

Ασκήσεις Θερμοδυναμικής

Έργο. Θερμότητα. Τέλεια, μη τέλεια διαφορικά. Αρχή διατήρησης της ενέργειας.

1. α) Δόσετε την γενική μορφή της καταστατικής εξίσωσης τριών θερμοδυναμικών συστημάτων.
 β) Ποια μεγέθη ονομάζονται εκτατικά και ποια εντατικά; Αναφέρετε πέντε από την κάθε περίπτωση.
 γ) Ποια η σημασία του τέλει διαφορικού στα διάφορα θερμοδυναμικά μεγέθη; Αναφέρετε τέλεια και μη τέλεια διαφορικά στην θερμοδυναμική.

2. Ποια σχέση παρέχει το έργο σε οιονεί στατική διεργασία σε υδροστατικό σύστημα, σε σύστημα επιφάνειας, σε μεταλλικό έλασμα, σε παραμαγνητικό στερεό;

3. Ν' αποδειχθεί ότι σε ιδανικό αέριο :

$$\alpha = 1/T \text{ και } \kappa_T = 1/P$$

όπου α ο συντελεστής διαστολής και κ_T ο ισόθερμος συντελεστής συμπίεστικότητας.

4. Ν' αποδειχθεί ότι :

$$\frac{dV}{V} = \alpha dT - \kappa_T dP$$

όπου α ο συντελεστής διαστολής και κ_T ο ισόθερμος συντελεστής συμπίεστικότητας.

5. Ν' αποδειχθεί ότι :

$$\frac{\alpha}{\kappa_T} = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$$

6. Διερευνήσατε αν το διαφορικό $dV = 2\pi r h dr + \pi r^2 dh$ είναι τέλειο ή όχι.

7. Τα διαφορικά του έργου και της θερμότητας είναι τέλεια ή όχι; Αποδείξετε δι' εφαρμογής του κριτηρίου του Euler.

8. Να αποδειχθεί ότι :

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial P} \right)_T = - \left(\frac{\partial \kappa_T}{\partial T} \right)_P$$

9. Ν' αποδειχθεί ότι κατά την μεταβολή της εφαρμοζόμενης δύναμης df επί μεταλλικού ελάσματος μήκους l , ισχύει:

$$df = -\alpha AY dT + \frac{AY}{l} dl$$

όπου α ο συντελεστής διαστολής, A η διατομή του ελάσματος και Y το μέτρον ελαστικότητας του Young.

10. Εάν η καταστατική εξίσωση ελαστικής ράβδου είναι:

$$f = KT \left[\frac{l}{l_0} - \frac{l^2}{l^2} \right]$$

ν' αποδειχθεί ότι:

$$Y = \frac{KT}{A} \left(\frac{l}{l_0} + \frac{2l^2}{l^2} \right)$$

όπου K σταθερά και l_0 το μήκος της ελαστικής ράβδου όταν η δύναμη επί της ράβδου είναι μηδέν, A η διατομή της ράβδου.

11. Μεταλλική οβίδα περιέχει αέριο υπό πίεση P . Εάν η οβίδα ανοιχθεί το αέριον εκτονώνεται σε κύλινδρο εφοδιασμένο με έμβολο ώστε η πίεση να παραμένει σταθερή, ίση προς την ατμοσφαιρική, P_A . Να ευρεθεί το έργο που παράγεται όταν το αέριο καταλάβει όγκο V_c στον κύλινδρο.

12. Κύλινδρος όγκου V_1 , όπου η μία του βάση είναι έμβολο που κινείται χωρίς τριβές, περιέχει αέριο που εξασκεί επί του εμβόλου πίεση P . Κατά την διεργασία συμπίεσης ικανοποιείται η εξίσωση

$$PV^a = A$$

όπου a και A σταθερές. Να ευρεθεί το έργο που παράγεται κατά την διεργασία αυτή κατά την συμπίεση από αρχικό όγκο V_1 σε τελικό V_2 (όπου $V_1 > V_2$).

13. Αέριο περιγράφεται από την καταστατική εξίσωση: $P(V-b) = nRT$. Να υπολογισθεί το έργο που παράγεται κατά την οιονεί στατική ισόθερμη εκτόνωση του από αρχικό όγκο V_1 σε τελικό V_2 (όπου $V_1 < V_2$). Εάν το αέριο περιέχεται σε δοχείο όγκου V_1 εφοδιασμένο με στρόφιγγα και με άνοιγμά της εκτονωθεί σε κενό γειτονικό δοχείο όγκου V_2 , ποιο το παραγόμενο έργο;

14. Ν' αποδειχθεί ότι το έργο κατά την οιονεί στατική ισόθερμη μαγνήτιση παραμαγνητικού υλικού που περιγράφεται από την εξίσωση Curie είναι:

$$W = \frac{T}{2C_c} (M_\tau^2 - M_\alpha^2)$$

$$W = \frac{C_c}{2T} (H_\tau^2 - H_\alpha^2)$$

Εξίσωση Curie:

$$M = C_c \frac{H}{T}$$

όπου H η ένταση του μαγνητικού πεδίου, M η μαγνήτιση, C_c η σταθερά Curie.

15. Ν' αποδειχθεί ότι σε παραμαγνητικό αέριο που πραγματοποιείται διεργασία μεταβολής της κατάστασης του η θερμότητα που ανταλλάσσεται δίνεται από την σχέση:

$$dq = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_{v,m} dT + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_{m,T} - P \right] dV + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial M} \right)_{T,v} + H \right] dM$$

16. Σε «οιονεί στατική» διεργασία υδροστατικού συστήματος, ν' αποδειχθεί ότι ισχύουν οι σχέσεις:

$$dq = \left(\frac{\partial U}{\partial P} \right)_V dP + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_P + P \right] dV$$

$$dq = \left[\left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right] dT + \left[\left(\frac{\partial U}{\partial P} \right)_T + P \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \right] dP$$

17. Κύλινδρος, εφοδιασμένος με έμβολο που κινείται χωρίς τριβές, περιέχει 1 kg κορεσμένων ατμών ύδατος υπό πίεση 1 MPa και θερμοκρασία 273.15 K. Το σύστημα θερμαίνεται υπό σταθερή πίεση έως τους 573.15 K. Να ευρεθεί το παραγόμενο έργο, αν θεωρηθεί ότι ο ατμός συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο.
18. Ιδανικό αέριο που χαρακτηρίζεται από τις μεταβλητές P_1V_1 (κατάσταση 1) υφίσταται ελεύθερη εκτόνωση και στην νέα θέση του (κατάσταση 2) χαρακτηρίζεται από τις μεταβλητές P_2, V_2 . Από την θέση αυτή συμπιέζεται ισοβαρώς έως την κατάσταση 3 που έχει όγκο V_1 και ακολούθως οδηγείται ισοχώρως στην αρχική του κατάσταση P_1V_1 . Να υπολογισθεί το έργο κατά τις διαδρομές 1-2, 2-3, 3-1 και οι μεταβολές της εσωτερικής ενέργειας κατά τις διεργασίες αυτές. Ποιο είναι το συνολικό έργο και ποια η συνολική μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας;
19. 1 mol αερίου που περιγράφεται από την εξίσωση van der Waals:

$$\left(P + \frac{n^2 a}{V^2} \right) (V - nb) = nRT$$

εκτονώνεται ισόθερμα και αντιστρεπτά από όγκο V_1 σε όγκο V_2 . Να υπολογισθεί το έργο που παράγεται, η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας και η θερμότητα που ανταλλάσσεται κατά την διεργασία.

Απ.

$$W = -nRT \ln \frac{V_2 - nb}{V_1 - nb} - n^2 a \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right)$$

20. Ιδανικό αέριο όγκου 5 L, πίεσης 10 atm και θερμοκρασίας 20°C εκτονώνεται έως 10 L. Να ευρεθεί το έργο i. σε ισόθερμο αντιστρεπτή διεργασία ii. σε μη αντιστρεπτή διεργασία υπό εξωτερική πίεση 1 atm, iii. σε μη αντιστρεπτή διεργασία υπό εξωτερική πίεση μηδέν.
21. Η πίεση σε 1 kg μεταλλικού κύβου, τοποθετημένου εντός λουτρού σταθερής θερμοκρασίας, αυξάνεται οιονεί στατικά από 0 σε 500 atm. Αν η πυκνότητα ρ και ο ισόθερμος συντελεστής συμπίεστότητας κ_T παραμένουν σταθεροί, να ευρεθεί το παραγόμενο έργο. (Δίνονται: $\rho = 10 \text{ g/cm}^3$ και $\kappa_T = 0.68 \cdot 10^{-4} \text{ atm}^{-1}$).
22. 2 mol ιδανικού αερίου με $T = 20^\circ\text{C}$ και $P_1 = 10 \text{ atm}$ εκτονώνεται ισόθερμα και μη αντιστρεπτά υπό την επίδραση σταθερής εξωτερικής πίεσεως $P_e = 1 \text{ atm}$. Να υπολογισθεί το παραγόμενο έργο και η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας όταν το σύστημα φθάσει σε ισορροπία. Να υπολογισθούν τα ίδια μεγέθη κατά την ισόθερμη και αντιστρεπτή εκτόνωση από την πίεση $P_1 = 10 \text{ atm}$ σε $P_2 = 1 \text{ atm}$.

23. Να ευρεθεί το έργο, η θερμότητα και η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας κατά την ισόθερμη αντιστρεπτή εκτόνωση αερίου από όγκο V_1 σε V_2 , όταν η καταστατική εξίσωση είναι:

$$i) P(V - b) = RT$$
$$ii) PV = RT \left(1 + \frac{b}{V} \right)$$

24. 2 mol ιδανικού αερίου θερμοκρασίας 293.15 K συμπιέζονται αδιαβατικά έως όγκο 1 dm^3 και πίεση 1 atm. Να ευρεθεί το έργο και η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ($c_v = 3 \text{ cal/mol K}$).
25. 14 g N_2 ψύχονται υπό σταθερή πίεση 1 atm από θερμοκρασία 288.15 K στους 258.15 K. Το N_2 θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ιδανικά. Να υπολογισθεί η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας και της ενθαλπίας του αερίου. Δίνονται: $c_p = 6.01 \text{ cal/mol K}$, $R = 2 \text{ cal/mol K}$.
26. Το απειροστό έργο που παράγεται σε αντιστρεπτή διεργασία υδροστατικού συστήματος δίνεται από την σχέση: $dW = PdV$. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι $V = V(P,T)$, το dW μπορεί να χαρακτηριστεί τέλειο διαφορικό; Υπάρχουν περιπτώσεις που είναι τέλειο διαφορικό; Το διαφορικό dW , που ονομάζεται διαφορικό διαδρομής, τι υποδηλώνει ;
27. Ν' αποδειχθεί ότι το dq που ενέχεται σε αντιστρεπτή διεργασία υδροστατικού συστήματος δεν είναι τέλειο διαφορικό.
28. Κατά την διεργασία θέρμανσης ενός γραμμομορίου ιδανικού αερίου, η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή την ιδιότητα $c_z = R$. Αν η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο είναι $c_v = 3R/2$, να ευρεθεί η εξίσωση που ικανοποιούν κατά την διεργασία, η πίεση και ο όγκος (ή άλλως να δειχθεί ότι $PV^3 = K$).
29. Ν' αποδειχθεί ότι σε ιδανικό αέριο ισχύει: $c_p - c_v = R$.
30. Να υπολογισθεί το έργο κατά την «οιονεί στατική» αδιαβατική εκτόνωση ιδανικού αερίου από την αρχική κατάσταση i στην τελική f (ή άλλως n' αποδειχθεί ότι: $W = (P_f V_f - P_i V_i)/(1-\gamma)$ όπου $\gamma = c_p / c_v$).

Θεμελιώδεις εξισώσεις

31. Οι εξισώσεις:

$$i) S = \left(\frac{R^2}{v_o \theta} \right)^{1/3} (nVU)^{1/3}$$

$$ii) S = \left(\frac{R}{\theta^2} \right)^{2/3} \left(\frac{nU}{V} \right)^{2/3}$$

$$iii) u = \frac{v_o^{1/2} \theta s^{5/2}}{R^{3/2} v^{1/2}}$$

$$iv) S = \frac{n}{2} \left(A + 5R \ln \frac{U}{n} + 2R \ln \frac{V}{n} \right)$$

$$v) U = A \frac{S^{5/2}}{nP^{1/2}}$$

θα μπορούσαν να αποτελούν τις θεμελιώδεις εξισώσεις θερμοδυναμικών συστημάτων; Αν ναι, να ευρεθούν οι καταστατικές εξισώσεις των συστημάτων αυτών. Ποίου βαθμού είναι ως προς τις εκτατικές μεταβλητές που περιέχουν;

32. Η εξίσωση :

$$S = S_o + nf(u) + nR \ln \frac{v}{v_o}$$

είναι η θεμελιώδης εξίσωση θερμοδυναμικού συστήματος, να ευρεθούν οι καταστατικές εξισώσεις του. Ο όρος $f(u)$ συμβολίζει συνάρτηση της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος.

33. Εάν οι εξισώσεις:

$$H = A \frac{S^2}{n} \ln \frac{P}{P_o} \text{ και } G = nRT \ln \frac{\alpha P}{(RT)^{5/2}}$$

είναι οι θεμελιώδεις εξισώσεις θερμοδυναμικού συστήματος να ευρεθούν οι καταστατικές εξισώσεις τους, ο ισόθερμος συντελεστής συμπίεστικότητας, η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση και ο συντελεστής διαστολής.

•Στις ασκήσεις αυτές $R, v_o, \theta, A, \alpha$ είναι σταθερές θετικές ποσότητες, n ο αριθμός των γραμμομορίων και s, u, v, η γραμμομοριακή εντροπία, η γραμμομοριακή εσωτερική ενέργεια και ο γραμμομοριακός όγκος αντίστοιχα.

Υπολογισμός μεταβολής εντροπίας σε διάφορες διεργασίες. Υπολογισμός έργου θερμικών ή ψυκτικών μηχανών.

34. 10 g μετάλλου θερμοχωρητικότητας 0.84 J/g K και θερμοκρασίας 50°C βυθίζονται σε λουτρό 10°C. Να ευρεθεί η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος. Αν το μέταλλο έλθει σε επαφή με όμοιο κομμάτι μετάλλου θερμοκρασίας 10°C, να ευρεθεί η μεταβολή της εντροπίας του νέου συστήματος.

35. Ηλεκτρική αντίσταση αποτελούμενη από Cu, αντιστάσεως $R = 20 \Omega$, είναι βυθισμένη σε λουτρό θερμοκρασίας 20°C και διαρέεται από ρεύμα εντάσεως 2 A επί χρόνο 1 s . Να ευρεθεί η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος. Εάν η αντίσταση μονωθεί ποια η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος; (Δίδονται: η θερμοχωρητικότητα $c_p = 0.384 \text{ J/g K}$ και η μάζα $m = 15 \text{ g}$)
36. Σώμα θερμοκρασίας 20°C και θερμοχωρητικότητας C_p φέρεται σε επαφή με αποθήκη θερμότητας θερμοκρασίας 80°C . Να ευρεθεί η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος. Εάν το σώμα φέρεται σε επαφή με αποθήκη θερμοκρασίας 50°C και ακολούθως με την αποθήκη των 80°C , ποια η μεταβολή της εντροπίας του νέου συστήματος; Εάν το σώμα αποκτήσει θερμοκρασία 80°C , με επαφή διαδοχικά με σειρά αποθηκών θερμοκρασίας αυξανόμενης από 20 έως 80°C , ποια η μεταβολή της εντροπίας του συνολικού συστήματος;
37. Σώμα θερμοχωρητικότητας C_p και θερμοκρασίας T_1 φέρεται σε επαφή με αποθήκη θερμότητας θερμοκρασίας T_2 ($T_1 < T_2$). Να ευρεθεί η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος. (Απαντ. $\Delta S = C_p [\ln (T_2/T_1) + (T_1/T_2) - 1]$)
38. Θερμική μηχανή λειτουργεί μεταξύ δύο ομοίων σωμάτων, θερμοχωρητικότητας C_p και θερμοκρασίας T_1 και T_2 αντίστοιχα ($T_1 < T_2$) Να ευρεθεί το μέγιστον έργο που παράγεται κατά την λειτουργία της μηχανής υπό σταθερή πίεση. Εάν τα δύο σώματα έλθουν σε επαφή μεταξύ τους ποια η μεταβολή της εντροπίας του συνολικού συστήματος; Η τελική θερμοκρασία κατά την θερμική ισορροπία που αποκαθίσταται στις δύο περιπτώσεις είναι ίδια ή διαφορετική; Αιτιολογήσετε με σαφήνεια.
Απαντ. $W = C_p [T_1 + T_2 - 2\sqrt{T_1 T_2}]$
39. Εάν θερμική μηχανή λειτουργεί αντιστρεπτά μεταξύ σώματος θερμοχωρητικότητας C_p και θερμοκρασίας T_1 και αποθήκης θερμότητας θερμοκρασίας T_2 ($T_1 < T_2$) να ευρεθεί το παραγόμενο έργο.
(Απ. $W = C_p [T_1 - T_2 + T_2 \ln T_2 / T_1]$)
40. Θερμική μηχανή λειτουργεί αντιστρεπτά μεταξύ δύο αποθηκών θερμότητας, θερμοκρασίας T_1 και T_2 αντίστοιχα ($T_1 < T_2$). Να ευρεθεί το έργο που παράγεται (εάν είναι γνωστά τα ποσά της θερμότητας που ανταλλάσσονται με τις δύο αποθήκες) και η συνολική μεταβολή της εντροπίας.
41. Ψυκτική μηχανή λειτουργεί μεταξύ δύο ομοίων σωμάτων, θερμοχωρητικότητας C_p και ίδιας αρχικής θερμοκρασίας T_1 . Να ευρεθεί το ελάχιστον έργο που απαιτείται για την λειτουργία της μηχανής υπό σταθερή πίεση έως ότου το ψυχόμενον σώμα αποκτήσει την θερμοκρασία T_2 .
(Απαντ. $W = C_p \{ (T_1^2 / T_2) + T_2 - 2 T_1 \}$)
42. $50 \text{ g H}_2\text{O}$ θερμοκρασίας 10°C ψύχεται σε πάγο θερμοκρασίας -5°C υπό σταθερή ατμοσφαιρική πίεση. Να υπολογισθεί η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος και περιβάλλοντος κατά την διεργασία αυτή. (Δίδονται: θερμοχωρητικότητες νερού και πάγου $c_p(\text{υδ}) = 4.2 \text{ J/g K}$ και $c_p(\text{π}) = 2.1 \text{ J/g K}$ αντίστοιχα, θερμότητα τήξεως του πάγου στους 0°C , $\Delta h = 335 \text{ J/g}$)

43. Να ευρεθεί η τελική θερμοκρασία κατά την ανάμιξη 100 g νερού θερμοκρασίας 50°C με 200 g πάγου θερμοκρασίας -5°C και η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος. (Δίδονται: θερμοχωρητικότητες νερού και πάγου $c_p(\text{υδ}) = 4.2 \text{ J/g K}$ και $c_p(\pi) = 2.1 \text{ J/g K}$ αντίστοιχα, θερμότητα τήξεως του πάγου στους 0°C, $\Delta h = 335 \text{ J/g}$)
44. Όπως είναι γνωστό το υγρό H_2O ψύχεται κάτω από τους 0°C χωρίς να μετατραπεί σε πάγο, εάν δεν υπάρχουν «πυρήνες» έναρξης της πήξεως. Αδιαβατικό δοχείο περιέχει 100 g H_2O (υγρό), θερμοκρασίας 268.15 K. Εάν το σύστημα διαταραχθεί, θα αρχίσει η πήξη του νερού. Να ευρεθεί η τελική κατάσταση του συστήματος, να υπολογισθεί η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος και του περιβάλλοντος. (Δίδονται: θερμοχωρητικότητες νερού και πάγου $c_p(\text{υδ}) = 4.2 \text{ J/g K}$ και $c_p(\pi) = 2.1 \text{ J/g K}$ αντίστοιχα, θερμότητα τήξεως του πάγου στους 0°C, $\Delta h = 335 \text{ J/g}$)
45. Να ευρεθεί η ελάχιστη ποσότητα πάγου θερμοκρασίας -10°C που πρέπει να προστεθεί σε 200 g νερού θερμοκρασίας 20°C ώστε να μετατραπεί σε πάγο θερμοκρασίας 0°C. (Δίδονται: θερμοχωρητικότητες νερού και πάγου $c_p(\text{υδ}) = 4.2 \text{ J/g K}$ και $c_p(\pi) = 2.1 \text{ J/g K}$ αντίστοιχα, θερμότητα τήξεως του πάγου στους 0°C, $\Delta h = 335 \text{ J/g}$) και να υπολογισθεί η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος.
46. Δύο αδιαβατικά μονωμένα δοχεία όγκου $V_1 = 3 \text{ dm}^3$ και $V_2 = 1 \text{ dm}^3$ αντίστοιχα συνδέονται με στρόφιγγα. Στο δοχείο 1 (όγκου V_1) περιέχεται ιδανικό αέριο πίεσεως 1atm και θερμοκρασίας 293.15 K, ενώ το δοχείο 2 είναι κενό. Ανοίγεται η στρόφιγγα και το σύστημα αφήνεται να ισορροπήσει. Να ευρεθεί η θερμοκρασία και η πίεση στους δύο χώρους και η μεταβολή της εντροπίας του αερίου.
47. Να αποδειχθεί ότι η εντροπία ιδανικού αερίου δίνεται από την σχέση:
- $$S = C_V \ln P + C_P \ln V + \text{σταθ}$$
48. Η σχέση:
- $$dU = TdS - PdV$$
- εφαρμόζεται σε μη αντιστρεπτές διεργασίες; Αιτιολογήσετε με σαφήνεια.
49. Σύστημα φέρεται από κατάσταση 1 σε κατάσταση 2 αντιστρεπτά και επαναφέρεται στην αρχική του κατάσταση μέσω μη αντιστρεπτής διαδρομής. Η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος μεταξύ των δύο καταστάσεων είναι ίδια η διαφορετική; Αιτιολογήσετε με σαφήνεια την απάντησή σας.
50. Κλειστό αδιαβατικό κυλινδρικό δοχείο χωρίζεται σε δύο χώρους με διαθερμικό έμβολο που κινείται χωρίς τριβές. Οι δύο χώροι αρχικά έχουν ίσους όγκους V_0 (κρατώντας το έμβολο ακίνητο) και περιέχουν ιδανικό αέριο. Στον χώρο 1 το αέριο έχει πίεση P_0 και θερμοκρασία T_0 , ενώ στον χώρο 2 έχει πίεση $P_0/2$ και θερμοκρασία T_0 . Εάν το έμβολο αφηθεί ελεύθερο και στο σύστημα αποκατασταθεί θερμοδυναμική ισορροπία, να υπολογισθεί η συνολική μεταβολή της εντροπίας και οι τελικές τιμές της πίεσεως και της θερμοκρασίας στην ισορροπία.
51. Να ευρεθεί η μεταβολή της εντροπίας σώματος αρχικής θερμοκρασίας T_2 και θερμοχωρητικότητας $C_p = a + \beta T + cT^2$, κατά την αντιστρεπτή λειτουργία μηχανής μεταξύ του σώματος αυτού και αποθήκης θερμότητας, θερμοκρασίας T_1 ($T_1 < T_2$).