπορεί να εκφραστεί ως

$$\underbrace{E_{\text{in}} - E_{\text{out}}}_{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\text{Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας}}$$

$$Q_m = \Delta U_{\text{rod}} = m(u_2 - u_1)$$

$$Q_m = mc(T_2 - T_1)$$

Η πυκνότητα και η ειδική θερμότητα της ράβδου δίνονται και είναι  $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$  και  $c = 0,973 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} = 0,973 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ . Η ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται σε ένα τμήμα μιας ράβδου μήκους 8m καθώς αυτή θερμαίνεται μέχρι τη συγκεκριμένη θερμοκρασία προσδιορίζεται να είναι

$$m = \rho V = \rho \frac{\pi D^2}{4} L = (2.700 \text{ kg/m}^3) \frac{\pi (0,05 \text{ m})^2}{4} (8 \text{ m}) = 42,41 \text{ kg}$$



**Σχήμα 4-36:** Σχηματική αναπαράσταση του Παραδείγματος 4-18.

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

$$Q_{in} = mc(T_2 - T_1) = (42,41 \text{ kg})(0,973 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot ^\circ \text{C}))(400 - 20)^\circ \text{C} = 15.680 \text{ kJ (ανά 8 m ράβδου)}$$

Θεωρώντας λοιπόν ότι σε κάθε λεπτό θερμαίνεται ένα τμήμα της ράβδου μήκους 8m, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στις ράβδους στον κλίβανο είναι

$$\dot{Q}_{in} = Q_{in} / \Delta t = 15.680 \text{ kJ} / \text{min} = \mathbf{261 \text{ kJ/s}}$$

**Συζήτηση** Το πρόβλημα αυτό μπορεί επίσης να επιλυθεί εάν εργαστούμε με τη μορφή του *ρυθμού μεταβολής* των εξισώσεων ως

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{L}{\Delta t} = \rho \frac{\pi D^2}{4} V = (2.700 \text{ kg} / \text{m}^3) \frac{\pi (0,05 \text{ m})^2}{4} (8 \text{ m} / \text{min}) = \mathbf{42,41 \text{ kg} / \text{min}}$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}c(T_2 - T_1) = (42,41 \text{ kg} / \text{min})(0,973 \text{ kJ} / \text{kg} \cdot ^\circ \text{C})(400 - 20)^\circ \text{C} = 15.680 \text{ kJ} / \text{min}$$

που είναι το ίδιο με το αποτέλεσμα που προέκυψε προηγουμένως.

## ΘΕΜΑΤΑ ΕΙΔΙΚΟΥ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ<sup>1</sup>

### Θερμοδυναμική Διάσταση των Βιολογικών Συστημάτων

Μια σημαντική και συναρπαστική περιοχή εφαρμογών της θερμοδυναμικής είναι τα βιολογικά συστήματα, που είναι οι περιοχές αρκετά σύνθετων και αξιοπερίεργων διεργασιών μεταφοράς και μετασχηματισμού ενέργειας. Τα βιολογικά συστήματα δεν βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία και επομένως δεν είναι εύκολο να αναλυθούν. Παρ' όλη όμως την πολυπλοκότητα τους, τα βιολογικά συστήματα αποτελούνται πρωτίστως από τέσσερα απλά στοιχεία: υδρογόνο, οξυγόνο, άνθρακα, και άζωτο. Στο ανθρώπινο σώμα, το υδρογόνο αντιστοιχεί στο 63%, το οξυγόνο στο 25,5%, ο άνθρακας στο 9,5% και το άζωτο στο 1,4%, επί του συνόλου των ατόμων. Το υπόλοιπο 0,6% των ατόμων προέρχεται από 20 άλλα στοιχεία ουσιώδη για την ύπαρξη της ζωής. Όσον αφορά στη μάζα, το 72% του ανθρώπινου σώματος αποτελείται από νερό.

Τα δομικά συστατικά των έμβιων οργανισμών είναι τα *κύτταρα*, τα οποία μοιάζουν με μικρογραφίες εργασιών που επιτελούν λειτουργίες ζωτικής σημασίας για την επιβίωση των οργανισμών.

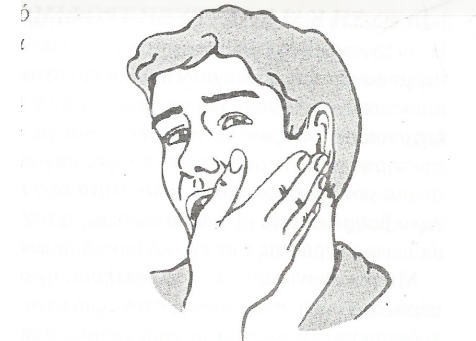
Ένα βιολογικό σύστημα ενδέχεται να είναι τόσο απλό, όσο ένα και μοναδικό κύτταρο. Το ανθρώπινο σώμα αποτελείται από περίπου 100 τρισεκατομμύρια κύτταρα, κάθε ένα εκ των οποίων έχει μέση διάμετρο ίση με 0,01 mm. Η μεμβράνη του κυττάρου είναι ένα ημιπερατό τοίχωμα που επιτρέπει σε μερικές ουσίες να το διαπερνούν ενώ εμποδίζει τη διέλευση άλλων.

Σε ένα τυπικό κύτταρο επιτελούνται χιλιάδες χημικές αντιδράσεις ανά δευτέρολεπτο, κατά τη διάρκεια των οποίων κάποια μόρια διασπώνται απελευθερώνοντας ενέργεια και κάποια άλλα δημιουργούνται. Αυτό το υψηλό επίπεδο χημικής δραστηριότητας εντός των κυττάρων, που διατηρεί το ανθρώπινο σώμα σε θερμοκρασία 37°C πραγματοποιώντας παράλληλα και όλες τις άλλες σωματικές λειτουργίες, ονομάζεται **μεταβολισμός**. Σε απλούς όρους, ο μεταβολισμός αναφέρεται στην καύση των τροφών, όπως είναι οι υδατάνθρακες, τα λίπη και οι πρωτεΐνες. Ο ρυθμός μεταβολισμού στην κατάσταση σωματικής ηρεμίας ονομάζεται **βασικός μεταβολικός ρυθμός** και είναι ο ρυθμός μεταβολισμού που απαιτείται προκειμένου το σώμα να επιτελεί τις αναγκαίες λειτουργίες (όπως η αναπνοή και η κυκλοφορία του αίματος), υπό συνθήκες μηδενικής εξωτερικής δραστηριότητας. Ο μεταβολικός ρυθμός μπορεί επίσης να ερμηνευθεί ως ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας του σώματος. Για ένα μέσο άνδρα (30 ετών, 70 kg και σωματικής επιφάνειας εμβαδού 1,8 m<sup>2</sup>), ο βασικός μεταβολικός ρυθμός είναι 84 W. Δηλαδή, το σώμα του εκλύει ενέργεια στο περιβάλλον με ένα ρυθμό των 84 W, κάτι που με τη σειρά του σημαίνει ότι το σώμα μετατρέπει τη χημική ενέργεια των τροφών (ή του σωματικού λίπους, εάν το άτομο δεν έχει λάβει τροφή) σε θερμική ενέργεια, με ρυθμό ίσο με 84 W (Σχήμα 4-37). Ο μεταβολικός ρυθμός αυξάνεται με το επίπεδο της εξωτερικής δραστηριότητας και κατά τη διάρκεια έντονης σωματικής καταπόνησης μπορεί να υπερβεί το 10πλάσιο του βασικού μεταβολικού ρυθμού. Δηλαδή, δύο άτομα που επιδίδονται σε έντονη σωματική δραστηριότητα εντός δωματίου, ενδέχεται να προσδίδουν στο χώρο αυτό περισσότερη ενέργεια από ό,τι για παράδειγμα μια ηλεκτρική θερμάστρα ισχύος 1 kW (Σχήμα 4-38). Το κλάσμα της αισθητής θερμότητας κυμαίνεται από 40% στην περίπτωση έντονου έργου, έως τα 70% στην περίπτωση ήπιας δραστηριότητας. Το υπόλοιπο της ενέργειας αποβάλλεται από το σώμα με τον ιδρώτα με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας.

<sup>1</sup> Η παρούσα ενότητα μπορεί να παραλειφθεί χωρίς απόλεια της συνέχειας του βιβλίου.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3-23 Ανύψωση της Θερμοκρασίας λόγω Χειροδικίας

Αν ποτέ χαστουκίσατε κάποιον ή συνέβει σε εσάς κάτι τέτοιο, πιθανότατα θα αισθανθήκατε το χέρι σας ή το πρόσωπό σας να “καίει”. Έστω ότι σας χαστούκισε κάποιος, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία της περιοχής του προσώπου σας που υπέστη το “πλήγμα” να αυξηθεί κατά  $1.8^{\circ}\text{C}$ . Αν υποθεθεί ότι το χέρι του ανθρώπου αυτού έχει μάζα  $1.2\text{ kg}$  και ότι περίπου  $0.150\text{ kg}$  του ιστού στο πρόσωπο και το χέρι επηρεάζεται από αυτό το γεγονός, να υπολογιστεί η ταχύτητα του χεριού λίγο πριν τη “σύγκρουση”. Η ειδική θερμότητα του ιστού θεωρείται ίση με  $3.8\text{ kJ}/(\text{kg }^{\circ}\text{C})$ .



Σχήμα 3-89 Σχήμα του παραδείγματος 3-23.

**Παραδοχές** 1 Το χέρι σταματά να κινείται μετά τη σύγκρουση. 2 Το χτύπημα δεν προκαλεί σημαντική κίνηση του προσώπου. 3 Δε μεταφέρεται θερμότητα από την πληγείσα περιοχή στο περιβάλλον, άρα η διεργασία είναι αδιαβατική. 4 Το σύστημα δεν παράγει ούτε καταναλώνει έργο. 5 Η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας είναι ίση με μηδέν:  $\Delta PE = 0$  και  $\Delta E = \Delta U + \Delta KE$ .

**Ανάλυση** Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και παρατηρήσεις το ισοζύγιο ενέργειας μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\underbrace{E_{in} - E_{out}}_{\substack{\text{Ολική (καθαρή) μεταφορά} \\ \text{ενέργειας με τη μορφή} \\ \text{θερμότητας, έργου και μάζας}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\substack{\text{Μεταβολή της εσωτερικής,} \\ \text{κινητικής, δυναμικής} \\ \text{κ.λ.π. ενέργειας}}$$

$$0 = \Delta U_{\text{affected tissue}} + \Delta KE_{\text{hand}}$$

$$0 = (mC\Delta T)_{\text{affected tissue}} + [m(0 - V^2)/2]_{\text{hand}}$$

όπου ο δείκτης “affected tissue” δηλώνει ποσότητα που αναφέρεται στον ιστό που έχει πληγεί, ενώ ο δείκτης “hand” δηλώνει ποσότητα που αναφέρεται στο χέρι. Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις, η κινητική ενέργεια του χεριού θα πρέπει να είναι ίση με την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας της πληγείσας περιοχής. Λύνοντας ως προς την ταχύτητα και αντικαθιστώντας τις γνωστές ποσότητες προκύπτει:

$$V_{\text{hand}} = \sqrt{\frac{2(mC\Delta T)_{\text{affected tissue}}}{m_{\text{hand}}}} = \sqrt{\frac{2(0.15\text{ kg})[3.8\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})](1.8^{\circ}\text{C})}{1.2\text{ kg}} \frac{1000\text{ m}^2/\text{s}^2}{1\text{ kJ/kg}}}$$

$$= 41.3\text{ m/s (ή } 149\text{ km/h)}$$

«Ενέργεια πίεσης» (*pressure potential energy*, ppe) ή «ενέργεια ροής» (*flow-work*) :

$$\text{ppe} \propto P$$

Αποδεικνύεται πως η σταθερά αναλογίας είναι ο ειδικός όγκος  $u$  και έτσι:

$$\text{ppe} = P u = \frac{P}{\rho}$$

Για τα ιδανικά αέρια :

$$\text{ppe} = R \cdot T$$

Το **έργο ογκομεταβολής** σχετίζεται άμεσα με τη μεταβολή του όγκου, δηλαδή της μετακίνησης των οριακών επιφανειών όπως το έργο εκτόνωσης και συμπίεσης, ενώ το **τεχνικό έργο** με τη μεταβολή της πίεσης

$$w_{12}^t = - \int_1^2 u dP$$

όπου το μείον στην παραπάνω σχέση έχει να κάνει με τη σύμβαση ότι όταν το σύστημα (ρευστό) παράγει έργο όπως για παράδειγμα κατά την εκτόνωση, πρέπει το έργο να είναι θετικό

Η **ενθαλπία** ορίζεται σαν η «**ολική θερμοδυναμική ενέργεια**» (*total thermodynamic energy, tte*), δηλαδή το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας και της ενέργειας πίεσης άρα είναι καταστατικό μέγεθος.

Η ενθαλπία (*enthalpy, H*), ορίζεται από τη σχέση:  $H = U + P.V$

ή ανά μονάδα μάζας :  $h = u + P.v$

$$\begin{array}{l}
 P.v = R \cdot T \\
 h = u + P.v \quad \Bigg| \Rightarrow h = u + R \cdot T \\
 u \propto T \Rightarrow (\text{ιδανικό αέριο}) u = u(T) \quad \Bigg| \Rightarrow h = h(T)
 \end{array}$$

**Ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο:**

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$$

εκφράζει την ικανότητα της μονάδας της μάζας του αερίου να απορροφά ενέργεια υπό σταθερό όγκο

**Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση:**  $c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$

ικανότητα της μονάδας της μάζας του αερίου να απορροφά ενέργεια υπό σταθερή πίεση

Οι  $u$  και  $h$  για τα **ιδανικά αέρια** εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία, άρα και οι **ειδικές θερμότητες**  $c_v$  και  $c_p$  θα εξαρτώνται επίσης από τη θερμοκρασία. Επομένως:

$$\begin{aligned} \Delta u = u_2 - u_1 &= \int_1^2 c_v(T) dT \\ \Delta h = h_2 - h_1 &= \int_1^2 c_p(T) dT \\ h = u + R \cdot T &\Rightarrow dh = du + R \cdot dT \end{aligned} \quad \left| \begin{aligned} \Rightarrow c_p &= c_v + R \\ \gamma &= \frac{c_p}{c_v} \end{aligned} \right. \quad \left| \begin{aligned} c_p &= \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \\ c_v &= \frac{R}{\gamma - 1} \end{aligned} \right.$$

Όμοια, για τις **γραμμομοριακές θερμοχωρητικότητες**  $C = c MB$  (kJ/(kmol·K))



**Ασυμπίεστη ουσία:** η ουσία της οποίας ο ειδικός όγκος (ή η πυκνότητα) δε μεταβάλλεται. (υγρά και στερεά).

Συνέπεια: Η παραδοχή του σταθερού όγκου έχει την έννοια ότι η ενέργεια που συνδέεται με τη μεταβολή του όγκου, όπως το έργο ογκομεταβολής, είναι αμελητέα συγκρινόμενη με τις άλλες μορφές ενέργειας.

Ισχύει:  $c_v = c_p = c$

Οι ειδικές θερμότητες των ασυμπιέστων ουσιών (στερεά ή υγρά), όπως και αυτές των ιδανικών αερίων, εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία. Συνεπώς:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T) dT = \int_1^2 c(T) dT$$

$$\Delta u = c_{av}(T_2 - T_1)$$

$$h = u + P \cdot v \Rightarrow dh = du + v \cdot dP + P \cdot dv \quad \left| \Rightarrow dh = du + v \cdot dP \right.$$

για ασυμπίεστες ουσίες  $dv=0$

Για τα **στερεά** ισχύει  $v \cdot dP \approx 0$ , οπότε από προκύπτει:

$$dh = du \Rightarrow \text{ολοκλήρωση} \Rightarrow \Delta h = c_{av}(T_2 - T_1)$$

Για τα **υγρά** διακρίνουμε συνήθως δύο ειδικές περιπτώσεις:

Θερμαντήρες: διεργασίες σταθερής πίεσης ( $dP = 0$ ):  $\Delta h = \Delta u = c_{av}(T_2 - T_1)$

Αντλίες θερμότητας: διεργασίες σταθερής θερμοκρασίας ( $\Delta T = 0$ ):  $\Delta h = v \Delta P$

## ΑΣΚΗΣΕΙΣ

3.34  
3

R-134a  
P<sub>1</sub> = 800 kPa  
V<sub>1</sub> = 200 L = 0.2 m<sup>3</sup>

V<sub>max</sub> = 200 L  
T = 50°C  
W = ?  
P<sub>2</sub> = P<sub>1</sub> = 800 kPa  
T<sub>2</sub> = 50°C

Μία διάταξη εξάγει αέριο  
χωρίς ζήτημα σχετικά δοκίμια  
200L υαλοπίνακα  
R-134a Το ετήσιο  
εξέδραον + κενό και η τήρη  
των δύο τήρη υαλοπίνακα  
από 800 kPa. Το υαλοπίνακα  
διατηρείται σε 50°C. Να υπολογίσει  
το έργο που παράγεται;

P<sub>1</sub> = 800 kPa  
Kop. u x b

$$\Rightarrow v_1 = v_f @ 800 \text{ kPa} = 0.0008454 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

P<sub>2</sub> = 800 kPa  
T<sub>2</sub> = 50°C

$$\Rightarrow v_2 = 0.02846 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{0.2 \text{ m}^3}{0.0008454 \text{ m}^3/\text{kg}} = 236.6 \text{ kg}$$

+ → από το 1<sup>ο</sup> προς το 2<sup>ο</sup>

$$W_{b,out} = \int_1^2 P \cdot dV = P(V_2 - V_1) = m P (v_2 - v_1) = 5227 \text{ kJ}$$

$$= 236.6 \text{ kg} \cdot 800 \text{ kPa} \cdot (0.02846 - 0.0008454) \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\cdot \frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3}$$

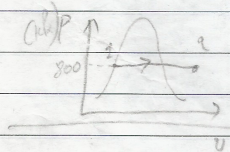


TABLE A-12  
Saturated refrigerant-134a—Pressure table

Press., MPa	Temp., $T_{sat}$ , °C	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg		Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg · K)	
		Sat. liquid, $v_f$	Sat. vapor, $v_g$	Sat. liquid, $u_f$	Sat. vapor, $u_g$	Sat. liquid, $h_f$	Evap., $h_{fg}$	Sat. vapor, $h_g$	Sat. liquid, $s_f$	Sat. vapor, $s_g$
0.06	-37.07	0.0007097	0.3100	3.41	206.12	3.46	221.27	224.72	0.0147	0.9520
0.08	-31.21	0.0007184	0.2366	10.41	209.46	10.47	217.92	228.39	0.0440	0.9447
0.10	-26.43	0.0007258	0.1917	16.22	212.18	16.29	215.06	231.35	0.0678	0.9395
0.12	-22.36	0.0007323	0.1614	21.23	214.50	21.32	212.54	233.86	0.0879	0.9354
0.14	-18.80	0.0007381	0.1395	25.66	216.52	25.77	210.27	236.04	0.1055	0.9322
0.16	-15.62	0.0007435	0.1229	29.66	218.32	29.78	208.18	237.97	0.1211	0.9295
0.18	-12.73	0.0007485	0.1098	33.31	219.94	33.45	206.26	239.71	0.1352	0.9273
0.20	-10.09	0.0007532	0.0993	36.69	221.43	36.84	204.46	241.30	0.1481	0.9253
0.24	-5.37	0.0007618	0.0834	42.77	224.07	42.95	201.14	244.09	0.1710	0.9222
0.28	-1.23	0.0007697	0.0719	48.18	226.38	48.39	198.13	246.52	0.1911	0.9197
0.32	2.48	0.0007770	0.0632	53.06	228.43	53.31	195.35	248.66	0.2089	0.9177
0.36	5.84	0.0007839	0.0564	57.54	230.28	57.82	192.76	250.58	0.2251	0.9160
0.4	8.93	0.0007904	0.0509	61.69	231.97	62.00	190.32	252.32	0.2399	0.9145
0.5	15.74	0.0008056	0.0409	70.93	235.64	71.33	184.74	256.07	0.2723	0.9117
0.6	21.58	0.0008196	0.0341	78.99	238.74	79.48	179.71	259.19	0.2999	0.9097
0.7	26.72	0.0008328	0.0292	86.19	241.42	86.78	175.07	261.85	0.3242	0.9080
0.8	31.33	0.0008454	0.0255	92.75	243.78	93.42	170.73	264.15	0.3459	0.9066
0.9	35.53	0.0008576	0.0226	98.79	245.88	99.56	166.62	266.18	0.3656	0.9054
1.0	39.39	0.0008695	0.0202	104.42	247.77	105.29	162.68	267.97	0.3838	0.9043
1.2	46.32	0.0008928	0.0166	114.69	251.03	115.76	155.23	270.99	0.4164	0.9023
1.4	52.43	0.0009159	0.0140	123.98	253.74	125.26	148.14	273.40	0.4453	0.9003
1.6	57.92	0.0009392	0.0121	132.52	256.00	134.02	141.31	275.33	0.4714	0.8982
1.8	62.91	0.0009631	0.0105	140.49	257.88	142.22	134.60	276.83	0.4954	0.8959
2.0	67.49	0.0009878	0.0093	148.02	259.41	149.99	127.95	277.94	0.5178	0.8934
2.5	77.59	0.0010562	0.0069	165.48	261.84	168.12	111.06	279.17	0.5667	0.8854
3.0	86.22	0.0011416	0.0053	181.88	262.16	185.30	92.71	278.01	0.6156	0.8735

R-134a

TABLE A-13  
Superheated refrigerant-134a (Concluded)

T °C	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
<b>P = 0.50 MPa (T<sub>sat</sub> = 15.74°C)</b>				<b>P = 0.60 MPa (T<sub>sat</sub> = 21.55°C)</b>				<b>P = 0.70 MPa (T<sub>sat</sub> = 26.72°C)</b>				
Sat.	0.04086	253.64	256.07	0.9117	0.03408	238.74	259.19	0.9097	0.02918	241.42	261.85	0.9080
20	0.04188	239.40	260.34	0.9264								
30	0.04416	248.20	270.28	0.9597	0.03581	246.41	267.89	0.9388	0.02979	244.51	265.37	0.9197
40	0.04633	256.99	280.16	0.9918	0.03774	255.45	278.09	0.9719	0.03157	253.83	275.93	0.9539
50	0.04842	265.83	290.04	1.0229	0.03958	264.48	288.23	1.0037	0.03324	263.08	286.35	0.9867
60	0.05043	274.73	299.95	1.0531	0.04134	273.54	298.35	1.0346	0.03482	272.31	296.69	1.0182
70	0.05240	283.72	309.92	1.0825	0.04304	282.66	308.48	1.0645	0.03634	281.57	307.01	1.0487
80	0.05432	292.80	319.96	1.1114	0.04469	291.86	318.67	1.0938	0.03781	290.88	317.35	1.0784
90	0.05620	302.00	330.10	1.1397	0.04631	301.14	328.93	1.1225	0.03924	300.27	327.74	1.1074
100	0.05805	311.31	340.33	1.1675	0.04790	310.53	339.27	1.1505	0.04064	309.74	338.19	1.1358
110	0.05988	320.74	350.68	1.1949	0.04946	320.03	349.70	1.1781	0.04201	319.31	348.71	1.1637
120	0.06168	330.30	361.14	1.2218	0.05099	329.64	360.24	1.2053	0.04335	328.98	359.33	1.1910
130	0.06347	339.98	371.72	1.2484	0.05251	339.38	370.88	1.2320	0.04468	338.76	370.04	1.2179
140	0.06524	349.79	382.42	1.2746	0.05402	349.23	381.64	1.2584	0.04599	348.66	380.86	1.2444
150					0.05550	359.21	392.52	1.2844	0.04729	358.68	391.79	1.2706
160					0.05698	369.32	403.51	1.3100	0.04857	368.82	402.82	1.2963
<b>P = 0.80 MPa (T<sub>sat</sub> = 31.33°C)</b>				<b>P = 0.90 MPa (T<sub>sat</sub> = 35.53°C)</b>				<b>P = 1.00 MPa (T<sub>sat</sub> = 39.39°C)</b>				
Sat.	0.02547	243.78	264.15	0.9066	0.02255	245.88	266.18	0.9054	0.02020	247.77	267.97	0.9043
40	0.02691	252.13	273.66	0.9374	0.02325	250.32	271.25	0.9217	0.02029	248.39	268.68	0.9066
50	0.02846	261.62	284.39	0.9711	0.02472	260.09	282.34	0.9566	0.02171	258.48	280.19	0.9428
60	0.02992	271.04	294.98	1.0034	0.02609	269.72	293.21	0.9897	0.02301	268.35	291.36	0.9768
70	0.03131	280.45	305.50	1.0345	0.02738	279.30	303.94	1.0214	0.02423	278.11	302.34	1.0093
80	0.03264	289.89	316.00	1.0647	0.02861	288.87	314.62	1.0521	0.02538	287.82	313.20	1.0405
90	0.03393	299.37	326.52	1.0940	0.02980	298.46	325.28	1.0819	0.02649	297.53	324.01	1.0707
100	0.03519	308.93	337.08	1.1227	0.03095	308.11	335.96	1.1109	0.02755	307.27	334.82	1.1000
110	0.03642	318.57	347.71	1.1508	0.03207	317.82	346.68	1.1392	0.02858	317.06	345.65	1.1286
120	0.03762	328.31	358.40	1.1784	0.03316	327.62	357.47	1.1670	0.02959	326.93	356.52	1.1567
130	0.03881	338.14	369.19	1.2055	0.03423	337.52	368.33	1.1943	0.03058	336.88	367.46	1.1841
140	0.03997	348.09	380.07	1.2321	0.03529	347.51	379.27	1.2211	0.03154	346.82	378.46	1.2111
150	0.04113	358.15	391.05	1.2584	0.03633	357.61	390.31	1.2475	0.03250	357.06	389.56	1.2376
160	0.04227	368.32	402.14	1.2843	0.03736	367.82	401.44	1.2735	0.03344	367.31	400.74	1.2638
170	0.04340	378.61	413.33	1.3098	0.03838	378.14	412.68	1.2992	0.03436	377.66	412.02	1.2895
180	0.04452	389.02	424.63	1.3351	0.03939	388.57	424.02	1.3245	0.03528	388.12	423.40	1.3149
<b>P = 1.20 MPa (T<sub>sat</sub> = 46.32°C)</b>				<b>P = 1.40 MPa (T<sub>sat</sub> = 52.43°C)</b>				<b>P = 1.60 MPa (T<sub>sat</sub> = 57.92°C)</b>				
Sat.	0.01663	251.03	270.99	0.9023	0.01405	253.74	273.40	0.9003	0.01208	256.00	275.33	0.8982
50	0.01712	254.98	275.52	0.9164								
60	0.01835	265.42	287.44	0.9527	0.01495	262.17	283.10	0.9297	0.01233	258.48	278.20	0.9069
70	0.01947	275.59	298.96	0.9868	0.01603	272.87	295.31	0.9658	0.01340	269.89	291.33	0.9457
80	0.02051	285.62	310.24	1.0192	0.01701	283.29	307.10	0.9997	0.01435	280.78	303.74	0.9813
90	0.02150	295.59	321.39	1.0503	0.01792	293.55	318.63	1.0319	0.01521	291.39	315.72	1.0148
100	0.02244	305.54	332.47	1.0804	0.01878	303.73	330.02	1.0628	0.01601	301.84	327.46	1.0467
110	0.02335	315.50	343.52	1.1096	0.01960	313.88	341.32	1.0927	0.01677	312.20	339.04	1.0773
120	0.02423	325.51	354.58	1.1381	0.02039	324.05	352.59	1.1218	0.01750	322.53	350.53	1.1069
130	0.02508	335.58	365.68	1.1660	0.02115	334.25	363.86	1.1501	0.01820	332.87	361.99	1.1357
140	0.02592	345.73	376.83	1.1933	0.02189	344.50	375.15	1.1777	0.01887	343.24	373.44	1.1638
150	0.02674	355.95	388.04	1.2201	0.02262	354.82	386.49	1.2048	0.01953	353.66	384.91	1.1912
160	0.02754	366.27	399.33	1.2465	0.02333	365.22	397.89	1.2315	0.02017	364.15	396.43	1.2181
170	0.02834	376.69	410.70	1.2724	0.02403	375.71	409.36	1.2576	0.02080	374.71	407.99	1.2445
180	0.02912	387.21	422.16	1.2980	0.02472	386.29	420.90	1.2834	0.02142	385.35	419.62	1.2704
190					0.02541	396.96	432.53	1.3088	0.02203	396.08	431.33	1.2960
200					0.02608	407.73	444.24	1.3338	0.02263	406.90	443.11	1.3212

R-134a

TABLE A-11

Saturated refrigerant-134a—Temperature table

Temp., T°C	Press., P <sub>sat</sub> MPa	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg		Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)	
		Sat. liquid, v <sub>f</sub>	Sat. vapor, v <sub>g</sub>	Sat. liquid, u <sub>f</sub>	Sat. vapor, u <sub>g</sub>	Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>	Sat. liquid, s <sub>f</sub>	Sat. vapor, s <sub>g</sub>
-40	0.05164	0.0007055	0.3569	-0.04	204.45	0.00	222.88	222.88	0.0000	0.9560
-36	0.06332	0.0007113	0.2947	4.68	206.73	4.73	220.67	225.40	0.0201	0.9506
-32	0.07704	0.0007172	0.2451	9.47	209.01	9.52	218.37	227.90	0.0401	0.9456
-28	0.09305	0.0007233	0.2052	14.31	211.29	14.37	216.01	230.38	0.0600	0.9411
-26	0.10199	0.0007265	0.1882	16.75	212.43	16.82	214.80	231.62	0.0699	0.9390
-24	0.11160	0.0007296	0.1728	19.21	213.57	19.29	213.57	232.85	0.0798	0.9370
-22	0.12192	0.0007328	0.1590	21.68	214.70	21.77	212.32	234.08	0.0897	0.9351
-20	0.13299	0.0007361	0.1464	24.17	215.84	24.26	211.05	235.31	0.0996	0.9332
-18	0.14483	0.0007395	0.1350	26.67	216.97	26.77	209.76	236.53	0.1094	0.9315
-16	0.15748	0.0007428	0.1247	29.18	218.10	29.30	208.45	237.74	0.1192	0.9298
-12	0.18540	0.0007498	0.1068	34.25	220.36	34.39	205.77	240.15	0.1388	0.9267
-8	0.21704	0.0007569	0.0919	39.38	222.60	39.54	203.00	242.54	0.1583	0.9239
-4	0.25274	0.0007644	0.0794	44.56	224.84	44.75	200.15	244.90	0.1777	0.9213
0	0.29282	0.0007721	0.0689	49.79	227.06	50.02	197.21	247.23	0.1970	0.9190
4	0.33765	0.0007801	0.0600	55.08	229.27	55.35	194.19	249.53	0.2162	0.9169
8	0.38756	0.0007884	0.0525	60.43	231.46	60.73	191.07	251.80	0.2354	0.9150
12	0.44294	0.0007971	0.0460	65.83	233.63	66.18	187.85	254.03	0.2545	0.9132
16	0.50416	0.0008062	0.0405	71.29	235.78	71.69	184.52	256.22	0.2735	0.9116
20	0.57160	0.0008157	0.0358	76.80	237.91	77.26	181.09	258.35	0.2924	0.9102
24	0.64566	0.0008257	0.0317	82.37	240.01	82.90	177.55	260.45	0.3113	0.9089
26	0.68530	0.0008309	0.0298	85.18	241.05	85.75	175.73	261.48	0.3209	0.9082
28	0.72675	0.0008362	0.0281	88.00	242.08	88.61	173.89	262.50	0.3302	0.9076
30	0.77006	0.0008417	0.0265	90.84	243.10	91.49	172.00	263.50	0.3396	0.9070
32	0.81528	0.0008473	0.0250	93.70	244.12	94.39	170.09	264.48	0.3490	0.9064
34	0.86247	0.0008530	0.0236	96.58	245.12	97.31	168.14	265.45	0.3584	0.9058
36	0.91168	0.0008590	0.0223	99.47	246.11	100.25	166.15	266.40	0.3678	0.9053
38	0.96298	0.0008651	0.0210	102.38	247.09	103.21	164.12	267.33	0.3772	0.9047
40	1.0164	0.0008714	0.0199	105.30	248.06	106.19	162.05	268.24	0.3866	0.9041
42	1.0720	0.0008780	0.0188	108.25	249.02	109.19	159.94	269.14	0.3960	0.9035
44	1.1299	0.0008847	0.0177	111.22	249.96	112.22	157.79	270.01	0.4054	0.9030
48	1.2526	0.0008989	0.0159	117.22	251.79	118.35	153.33	271.68	0.4243	0.9017
52	1.3851	0.0009142	0.0142	123.31	253.55	124.58	148.66	273.24	0.4432	0.9004
56	1.5278	0.0009308	0.0127	129.51	255.23	130.93	143.75	274.68	0.4622	0.8990
60	1.6813	0.0009488	0.0114	135.82	256.81	137.42	138.57	275.99	0.4814	0.8973
70	2.1162	0.0010027	0.0086	152.22	260.15	154.34	124.08	278.43	0.5302	0.8918
80	2.6324	0.0010766	0.0064	169.88	262.14	172.71	106.41	279.12	0.5814	0.8827
90	3.2435	0.0011949	0.0046	189.82	261.34	193.69	82.63	276.32	0.6380	0.8655
100	3.9742	0.0015443	0.0027	218.60	248.49	224.74	34.40	259.13	0.7196	0.8117

Source for Tables A-8 through A-10: M. J. Moran and H. N. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1992), pp. 710–15. Originally based on equations from D. P. Wilson and R. S. Basu, "Thermodynamic Properties of a New Stratospherically Safe Working Fluid—Refrigerant-134a," *ASHRAE Trans.* 94, Pt. 2 (1988), pp. 2095–118. Used with permission.





TABLE A-5  
Saturated water—Pressure table

H <sub>2</sub> O	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T <sub>sat</sub> , °C	Sat. liquid, v <sub>f</sub>	Sat. vapor, v <sub>g</sub>	Sat. liquid, u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Sat. vapor, u <sub>g</sub>	Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>	Sat. liquid, s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
<b>Press., MPa</b>												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2848.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2878.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-4  
Saturated water—Temperature table

H <sub>2</sub> O	Temp., °C	Sat. press., P <sub>sat</sub> , kPa	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg · K)		
			Sat. liquid, v <sub>f</sub>	Sat. vapor, v <sub>g</sub>	Sat. liquid, u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Sat. vapor, u <sub>g</sub>	Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>	Sat. liquid, s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0760
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.63	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4731
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
<b>Sat. press., MPa</b>												
100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	418.94	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001080	0.5099	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2033.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6259
180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2833	4.1863	6.4698

TABLE A-5  
Saturated water—Pressure table

H <sub>2</sub> O	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T <sub>sat</sub> , °C	Sat. liquid, v <sub>f</sub>	Sat. vapor, v <sub>g</sub>	Sat. liquid, u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Sat. vapor, u <sub>g</sub>	Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>	Sat. liquid, s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
<b>Press., MPa</b>												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-5  
Saturated water—Pressure table

H <sub>2</sub> O	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T <sub>sat</sub> , °C	Sat. liquid, v <sub>f</sub>	Sat. vapor, v <sub>g</sub>	Sat. liquid, u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Sat. vapor, u <sub>g</sub>	Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>	Sat. liquid, s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
<b>Press., MPa</b>												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-6  
Superheated water (Continued)

T °C	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
<b>P = 1.00 MPa (179.91°C)</b>				<b>P = 1.20 MPa (187.99°C)</b>				<b>P = 1.40 MPa (195.07°C)</b>				
Sat.	0.19444	2583.6	2778.1	6.5865	0.16333	2588.8	2784.8	6.5233	0.14084	2592.8	2790.0	6.4693
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.16930	2612.8	2815.9	6.5888	0.14302	2603.1	2803.3	6.4975
250	0.2327	2709.9	2942.6	6.9247	0.19234	2704.2	2935.0	6.8294	0.16350	2698.3	2927.2	6.7467
300	0.2579	2793.2	3051.2	7.1229	0.2138	2789.2	3045.8	7.0317	0.18228	2785.2	3040.4	6.9534
350	0.2825	2875.2	3157.7	7.3011	0.2345	2872.2	3153.6	7.2121	0.2003	2869.2	3149.5	7.1360
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2548	2954.9	3260.7	7.3774	0.2178	2952.5	3257.5	7.3026
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2946	3122.8	3476.3	7.6759	0.2521	3121.1	3474.1	7.6027
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.3339	3295.6	3696.3	7.9435	0.2860	3294.4	3694.8	7.8710
700	0.4476	3475.3	3923.1	8.2731	0.3729	3474.4	3922.0	8.1881	0.3195	3473.6	3920.8	8.1160
800	0.4943	3660.4	4154.7	8.4996	0.4118	3659.7	4153.8	8.4148	0.3528	3659.0	4153.0	8.3431
900	0.5407	3852.2	4392.9	8.7118	0.4505	3851.6	4392.2	8.6272	0.3861	3851.1	4391.5	8.5556
1000	0.5871	4050.5	4637.6	8.9119	0.4892	4050.0	4637.0	8.8274	0.4192	4049.5	4636.4	8.7559
1100	0.6335	4255.1	4888.6	9.1017	0.5278	4254.6	4888.0	9.0172	0.4524	4254.1	4887.5	8.9457
1200	0.6798	4465.6	5145.4	9.2822	0.5665	4465.1	5144.9	9.1977	0.4855	4464.7	5144.4	9.1262
1300	0.7261	4681.3	5407.4	9.4543	0.6051	4680.9	5407.0	9.3698	0.5186	4680.4	5406.5	9.2981
<b>P = 1.60 MPa (201.41°C)</b>				<b>P = 1.80 MPa (207.15°C)</b>				<b>P = 2.00 MPa (212.42°C)</b>				
Sat.	0.12380	2596.0	2794.0	6.4218	0.11042	2598.4	2797.1	6.3794	0.09963	2600.3	2799.5	6.3409
225	0.13287	2644.7	2857.3	6.5518	0.11673	2636.6	2846.7	6.4908	0.10377	2628.3	2835.8	6.4147
250	0.14184	2692.3	2919.2	6.6732	0.12497	2686.0	2911.0	6.6066	0.11144	2679.6	2902.5	6.5453
300	0.15862	2781.1	3034.8	6.8844	0.14021	2776.9	3029.2	6.8226	0.12547	2772.6	3023.5	6.7684
350	0.17456	2866.1	3145.4	7.0694	0.15457	2863.0	3141.2	7.0100	0.13857	2859.8	3137.0	6.9563
400	0.19005	2950.1	3254.2	7.2374	0.16847	2947.7	3250.9	7.1794	0.15120	2945.2	3247.6	7.1271
500	0.2203	3119.5	3472.0	7.5390	0.19550	3117.9	3469.8	7.4825	0.17568	3116.2	3467.6	7.4317
600	0.2500	3293.3	3693.2	7.8080	0.2220	3292.1	3691.7	7.7523	0.19960	3290.9	3690.1	7.7024
700	0.2794	3472.7	3919.7	8.0535	0.2482	3471.8	3918.5	7.9983	0.2232	3470.9	3917.4	7.9467
800	0.3086	3658.3	4152.1	8.2908	0.2742	3657.6	4151.2	8.2258	0.2467	3657.0	4150.3	8.1765
900	0.3377	3850.5	4390.8	8.4935	0.3001	3849.9	4390.1	8.4386	0.2700	3849.3	4389.4	8.3895
1000	0.3668	4049.0	4635.8	8.6938	0.3260	4048.5	4635.2	8.6391	0.2933	4048.0	4634.6	8.5901
1100	0.3958	4253.7	4887.0	8.8937	0.3518	4253.2	4886.4	8.8290	0.3166	4252.7	4885.9	8.7600
1200	0.4248	4464.2	5143.9	9.0643	0.3776	4463.7	5143.4	9.0096	0.3398	4463.3	5142.9	8.9607
1300	0.4538	4679.9	5406.0	9.2364	0.4034	4679.5	5405.6	9.1818	0.3631	4679.0	5405.1	9.1329
<b>P = 2.50 MPa (223.99°C)</b>				<b>P = 3.00 MPa (233.90°C)</b>				<b>P = 3.50 MPa (242.60°C)</b>				
Sat.	0.07998	2603.1	2803.1	6.2575	0.06668	2604.1	2804.2	6.1869	0.05707	2603.7	2803.4	6.1253
225	0.08027	2605.6	2806.3	6.2639								
250	0.08700	2662.6	2886.1	6.4085	0.07058	2644.0	2855.8	6.2872	0.05872	2623.7	2829.2	6.1749
300	0.09890	2761.6	3008.8	6.6438	0.08114	2750.1	2993.5	6.5390	0.06842	2738.0	2977.5	6.4461
350	0.10976	2851.9	3126.3	6.8403	0.09053	2843.7	3115.3	6.7428	0.07678	2835.3	3104.0	6.6579
400	0.12010	2939.1	3239.3	7.0148	0.09936	2932.8	3230.9	6.9212	0.08453	2926.4	3222.3	6.8405
450	0.13014	3025.5	3350.8	7.1746	0.10787	3020.4	3344.0	7.0834	0.09198	3015.3	3337.2	7.0052
500	0.13993	3112.1	3462.1	7.3234	0.11619	3108.0	3456.5	7.2339	0.09918	3103.0	3450.9	7.1572
600	0.15930	3288.0	3686.3	7.5960	0.13243	3285.0	3682.3	7.5065	0.11324	3282.1	3678.4	7.4339
700	0.17832	3468.7	3914.5	7.8435	0.14838	3466.5	3911.7	7.7571	0.12699	3464.3	3908.9	7.6837
800	0.19716	3655.3	4148.2	8.0720	0.16414	3653.5	4145.9	7.9862	0.14056	3651.8	4143.7	7.9134
900	0.21590	3847.9	4387.6	8.2853	0.17980	3846.5	4385.9	8.1999	0.15402	3845.0	4384.1	8.1276
1000	0.2346	4046.7	4633.1	8.4861	0.19541	4045.4	4631.6	8.4009	0.16743	4044.1	4630.1	8.3288
1100	0.2532	4251.5	4884.6	8.6782	0.21098	4250.3	4883.3	8.5912	0.18080	4249.2	4881.9	8.5192
1200	0.2718	4462.1	5141.7	8.8569	0.22652	4460.9	5140.5	8.7720	0.19415	4459.8	5139.3	8.7000
1300	0.2905	4677.8	5404.0	9.0291	0.24206	4676.6	5402.8	8.9442	0.20749	4675.5	5401.7	8.8723

H<sub>2</sub>O

TABLE A-5  
Saturated water—Pressure table

H <sub>2</sub> O	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T <sub>sat</sub> , °C	Sat. liquid, v <sub>f</sub>	Sat. vapor, v <sub>g</sub>	Sat. liquid, u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Sat. vapor, u <sub>g</sub>	Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>	Sat. liquid, s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
<b>Press., MPa</b>												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-6

Superheated water

T °C	P = 0.01 MPa (45.81°C)*				P = 0.05 MPa (81.33°C)				P = 0.10 MPa (99.63°C)			
	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
Sat. <sup>†</sup>	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.366	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.4	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5852
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
P = 0.20 MPa (120.23°C)				P = 0.30 MPa (133.55°C)				P = 0.40 MPa (143.63°C)				
Sat.	0.8857	2529.5	2706.7	7.1272	0.6058	2543.6	2725.3	6.9919	0.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	0.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	0.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	0.7964	2728.7	2967.6	7.5166	0.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	0.8753	2806.7	3069.3	7.7022	0.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	0.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	0.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.705	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1382
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.5	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
P = 0.50 MPa (151.86°C)				P = 0.60 MPa (158.85°C)				P = 0.80 MPa (170.43°C)				
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.3157	2567.4	2756.8	6.7600	0.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.3520	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709	0.3938	2720.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599	0.4344	2801.0	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329	0.4742	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0673	0.5920	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	0.8041	3299.6	3701.7	7.3522	0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.7472	3477.0	3925.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211	0.8245	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3391	0.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575

\*The temperature in parentheses is the saturation temperature at the specified pressure.

†Properties of saturated vapor at the specified pressure.

TABLE A-5  
Saturated water—Pressure table

H <sub>2</sub> O	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T <sub>sat</sub> , °C	Sat. liquid, v <sub>f</sub>	Sat. vapor, v <sub>g</sub>	Sat. liquid, u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Sat. vapor, u <sub>g</sub>	Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>	Sat. liquid, s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
<b>Press., MPa</b>												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2848.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2878.6	2.2515	4.2438	6.4953



**TABLE A-6**  
Superheated water (Continued)

T °C	P = 1.00 MPa (179.91°C)				P = 1.20 MPa (187.99°C)				P = 1.40 MPa (195.07°C)			
	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m <sup>3</sup> /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
Sat.	0.19444	2583.6	2778.1	6.5865	0.16333	2588.8	2784.8	6.5233	0.14084	2592.8	2790.0	6.4693
200	0.2060	2621.9	2827.9	6.6940	0.16930	2612.8	2815.9	6.5898	0.14302	2603.1	2803.3	6.4975
250	0.2327	2709.9	2942.6	6.9247	0.19234	2704.2	2935.0	6.8294	0.16350	2698.3	2927.2	6.7467
300	0.2579	2793.2	3051.2	7.1229	0.2138	2789.2	3045.8	7.0317	0.18228	2785.2	3040.4	6.9534
350	0.2825	2875.2	3157.7	7.3011	0.2345	2872.2	3153.6	7.2121	0.2003	2869.2	3149.5	7.1360
400	0.3066	2957.3	3263.9	7.4651	0.2548	2954.9	3260.7	7.3774	0.2178	2952.5	3257.5	7.3026
500	0.3541	3124.4	3478.5	7.7622	0.2946	3122.8	3476.3	7.6759	0.2521	3121.1	3474.1	7.6027
600	0.4011	3296.8	3697.9	8.0290	0.3339	3295.6	3696.3	7.9435	0.2860	3294.4	3694.8	7.8710
700	0.4476	3475.3	3923.1	8.2731	0.3729	3474.4	3922.0	8.1881	0.3195	3473.6	3920.8	8.1160
800	0.4943	3660.4	4154.7	8.4996	0.4118	3659.7	4153.8	8.4148	0.3528	3659.0	4153.0	8.3431
900	0.5407	3852.2	4392.9	8.7118	0.4505	3851.6	4392.2	8.6272	0.3861	3851.1	4391.5	8.5556
1000	0.5871	4050.5	4637.6	8.9119	0.4892	4050.0	4637.0	8.8274	0.4192	4049.5	4636.4	8.7559
1100	0.6335	4255.1	4888.6	9.1017	0.5278	4254.6	4888.0	9.0172	0.4524	4254.1	4887.5	8.9457
1200	0.6798	4465.6	5145.4	9.2822	0.5665	4465.1	5144.9	9.1977	0.4855	4464.7	5144.4	9.1262
1300	0.7261	4681.3	5407.4	9.4543	0.6051	4680.9	5407.0	9.3698	0.5186	4680.4	5406.5	9.2981
P = 1.60 MPa (201.41°C)      P = 1.80 MPa (207.15°C)      P = 2.00 MPa (212.42°C)												
Sat.	0.12380	2596.0	2794.0	6.4218	0.11042	2598.4	2797.1	6.3794	0.09963	2600.3	2799.5	6.3409
225	0.13287	2644.7	2857.3	6.5518	0.11673	2636.6	2846.7	6.4808	0.10377	2628.3	2835.8	6.4147
250	0.14184	2692.3	2919.2	6.6732	0.12497	2686.0	2911.0	6.6066	0.11144	2679.6	2902.5	6.5453
300	0.15862	2781.1	3034.8	6.8844	0.14021	2776.9	3029.2	6.8226	0.12547	2772.6	3023.5	6.7684
350	0.17456	2866.1	3145.4	7.0694	0.15457	2863.0	3141.2	7.0100	0.13857	2859.8	3137.0	6.9563
400	0.19005	2950.1	3254.2	7.2374	0.16847	2947.7	3250.9	7.1794	0.15120	2945.2	3247.6	7.1271
500	0.2203	3119.5	3472.0	7.5390	0.19550	3117.9	3469.8	7.4825	0.17568	3116.2	3467.6	7.4317
600	0.2500	3293.3	3693.2	7.8080	0.2220	3292.1	3691.7	7.7523	0.19960	3290.9	3690.1	7.7024
700	0.2794	3472.7	3919.7	8.0535	0.2482	3471.8	3918.5	7.9983	0.2232	3470.9	3917.4	7.9467
800	0.3086	3658.3	4152.1	8.2808	0.2742	3657.6	4151.2	8.2258	0.2467	3657.0	4150.3	8.1765
900	0.3377	3850.5	4390.8	8.4935	0.3001	3849.9	4390.1	8.4386	0.2700	3849.3	4389.4	8.3895
1000	0.3668	4049.0	4635.8	8.6938	0.3260	4048.5	4635.2	8.6391	0.2933	4048.0	4634.6	8.5901
1100	0.3958	4253.7	4887.0	8.8937	0.3518	4253.2	4886.4	8.8290	0.3166	4252.7	4885.9	8.7800
1200	0.4248	4464.2	5143.9	9.0643	0.3776	4463.7	5143.4	9.0096	0.3398	4463.3	5142.9	8.9607
1300	0.4538	4679.9	5406.0	9.2364	0.4034	4679.5	5405.6	9.1818	0.3631	4679.0	5405.1	9.1329
P = 2.50 MPa (223.99°C)      P = 3.00 MPa (233.90°C)      P = 3.50 MPa (242.60°C)												
Sat.	0.07998	2603.1	2803.1	6.2575	0.06668	2604.1	2804.2	6.1869	0.05707	2603.7	2803.4	6.1253
225	0.08027	2605.6	2806.3	6.2639								
250	0.08700	2662.6	2880.1	6.4085	0.07058	2644.0	2855.8	6.2872	0.05872	2623.7	2829.2	6.1749
300	0.09890	2761.6	3008.8	6.6438	0.08114	2750.1	2993.5	6.5390	0.06842	2738.0	2977.5	6.4461
350	0.10976	2851.9	3126.3	6.8403	0.09053	2843.7	3115.3	6.7428	0.07678	2835.3	3104.0	6.6579
400	0.12010	2939.1	3239.3	7.0148	0.09936	2932.8	3230.9	6.9212	0.08453	2926.4	3222.3	6.8405
450	0.13014	3025.5	3350.8	7.1746	0.10787	3020.4	3344.0	7.0834	0.09198	3015.3	3337.2	7.0052
500	0.13993	3112.1	3462.1	7.3234	0.11619	3108.0	3456.5	7.2339	0.09918	3103.0	3450.9	7.1572
600	0.15930	3288.0	3686.3	7.5960	0.13243	3285.0	3682.3	7.5065	0.11324	3282.1	3678.4	7.4339
700	0.17832	3468.7	3914.5	7.8435	0.14838	3466.5	3911.7	7.7571	0.12699	3464.3	3908.8	7.6837
800	0.19716	3655.3	4148.2	8.0720	0.16414	3653.5	4145.9	7.9862	0.14056	3651.8	4143.7	7.9134
900	0.21590	3847.9	4387.6	8.2853	0.17980	3846.5	4385.9	8.1999	0.15402	3845.0	4384.1	8.1276
1000	0.2346	4046.7	4633.1	8.4861	0.19541	4045.4	4631.6	8.4009	0.16743	4044.1	4630.1	8.3288
1100	0.2532	4251.5	4884.6	8.6782	0.21098	4250.3	4883.3	8.5912	0.18080	4249.2	4881.9	8.5192
1200	0.2718	4462.1	5141.7	8.8569	0.22652	4460.9	5140.5	8.7720	0.19415	4459.8	5139.3	8.7000
1300	0.2905	4677.8	5404.0	9.0291	0.24206	4676.6	5402.8	8.9442	0.20749	4675.5	5401.7	8.8723

H<sub>2</sub>O

TABLE A-5  
Saturated water—Pressure table

H <sub>2</sub> O	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg			Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/(kg·K)		
	Press., P, kPa	Sat. temp., T <sub>sat</sub> , °C	Sat. liquid, v <sub>f</sub>	Sat. vapor, v <sub>g</sub>	Sat. liquid, u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Sat. vapor, u <sub>g</sub>	Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>	Sat. liquid, s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>
0.0113	0.01	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001020	5.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001022	3.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
<b>Press., MPa</b>												
0.100	99.63	0.001043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2708.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	665.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2096.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.23	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001115	0.2401	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001127	0.19444	761.68	1822.0	2583.6	762.31	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001133	0.17753	790.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2817.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001139	0.16333	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001144	0.15125	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953

TABLE A-6

## Superheated water

T °C	P = 0.01 MPa (45.81°C)*				P = 0.05 MPa (81.33°C)				P = 0.10 MPa (99.63°C)			
	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
Sat. <sup>†</sup>	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.366	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.4	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
P = 0.20 MPa (120.23°C)				P = 0.30 MPa (133.55°C)				P = 0.40 MPa (143.63°C)				
Sat.	0.8857	2529.5	2706.7	7.1272	0.6058	2543.6	2725.3	6.9919	0.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	0.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	0.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	0.7964	2728.7	2967.6	7.5166	0.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	0.8753	2806.7	3069.3	7.7022	0.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	0.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	0.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3925.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.705	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1382
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.5	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
P = 0.50 MPa (151.86°C)				P = 0.60 MPa (158.85°C)				P = 0.80 MPa (170.43°C)				
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.3157	2567.4	2756.8	6.7600	0.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.3520	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709	0.3938	2720.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599	0.4344	2801.0	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329	0.4742	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0673	0.5920	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	0.8041	3299.6	3701.7	7.3522	0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.7472	3477.0	3925.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211	0.8245	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3391	0.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575

\*The temperature in parentheses is the saturation temperature at the specified pressure.

†Properties of saturated vapor at the specified pressure.

TABLE A-4  
Saturated water—Temperature table

H <sub>2</sub> O	Temp., T, °C	Sat. press., P <sub>sat</sub> , kPa	Specific volume, m <sup>3</sup> /kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg		Entropy, kJ/(kg · K)			
			Sat. liquid, v <sub>f</sub>	Sat. vapor, v <sub>g</sub>	Sat. liquid, u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Sat. vapor, u <sub>g</sub>	Sat. liquid, h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Sat. vapor, h <sub>g</sub>	Sat. liquid, s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>	Sat. vapor, s <sub>g</sub>
	0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
	5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
	10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
	15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
	20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
	25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
	30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
	35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
	40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
	45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
	50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0760
	55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
	60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
	65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
	70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
	75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
	80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
	85	57.63	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
	90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4731
	95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
		<b>Sat. press., MPa</b>											
	100	0.10135	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	418.94	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
	105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
	110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
	115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
	120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
	125	0.2321	0.001065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
	130	0.2701	0.001070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
	135	0.3130	0.001075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
	140	0.3613	0.001080	0.5099	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
	145	0.4154	0.001085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
	150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
	155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
	160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
	165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
	170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
	175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2033.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6259
	180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
	185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
	190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
	195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2833	4.1863	6.4698

TABLE A-17

Ideal-gas properties of air

T K	h kJ/kg	P	u kJ/kg	v <sub>r</sub>	s <sup>o</sup> kJ/(kg·K)	T K	h kJ/kg	P	u kJ/kg	v <sub>r</sub>	s <sup>o</sup> kJ/(kg·K)
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.44	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1040	1091.85	133.3	793.36	22.29	3.01260
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751

Air

TABLE A-6

Superheated water

T °C	P = 0.01 MPa (45.81°C)*				P = 0.05 MPa (81.33°C)				P = 0.10 MPa (99.63°C)			
	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg·K)
Sat.†	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.366	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.4	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5852
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
	P = 0.20 MPa (120.23°C)				P = 0.30 MPa (133.55°C)				P = 0.40 MPa (143.63°C)			
Sat.	0.8857	2529.5	2706.7	7.1272	0.6058	2543.6	2725.3	6.9919	0.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	0.9596	2576.9	2768.8	7.2795	0.6339	2570.8	2761.0	7.0778	0.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	0.7163	2650.7	2865.6	7.3115	0.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	0.7964	2728.7	2967.6	7.5166	0.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	0.8753	2806.7	3069.3	7.7022	0.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	0.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	0.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6887
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.705	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1382
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.5	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
	P = 0.50 MPa (151.86°C)				P = 0.60 MPa (158.85°C)				P = 0.80 MPa (170.43°C)			
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7	6.8213	0.3157	2567.4	2756.8	6.7600	0.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	0.4249	2642.9	2855.4	7.0592	0.3520	2638.9	2850.1	6.9665	0.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	0.4744	2723.5	2960.7	7.2709	0.3938	2720.9	2957.2	7.1816	0.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	0.5226	2802.9	3064.2	7.4599	0.4344	2801.0	3061.6	7.3724	0.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	0.5701	2882.6	3167.7	7.6329	0.4742	2881.2	3165.7	7.5464	0.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	0.6173	2963.2	3271.9	7.7938	0.5137	2962.1	3270.3	7.7079	0.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	0.7109	3128.4	3483.9	8.0673	0.5920	3127.6	3482.8	8.0021	0.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	0.8041	3299.6	3701.7	8.3522	0.6697	3299.1	3700.9	8.2674	0.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	0.8969	3477.5	3925.9	8.5952	0.7472	3477.0	3925.3	8.5107	0.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	0.9896	3662.1	4156.9	8.8211	0.8245	3661.8	4156.5	8.7367	0.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	0.9017	3853.4	4394.4	8.9486	0.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	0.9788	4051.5	4638.8	9.1485	0.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3381	0.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	0.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	0.9076	4681.8	5407.9	9.5575

\*The temperature in parentheses is the saturation temperature at the specified pressure.

†Properties of saturated vapor at the specified pressure.