

ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΟΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΗΜΕΡΑ

M. I. ΑΣΣΑΕΛ, Κ. Δ. ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ, I. Ν. ΜΕΤΑΞΑ

**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τ.Θ. 453, 54124 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
imetaxa@cheng.auth.gr**

Η θερμική αγωγιμότητα και το ιξώδες είναι δύο θερμοφυσικές ιδιότητες με ιδιαίτερη σημασία, καθώς η γνώση των τιμών τους με ικανοποιητική ακρίβεια υπεισέρχεται στο σχεδιασμό και στις εξισώσεις υπολογισμού ενός μεγάλου αριθμού μεγεθών, παραμέτρων και συσκευών. Τα μεγέθη αυτά βρίσκουν εφαρμογές στη θερμοδυναμική, τη ρευστοδυναμική, την αρχιτεκτονική, σε τεχνολογίες ψύξης-κλιματισμού και αλλού. Άλλα μεγέθη που παρουσιάζουν αντίστοιχο ενδιαφέρον είναι η πυκνότητα, η θερμική διαχυτότητα και ο συντελεστής διάχυσης.

Για κάθε μέγεθος είναι απαραίτητο να υπάρχουν πρότυπα υλικά αναφοράς που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της λειτουργίας των συσκευών, τη σύγκριση της ικανότητας μέτρησης διαφόρων εργαστηρίων και την αξιολόγηση μίας νέας μεθόδου μέτρησης. Ειδικότερα, για την περίπτωση της θερμικής αγωγιμότητας, της πυκνότητας και της θερμικής διαχυτότητας είναι αναγκαία η ύπαρξη πρότυπων υλικών αναφοράς για την αέρια, την υγρή και τη στερεά κατάσταση, για τις διάφορες κατηγορίες υλικών και τις περιοχές τιμών της ιδιότητας αυτής. Αντίστοιχα, για το ιξώδες και το συντελεστή διάχυσης υπάρχουν υλικά αναφοράς για την αέρια και την υγρή φάση, για τα διάφορα είδη των υλικών και την τάξη μεγέθους της τιμής της ιδιότητας.

1. ΠΡΟΤΥΠΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η επιλογή ενός υλικού ως προτύπου αναφοράς δεν είναι μία απλή διαδικασία. Όπως στην περίπτωση των φυσικών, ηλεκτρικών, μηχανικών και άλλων μεγεθών, είναι απαραίτητο να οριστούν με μεγάλη ακρίβεια τα πρότυπα αναφοράς, ώστε να εξασφαλίζεται η ιχνηλασιμότητα των προτύπων εργασίας στα εθνικά και διεθνή πρότυπα. Επιτροπές που απαρτίζονται από κορυφαίες επιστημονικές ομάδες σε διεθνές επίπεδο είναι απαραίτητο να συνεργαστούν, να εξετάσουν τα υποψήφια υλικά ως προς το αν πληρούν τις αναγκαίες προϋποθέσεις, να εκτελέσουν μία σειρά από πειράματα και υπολογισμούς πριν ληφθεί η τελική απόφαση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα υλικό αναφοράς πρέπει να έχει καθορισμένη σύσταση με μεγάλη ακρίβεια, να είναι ευρέως διαθέσιμο σε υψηλή καθαρότητα και σε προσιτή τιμή. Επιπλέον, πρέπει να έχει σταθερές φυσικές ιδιότητες, καθορισμένες με μεγάλη ακρίβεια σε μία μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών και πιέσεων. Η επιτροπή της Διεθνούς Ένωσης Ιδιοτήτων Μεταφοράς (International Association on Transport Properties, <http://transp.cheng.auth.gr/>) - πρώην Subcommittee on Transport Properties της International Union of Pure & Applied Chemistry, IUPAC - διερευνά τα υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως πρότυπα, αξιολογεί τις υποψηφιότητες με τα παραπάνω κριτήρια και μετά από μία σειρά συγκριτικών δοκιμών εισηγείται για τη χρήση ή μη ενός υλικού ως προτύπου αναφοράς.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η προαναφερθείσα διαδικασία δεν είναι απλή. Απαιτείται αρκετός χρόνος, προσεκτική αξιολόγηση και επανεξέταση του ζητήματος όταν

προκύπτουν νέες επιστημονικές μέθοδοι μέτρησης, προσδιορισμού και υπολογισμού των μελετούμενων ιδιοτήτων. Η διαδικασία της επιλογής υλικών βρίσκεται σε εξέλιξη για αρκετές περιοχές τιμών του ιξώδους και της θερμικής αγωγιμότητας. Επιπρόσθετα, αρμόδιες επιτροπές βελτιστοποιούν διαρκώς τη μέθοδο και την ακρίβεια υπολογισμού των τιμών των ιδιοτήτων για τα υλικά που έχουν ήδη χαρακτηριστεί ως πρότυπα αναφοράς. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί σε μία συνοπτική κριτική παρουσίαση της ανωτέρω κατάστασης σήμερα και ειδικότερα στην καταγραφή των κυριοτέρων πρότυπων υλικών θερμικής αγωγιμότητας, θερμικής διαχυτότητας, ιξώδους, πυκνότητας και συντελεστή διάχυσης.

2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΧΥΤΟΤΗΤΑ

Η θερμική αγωγιμότητα, λ , ενός ρευστού αναφέρεται στην τάση του να μεταδίδει ενέργεια, όταν διαταράσσεται από την κατάσταση ισορροπίας του με την επιβολή μίας μεταβολής θερμοκρασίας, ∇T . Η θερμική αγωγιμότητα ορίζεται από το νόμο του Fourier για τα ισοτροπικά ρευστά:

$$\mathbf{Q} = -\lambda \nabla T, \quad (1)$$

όπου \mathbf{Q} είναι η στιγμιαία ροή θερμότητας, η οποία είναι η απόκριση του μέσου στη στιγμιαία μεταβολή θερμοκρασίας. Η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη θερμοδυναμική κατάσταση του ρευστού. Δεδομένου ότι είναι αδύνατο να μετρηθούν οι τοπικές ροές και οι τοπικές μεταβολές θερμοκρασίας, η εξίσωση (1) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απ' ευθείας για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας ενός ρευστού, αλλά περιγράφει τον ορισμό του μεγέθους.

Ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας μέσω ενός ρευστού περιγράφεται από τη θερμική του διαχυτότητα, a , η οποία ορίζεται ως:

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (2)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού και C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση. Σε ορισμένες τεχνικές, η θερμική αγωγιμότητα λαμβάνεται έμμεσα από τη μετρούμενη θερμική διαχυτότητα, εφόσον είναι γνωστή η πυκνότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση.

2.1. Υγρά

Το τολουόλιο και το νερό έχουν προταθεί ως πρότυπα υγρά αναφοράς. Η Subcommittee on Transport Properties της IUPAC, έχει προτείνει [1, 2] τις ακόλουθες τιμές:

Για το τολουόλιο στους 298.15 K και 0.1 MPa

$$\lambda = 0.13088 \pm 0.00085 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad (3)$$

και για το νερό στους 298.15 K και 0.1 MPa

$$\lambda = 0.6065 \pm 0.0036 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \quad (4)$$

Η συνάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία περιγράφεται με τις ακόλουθες εξισώσεις, όπου $T^*=(T/298.15 \text{ K})$ και $\lambda^*=(\lambda(T)/\lambda(298.15 \text{ K}))$:

Για το τολουόλιο

$$\lambda^* = 0.420919 + 3.629457 T^* - 5.348298 T^{*2} + 2.818948 T^{*3} - 0.519700 T^{*4} \quad \text{για} \quad 189 \text{ K} \leq T \leq 553 \text{ K} . \quad (5)$$

Για το νερό

$$\lambda^* = -1.48445 + 4.12292 T^* - 1.63866 T^{*2} \quad \text{για} \quad 274 \text{ K} \leq T \leq 370 \text{ K} \quad (6)$$

Η αβεβαιότητα της εξίσωσης (5) είναι $\pm 1\%$ έως 440 K, $\pm 1.5\%$ ως 480 K και $\pm 2\%$ ως 553 K, ενώ της εξίσωσης (6) είναι $\pm 0.7\%$. Δευτερεύοντα πρότυπα ρευστά αναφοράς είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία [3].

2.2. Αέρια

Στην περίπτωση των αερίων, ως πρότυπες τιμές θεωρούνται οι τιμές των ευγενών αερίων (Πίνακα 1). Οι τιμές αυτές έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη θεωρία και τα αντίστοιχα δεδομένα ιξώδους. Η εκτιμώμενη αβεβαιότητα είναι $\pm 0.3\%$ σε εύρος 298 – 470 K, και $\pm 0.5\%$ στην περιοχή 470 – 770 K.

Για υψηλότερες πιέσεις, μέχρι 30 MPa, και στη θερμοκρασία των 300.65 K, η θερμική αγωγιμότητα του αργού περιγράφεται από την εξίσωση [4]

$$\lambda = 17.751 + 21.402 \times 10^{-3} \rho + 27.247 \times 10^{-6} \rho^2 \quad (7)$$

όπου λ μετράται σε $\text{mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ και ρ σε $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Δευτερεύοντα πρότυπα ρευστά αναφοράς είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία [3].

Πίνακας 1. Τιμές Αναφοράς για τη Θερμική Αγωγιμότητα των Ευγενών Αερίων σε 0.1 MPa

Θερμική Αγωγιμότητα, $\text{mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$					
T/K	Ήλιο	Νέο	Αργό	Κρυπτό	Ξένο
298.15	155.3	49.24	17.67	9.451	5.482
373.15	181.1	57.84	21.36	11.630	6.852
473.15	213.9	67.43	25.59	14.180	8.534
573.15	244.7	76.79	29.60	16.500	10.070
673.15	274.1	85.34	33.14	18.640	11.490
773.15	302.0	93.39	36.50	20.640	12.810

2.3. Στερεά

Στην περίπτωση των στερεών, και από το Μάιο του 2007, το Pyroceram 9606 διατίθεται από το Institute for Reference Materials and Measurements (<http://www.irmm.jrc.be/>) της ΕΕ, ως υαλώδες κεραμικό BCR-724, πιστοποιημένο στερεό θερμικής αγωγιμότητας και θερμικής διαχυτότητας ως τους 1025 K [5]. Οι προτεινόμενες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας, λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, T (K), είναι

$$\lambda = 2.332 + 515.1 / T \quad (8)$$

με αβεβαιότητα $\pm 6.5\%$. Για τη θερμική διαχυτότητα, α $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1} \times 10^{-6}$, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, T (K), και με αβεβαιότητα $\pm 6.1\%$, ως

$$\alpha = 4.406 - 1.351 \times 10^{-2} T + 2.133 \times 10^{-5} T^2 - 1.541 \times 10^{-8} T^3 + 4.147 \times 10^{-12} T^4 \quad (9)$$

3. ΙΞΩΔΕΣ

Το δυναμικό ιξώδες, μ , ενός ρευστού είναι μέτρο της τάσης του να μεταδίδει ενέργεια όταν διαταράσσεται από την ισορροπία του από πεδίο ταχύτητας v , το οποίο παραμορφώνει το ρευστό με ρυθμό, $\dot{\epsilon}_{ij}$, που δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

Για Νευτώνικα ρευστά το ιξώδες ορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right). \quad (11)$$

Στην παραπάνω σχέση, σ_{ij} είναι η στιγμιαία τάση, P , η πίεση και δ_{ij} η σταθερά Kronecker. Στη σχέση (10) γίνεται η συνήθης παραδοχή ότι το επονομαζόμενο διαστολικό ιξώδες είναι μηδέν. Το ιξώδες εξαρτάται από τη θερμοδυναμική κατάσταση του ρευστού και συνήθως καθορίζεται από ζεύγη τιμών (T, P) ή (T, ρ) του καθαρού ρευστού, στο οποίο προστίθεται η εξάρτηση από τη σύσταση για την περίπτωση των μιγμάτων.

3.1. Υγρά

Το διεθνώς συμφωνημένο πρότυπο για το ιξώδες, ISO/TR 3666:1998, είναι το ιξώδες του νερού στους 293.15 K και σε ατμοσφαιρική πίεση (0.101 325 MPa). Η εγκεκριμένη τιμή του είναι:

$$\mu = 1.0016 \text{ mPa}\cdot\text{s} . \quad (12)$$

Η παραπάνω τιμή έχει εκτιμώμενη σχετική αβεβαιότητα $\pm 0.17\%$. Βασίζεται στην τιμή των 1.0019 mPa s που δημοσιεύθηκε από τους Swindells et al. [6] το 1952, η οποία ήταν η βάση του ISO/TR 3666:1977. Η μικρή διαφορά στην τιμή οφείλεται στη διαφορά μεταξύ των κλιμάκων θερμοκρασίας ITS-48 και ITS-90.

Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του ιξώδους του νερού σε ατμοσφαιρική πίεση σε θερμοκρασιακό εύρος 0.01 - 100 °C, δίνεται από την ακόλουθη προτεινόμενη εξίσωση [7]:

$$\log \frac{\mu(\theta)}{\mu(20^\circ\text{C})} = \frac{\theta}{116 - \theta} \left\{ 1.2378 - 1.303 \times 10^{-3} \theta + 3.06 \times 10^{-6} \theta^2 + 2.55 \times 10^{-8} \theta^3 \right\} \quad (13)$$

όπου $\theta = 20 - T/^\circ\text{C}$. Η εκτιμώμενη αβεβαιότητα της σχέσης (13) είναι καλύτερη από $\pm 0.1\%$.

3.2. Αέρια

Για την περίπτωση του ιξώδους των αερίων, ως πρότυπο χρησιμοποιείται συνήθως το άζωτο, λόγω του ότι είναι άμεσα διαθέσιμο σε πολύ υψηλή καθαρότητα και σε προσιτή τιμή. Η ακόλουθη τιμή προτείνεται [3] για το ιξώδες του αζώτου στους 298.15 K και σε ατμοσφαιρική πίεση:

$$\mu = 17.710 \pm 0.016 \mu\text{Pa}\cdot\text{s} . \quad (14)$$

Στον Πίνακα 2 δίνονται προτεινόμενες τιμές για το ιξώδες των ευγενών αερίων σε πίεση 0.1 MPa. Οι τιμές αυτές έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας συνδυασμό πειραματικών δεδομένων και της διαθέσιμης θεωρίας. Η εκτιμώμενη αβεβαιότητά τους είναι $\pm 0.2\%$ για το εύρος 298 – 470 K και $\pm 0.4\%$ για το εύρος 470 – 770 K.

Πίνακας 2. Τιμές Αναφοράς για το Ιξώδες των Ευγενών Αερίων σε 0.1 MPa

T/K	Ιξώδες, $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$				
	Ήλιο	Νέο	Αργό	Κρυπτό	Ξένο
298.15	19.86	31.76	22.62	25.39	23.09
373.15	23.16	37.06	27.32	31.22	28.84
473.15	27.35	43.47	32.85	38.06	35.91
573.15	31.28	49.50	37.83	44.28	42.38
673.15	35.04	55.00	42.35	49.99	48.32
773.15	38.60	60.19	46.63	55.34	53.84

Για μεγαλύτερες πιέσεις, μέχρι 30 MPa, και για θερμοκρασία 298.15 K, το ιξώδες του αζώτου δίνεται από την εξίσωση [3]

$$\mu = 0.17763 \times 10^{-4} + 0.86870 \times 10^{-8} \rho + 0.14240 \times 10^{-9} \rho^2 \quad (15)$$

όπου το ιξώδες μ μετράται σε $\text{Pa}\cdot\text{s}$ και η πυκνότητα ρ σε $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Δευτερεύοντα πρότυπα ρευστά αναφοράς είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία [3].

4. ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Η πυκνότητα ορίζεται ως ο λόγος της μάζας ανά μονάδα όγκου ενός υλικού, μίας ουσίας, υπό καθορισμένες συνθήκες. Η πυκνότητα επηρεάζεται όταν μεταβάλλονται οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Σημειώνεται ότι η επίδραση αυτή είναι μεγαλύτερη για τα αέρια, από ότι για τα στερεά.

4.1. Υγρά & Αέρια

Η πυκνότητα του νερού χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως ως πρότυπο για την πυκνότητα των υγρών. Η εξίσωση που αναπτύχθηκε από τους Wagner and Pruβ [8] υιοθετήθηκε από τη International Association for the Properties of Water and Steam, IAPWS το 1995. Η εξίσωση της IAPWS για τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του συνηθούς νερού για επιστημονική και γενική χρήση ονομάζεται IAPWS 1995 (IAPWS-95) [9]. Αντιπροσωπεύει όλες τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του νερού από τη γραμμή τήξης (251.2 K στα 209.9 MPa) μέχρι τη θερμοκρασία των 1273 K και για πιέσεις μέχρι 1 GPa. Σε όλο αυτό το εύρος η IAPWS-95 περιγράφει ακόμη και τις πιο ακριβείς μετρήσεις μέσα στα πλαίσια της πειραματικής ακρίβειας. Στον Πίνακα 3 δίνονται τιμές πυκνότητας σε συγκεκριμένα σημεία πίεσης και θερμοκρασίας.

Πίνακας 3. Τιμές Αναφοράς για την Πυκνότητα ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) του Νερού και του Ατμού

Πίεση, MPa				
T/K	0.1	1	5	10
273.25	999.8	1000	1002	1005
283.15	999.7	1000	1002	1004
298.15	997.0	997.5	999.2	1001
323.15	988.0	988.4	977.0	992.3
353.15	974.8	975.1	977.0	979.2
373.15	0.5897	958.8	960.6	962.9
473.15	0.4603	4.854	867.3	870.9
573.15	0.3790	3.876	22.05	715.3
773.15	0.2805	2.824	14.58	30.48
973.15	0.2227	2.233	11.30	22.94

5. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Ο συντελεστής διάχυσης ενός μίγματος δύο ή περισσότερων χημικών συστατικών είναι μέτρο της τάσης του να παράγει εντροπία, όταν διαταράσσεται από την ισορροπία του με την επιβολή μεταβολής του χημικού δυναμικού των συστατικών. Όπως και οι άλλοι συντελεστές μεταφοράς, ο συντελεστής διάχυσης ορίζεται ως η αναλογική σταθερά μεταξύ μίας ροής και μίας κινούσας δύναμης. Ωστόσο, αντίθετα με άλλες διεργασίες μεταφοράς, η ροή διάχυσης των μορίων έχει οριστεί σε σχέση με έναν αριθμό διαφορετικών πλαισίων αναφοράς και η κινούσα δύναμη έχει επίσης εκφραστεί με εναλλακτικούς τρόπους. Επομένως, υπάρχουν διάφοροι συντελεστές διάχυση σε χρήση. Στην παρούσα εργασία, επιλέγεται η έκφραση που οδηγεί σε φαινομενολογική εξίσωση, η οποία είναι πιο κοντά με την ανάλογη σχέση που περιγράφει τη διαδικασία διάχυσης σε ένα πείραμα. Για λόγους απλότητας περιοριζόμαστε σε δυαδικά συστήματα. Επομένως

χρησιμοποιείται η μεταβολή της μοριακής πυκνότητας ενός συστατικού ως κινούσα δύναμη και λαμβάνονται υπ' όψη οι μοριακές ροές και των δύο συστατικών, J_1 and J_2 , αναφερόμενες σε ορισμένο όγκο αναφοράς που ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$v_1 J_1 + v_2 J_2 = 0 \quad (16)$$

όπου v_1 και v_2 είναι οι μερικοί μοριακοί όγκοι των συστατικών του μίγματος. Ο νόμος του Fick δίνει τις μοριακές ροές σε κάθε στιγμή σε σχέση με το πλαίσιο αναφοράς ως:

$$\begin{aligned} J_1 &= -D_{12} \left(\frac{\partial C_1}{\partial x} \right)_t \\ J_2 &= -D_{21} \left(\frac{\partial C_2}{\partial x} \right)_t \end{aligned} \quad (17)$$

όπου C_1 and C_2 είναι οι μοριακές πυκνότητες των δύο συστατικών. Οι συντελεστές D_{12} και D_{21} είναι οι συντελεστές διάχυσης για το μίγμα και από τον ορισμό

$$v_1 C_1 + v_2 C_2 = 1, \quad (18)$$

προκύπτει ότι

$$D_{12} = D_{21} \quad (19)$$

5.1 Υγρά

Ο συντελεστής αλληλοδιάχυσης υδατικών διαλυμάτων χλωριούχου καλίου προτείνεται ως το πρότυπο αναφοράς [10] για την υγρή φάση. Στον Πίνακα 4 δίνονται τιμές για το ολοκλήρωμα του συντελεστή διάχυσης ορίζεται ως:

$$\bar{D}_{12}(\bar{C}_1) = \frac{1}{\bar{C}_1} \int_0^{\bar{C}_1} D_{12} dC_1, \quad (20)$$

όπου D_{12} είναι ο πραγματικός 'διαφορικός' συντελεστής διάχυσης και C_1 η συγκέντρωση του συστατικού 1 σε έναν από τους δύο θαλάμους ενός κελιού με διάφραγμα [11]. Οι τιμές του Πίνακα 4 προκύπτουν από τα δεδομένα των Woolf και Tilley [12].

Για μίγματα αερίων οι προτεινόμενες τιμές του συντελεστή διάχυσης για πέντε μίγματα στους 300K και σε 0.101325 MPa μπορούν να υπολογιστούν από την παρακάτω εξίσωση

$$D_{12} = D_{12}(0) \left\{ 1 + \frac{a_1 x_2}{1 + a_2 x_2} \right\}. \quad (21)$$

Στη σχέση αυτή, x_2 είναι το κλάσμα mole του βαρύτερου συστατικού και οι τιμές των $D_{12}(0)$, a_1 and a_2 δίνονται στον Πίνακα 5. Η εξίσωση (21) αντιπροσωπεύει τα πειραματικά δεδομένα των Dunlop *et al.* [13]. Η εκτιμώμενη αβεβαιότητα των δεδομένων αυτών είναι περίπου $\pm 0.1\%$.

Πίνακας 4. Διαφορικός Συντελεστής Διάχυσης για υδατικά διαλύματα NaCl στους 298.15 K

C_1 mol·dm ⁻³	$\bar{D}_{12}(C_1) \times 10^9$ m ² ·s ⁻¹	C_1 mol·dm ⁻³	$\bar{D}_{12}(C_1) \times 10^9$ m ² ·s ⁻¹
0.001	1.973	0.060	1.890
0.002	1.966	0.070	1.886
0.003	1.961	0.080	1.882
0.004	1.956	0.090	1.878
0.005	1.953	0.100	1.874
0.006	1.949	0.200	1.857
0.007	1.947	0.300	1.850
0.008	1.944	0.400	1.848
0.009	1.941	0.500	1.848
0.010	1.939	0.600	1.849
0.020	1.923	0.700	1.850
0.030	1.911	0.800	1.852
0.040	1.903	0.900	1.855
0.050	1.896	1.000	1.858

5.2. Αέρια

Η εξάρτηση των συντελεστών διάχυσης από τη θερμοκρασία δίνεται για το εύρος 50 - 1000 K από τους Kestin et al. [14].

Πίνακας 5. Δεδομένα Συντελεστών Διάχυσης της Αέριας Φάσης σε πίεση 0.101325 MPa

Σύστημα	$D_{12}^{(0)} \times 10^5$ m ² s ⁻¹	a ₁	a ₂
He – Ar	7.344	0.0846	1.4825
He – N ₂	7.067	0.0676	1.4883
He – O ₂	7.469	0.0564	1.1270
He – CO ₂	6.029	0.0905	2.3952
N ₂ – Ar	2.034	0.0041	0.0

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. M.L.V. Ramires, C.A. Nieto de Castro, R.A. Perkins: New improved recommendations for the thermal conductivity of toluene and water, High Temperatures – High Pressures 25 (1993) 269-277
2. M.L.V. Ramires, C.A. Nieto de Castro, R.A. Perkins, Y. Nagasaka, A. Nagashima, M.J. Assael, W.A. Wakeham: Reference Data for the Thermal Conductivity of Saturated Liquid Toluene Over a Wide Range of Temperatures, J. Phys. Chem. Ref. Data 29 (2000) 133-139
3. W. Wakeham, A. Nagashima, J.V. Sengers (Eds.): Experimental Thermodynamics. Vol. III. Measurement of the Transport Properties of Fluids (Blackwell Scientific Publications, Oxford 1991)
4. J.F. Swindells, J.R. Coe Jr., T.B. Godfrey: Absolute viscosity of water at 20 °C, J. Res. NBS 48 (1952) 1-31
5. J. Kestin, R. Paul, A.A. Clifford, W.A. Wakeham: Absolute determination of the thermal conductivity of the noble gases at room temperature up to 35 MPa, Physica 100A (1980) 349-369
6. D. Salmon, G. Roebben, A. Lamberty, and R. Brandt, ‘Certification of thermal conductivity and thermal diffusivity up to 1025 K of a glass-ceramic reference material BCR-724’, Report EUR 21764 EN, DG JRC, Institute for Reference Materials and Measurements (2007).
7. J. Kestin, M. Sokolov, W.A. Wakeham: Viscosity of liquid water in range 8 to 150 °C, J. Phys. Chem. Ref. Data 7 (1978) 941-948
8. W. Wagner, A. Pruß: The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use, J. Phys. Chem. Ref. Data 31 (2002) 387-535
9. <http://www.iapws.org/>
10. J. Kestin, W.A. Wakeham: CINDAS Data Series on Material Properties. Vol. I.. Transport Properties of Fluids. Thermal Conductivity, Viscosity and Diffusion Coefficient (Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1988)
11. G.C. Maitland, E.B. Smith: Critical reassessment of viscosity of eleven common gases, J. Chem. Eng. Data 17 (1972) 150-16711
12. L.A. Woolf, J.F. Tilley: Revised values of integral diffusion coefficients of potassium chloride solutions for the calibration of diaphragm cells, J. Phys. Chem. 71 (1961) 1962-1963
13. P.S. Arora, I.R. Shankland, T.N. Bell, M.A. Yabsley, P.J. Dunlop: Use of precise binary diffusion coefficients to calibrate 2-bulb cell instead of using standard end-correction for connecting tube, Rev. Sci. Instrum. 48 (1977) 673-674
14. J. Kestin, K. Knierim, E.A. Mason, B. Najafi, S.T. Ro, W.A. Wakeham: Equilibrium and transport properties of the noble gases and their mixtures at low density, J. Phys. Chem. Ref. Data 13 (1984) 229-303

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ

Θερμική αγωγιμότητα, θερμική διαχυτότητα, ιξώδες, πυκνότητα, συντελεστής διάχυσης, πρότυπα υλικά αναφοράς