



ΙΔΕΠ

Ινστιτούτο
Χημικών
Διεργασιών και
Ενεργειακών
Πόρων

Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

Σχεδιασμός Χημικών Εγκαταστάσεων I

Βασικά στοιχεία σχεδιασμού

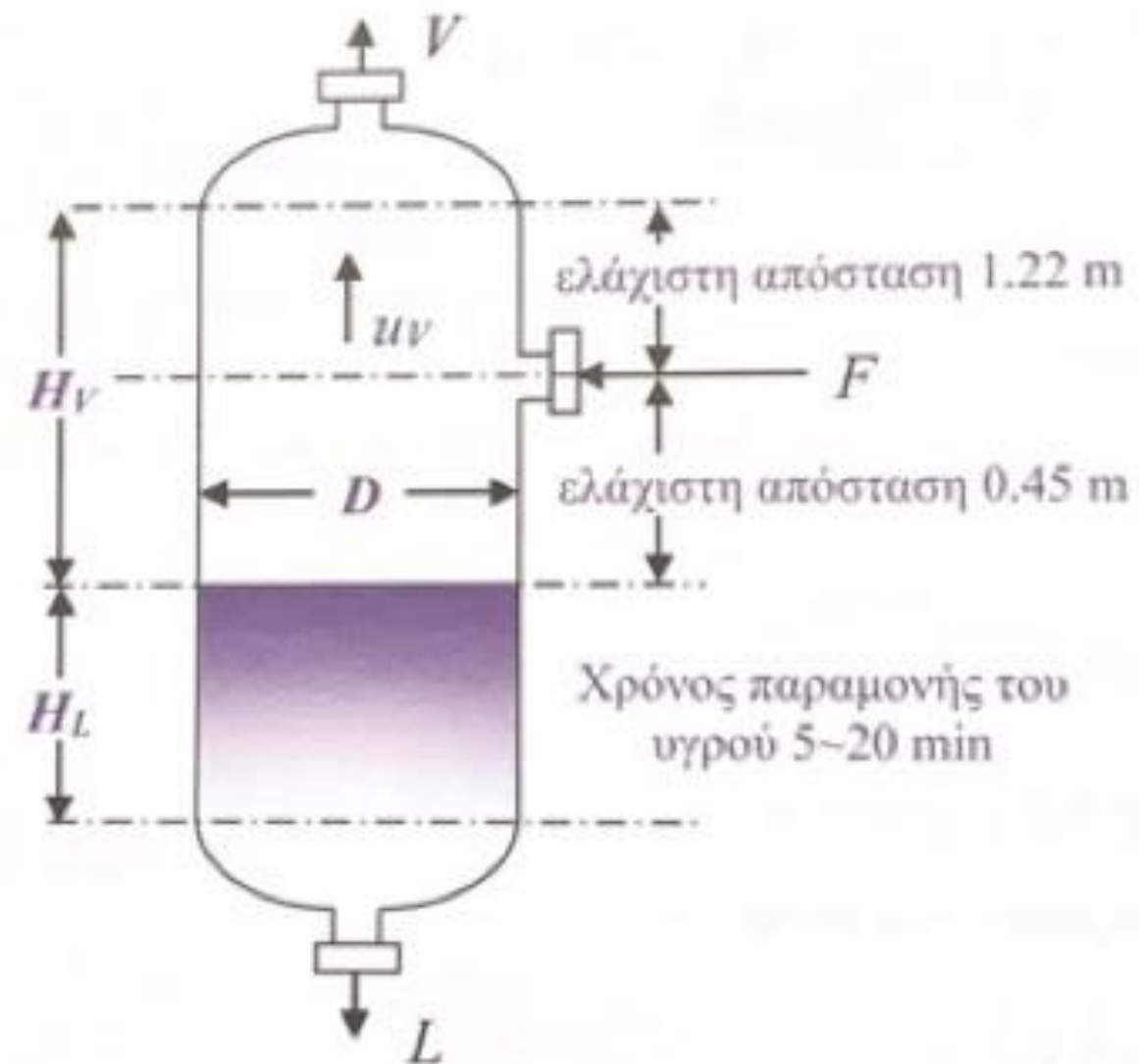
Καλογιάννης Κων/νος, kkalogia@cperi.certh.gr

Θερινό εξάμηνο 2019-2020

Διαστασιολόγηση δοχείων διαχωρισμού φάσεων

Κατακόρυφα δοχεία διαχωρισμού

Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός κατακόρυφων δοχείων διαχωρισμού αερίου-υγρού βασίζεται στις αρχές του παρακάτω σχήματος (σχήμα 8.9 Ιωάννης Κούκος, Σχεδιασμός Χημικών Εγκαταστάσεων, 2^η έκδοση)



ΣΧΗΜΑ 8.9. Αρχές προκαταρκτικού σχεδιασμού κατακόρυφων δοχείων διαχωρισμού αερίου-υγρού.

Διαστασιολόγηση δοχείων διαχωρισμού φάσεων

Κατακόρυφα δοχεία διαχωρισμού

- Αρχικά, υπολογίζουμε τον απαιτούμενο όγκο για το κατακρατούμενο υγρό V_L , υποθέτοντας ένα χρόνο παραμονής τ μεταξύ 5 και 20 min.

$$V_L = \tau \left(\frac{L'}{\rho_L} \right) \quad (8.46)$$

Όπου L' (kg/s) είναι η παροχή μάζας του υγρού προϊόντος και ρ_L (kg/m³) η πυκνότητα του υγρού προϊόντος.

- Έπειτα υπολογίζουμε την απαιτούμενη διάμετρο με βάση την ταχύτητα του αερίου u_v (m/s), που δίνεται από την εξίσωση:

$$u_v = K \left(\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v} \right)^{1/2} \quad (8.47)$$

Όπου K : 0,1 m/s αν χρησιμοποιηθεί φίλτρο κατακράτησης σταγονιδίων (demister) και 0,03 m/s άνευ φίλτρου.

- Με γνωστή τη ταχύτητα του αερίου, υπολογίζουμε της διάμετρο του δοχείου D (m) από:

$$V' = u_v \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \rho_v \quad (8.49)$$

Όπου V' η παροχή του αερίου (kg/s) και ρ_v η πυκνότητα του αερίου (kg/m³).

Διαστασιολόγηση δοχείων διαχωρισμού φάσεων

Κατακόρυφα δοχεία διαχωρισμού

- Έπειτα υπολογίζουμε το υψος του υγρού H_L από τον τύπο

$$H_L = \frac{V_L}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad (8.50)$$

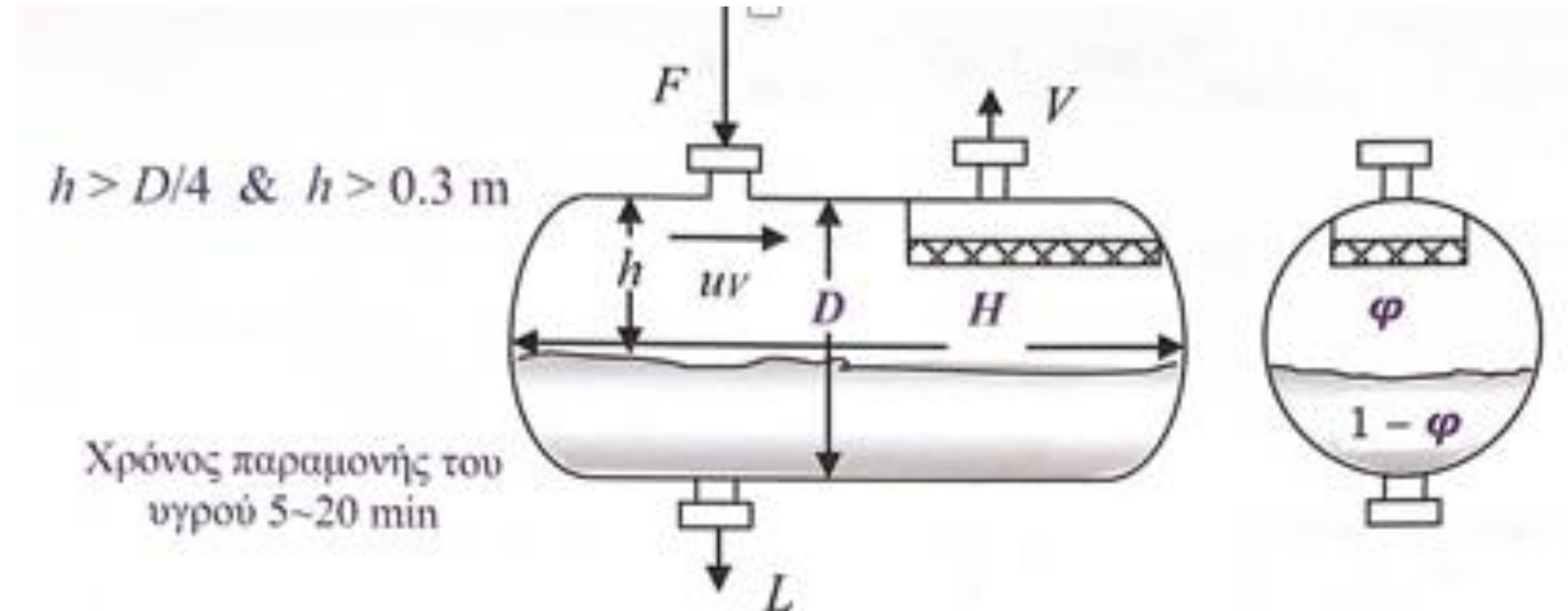
- Υπολογίζουμε το ύψος H_V του τμήματος που είναι διαθέσιμο για το αέριο, λαμβάνοντας τους περιορισμούς του σχήματος 8.9 συν τον παρακάτω περιορισμό:

$$3 \leq \frac{H_V + H_L}{D} \leq 5 \quad (8.51)$$

Εάν ο λόγος είναι μικρότερος του 3 αυξάνουμε το H_V έως ότου γίνει ίσος με 3.

Διαστασιολόγηση δοχείων διαχωρισμού φάσεων

Οριζόντια δοχεία διαχωρισμού



Διαστασιολόγηση δοχείων διαχωρισμού φάσεων

Οριζόντια δοχεία διαχωρισμού

- Αρχικά, υπολογίζουμε την ταχύτητα του αερίου με βάση την εξίσωση 8.47 και την αυξάνουμε κατά 25%.
- Έπειτα επιλέγουμε το κλάσμα διατομής φ το οποίο είναι διαθέσιμο στο αέριο και υπολογίζουμε τη διάμετρο χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$V' = \varphi u_V \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \rho_V \quad (8.52)$$

- Στη συνέχεια υπολογίζουμε το μήκος H του δοχείου από την εξίσωση:

$$\tau \left(\frac{L'}{\rho_L} \right) = (1 - \varphi) \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) H \quad (8.53)$$

- Γίνεται τελικός έλεγχος για το αν ο λόγος H/D ικανοποιεί την 8.51. Εάν όχι μεταβάλλουμε το κλάσμα φ ή τις υπολογισμένες διαστάσεις του δοχείου (ώστε $H/D=3$).

Διαστασιολόγηση συμπίεστών

Η διαστασιολόγηση των συμπίεστών βασίζεται στο συντελεστή απόδοσης e_c ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του απαιτούμενου έργου ατράκτου για αδιαβατική και αντιστρεπτή (ισεντροπική) συμπίεση προς το απαιτούμενο έργο ατράκτου για αδιαβατική αλλά αναντιστρεπτή συμπίεση:

$$e_c = \frac{w_{s,\Delta S=0}}{w_s} \quad (8.70)$$

Το σχήμα 8.17 παρουσιάζει τις παραπάνω έννοιες σε διάγραμμα ενθαλπίας – εντροπίας ρευστού που συμπιέζεται από πίεση P_s (suction pressure – πίεση αναρρόφησης) σε πίεση P_d (discharge pressure - πίεση κατάθλιψης). Για την περίπτωση ισεντροπικής συμπίεσης ιδανικών αερίων ισχύει: (Smith J.M. & Van Ness, H.C. Introduction to chemical engineering thermodynamics, 4th ed. McGraw Hill, 1987, pp. 234-239)

$$w_{s,\Delta S=0} = \frac{R_g T_s}{\alpha} \left[\left(\frac{P_d}{P_s} \right)^\alpha - 1 \right] \quad (8.71)$$

Όπου $R_g=8,314 \text{ kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ η παγκόσμια σταθερά αερίων, T_s η θερμοκρασία εισόδου σε K και το α ορίζεται ως:

$$\alpha = \frac{R_g}{C_p} = \frac{C_p - C_v}{C_p} = \frac{(C_p/C_v) - 1}{(C_p/C_v)} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \quad (8.72)$$

Διαστασιολόγηση συμπίεστών

Η θερμοκρασία εξόδου για ισεντροπική συμπίεση υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$T'_d = T_s \left(\frac{P_d}{P_s} \right)^\alpha \quad (8.73)$$

Ενώ για την πραγματική θερμοκρασία εξόδου ισχύει:

$$T_d = T_s + \frac{T'_d - T_s}{e_c} \quad (8.74)$$

Ο λόγος α όπως φαίνεται στον πίνακα 8.7 παίρνει τις εξής τιμές:

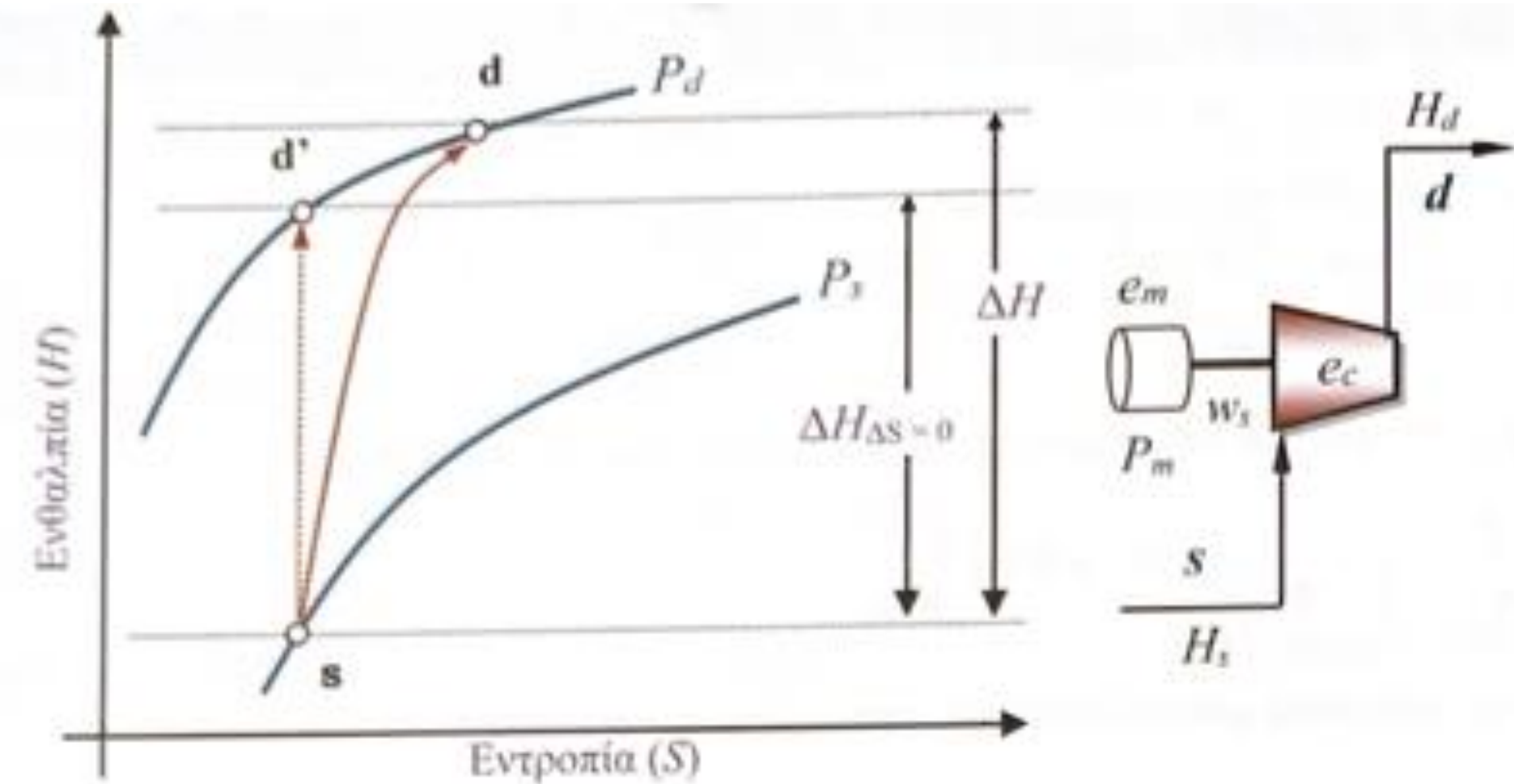
- 0,4 για μονοτομικά αέρια (He, Ar)
- 0,29 για διατομικά αέρια (O₂, N₂, αέρας)
- 0,23 για αέρια όπως μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα

Σε περίπτωση πιο πολύπλοκων μορίων αερίων χρησιμοποιείται η εξίσωση 8.72 για τον υπολογισμό του α , όπου η θερμοχωρητικότητα υπο σταθερή πίεση θα υπολογιστεί σε μία μέση θερμοκρασία.

Διαστασιολόγηση συμπιεστών

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.7. Τιμή του λόγου α για διάφορα αέρια.

	α (15 °C & 1 bar)	α (65 °C & 1 bar)
Μονοατομικά αέρια (He, Kr, Ne, Ar, ...)	0.400	—
Διατομικά (O ₂ , N ₂ , H ₂ , ...)	0.290	—
Νερό (ατμός)	0.248	0.242
Αέρας	0.290	0.290
Αμμωνία	0.240	0.225
Διοξείδιο του άνθρακα	0.231	0.213
Μονοξείδιο του άνθρακα	0.286	0.286
Υδροθείο	0.231	0.237
Υδροχλώριο	0.324	—
Μεθάνιο	0.240	0.219
Λιθάνιο	0.180	0.145
Λιθυλένιο	0.200	0.173
Προπάνιο	0.130	0.100
Προπυλένιο	0.138	—
Βουτάνιο & ισο-βουτάνιο	0.099	0.074
Πεντάνιο	0.057	0.057
Εξάνιο	0.074	0.048
Επτάνιο	—	0.038
Ακετυλένιο	0.231	0.180
Βενζόλιο	0.074	0.083
Φυσικό αέριο	0.213	—

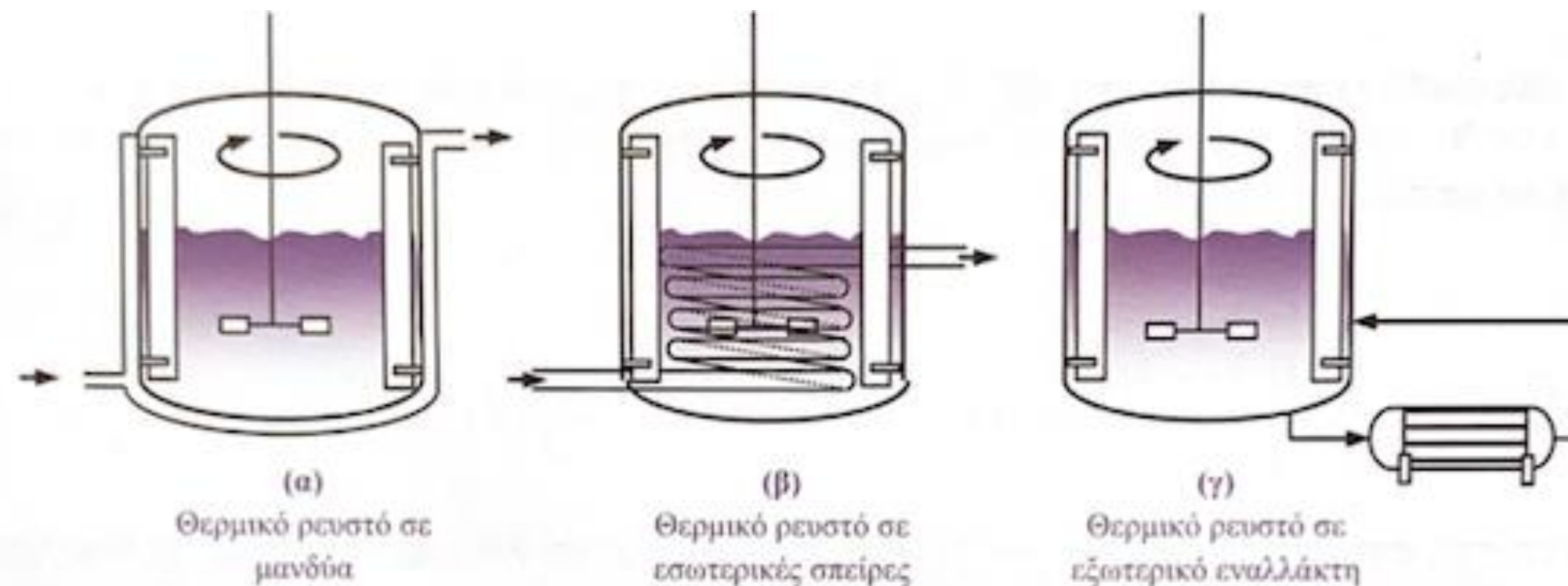


ΣΧΗΜΑ 8.17. Αδιαβατική συμπίεση ρευστού σε διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας.

Διαστασιολόγηση δοχείων με ανάδευση

Σε δοχεία ανάδευσης επιτελούνται διάφορες διεργασίες όπως:

- Απλή ομογενοποίηση
 - Ομογενής/ετερογενής χημική αντίδραση
 - Ζύμωση
- ✓ Τυπικά έχουν κυλινδρικό σχήμα με επίπεδη, ελλειπτική ή κωνική βάση και επίπεδη ή ελλειπτική κορυφή.
- ✓ Η ανάμιξη επιτυγχάνεται με συστήματα ανάδευσης στηριγμένα συνήθως στην κορυφή του δοχείου.
- ✓ Θέρμανση ή ψύξη επιτυγχάνεται με εξωτερικό μανδύα (jacket), εσωτερικές ή εξωτερικές σπείρες (coils) ή εξωτερικό εναλλάκτη θερμότητας.

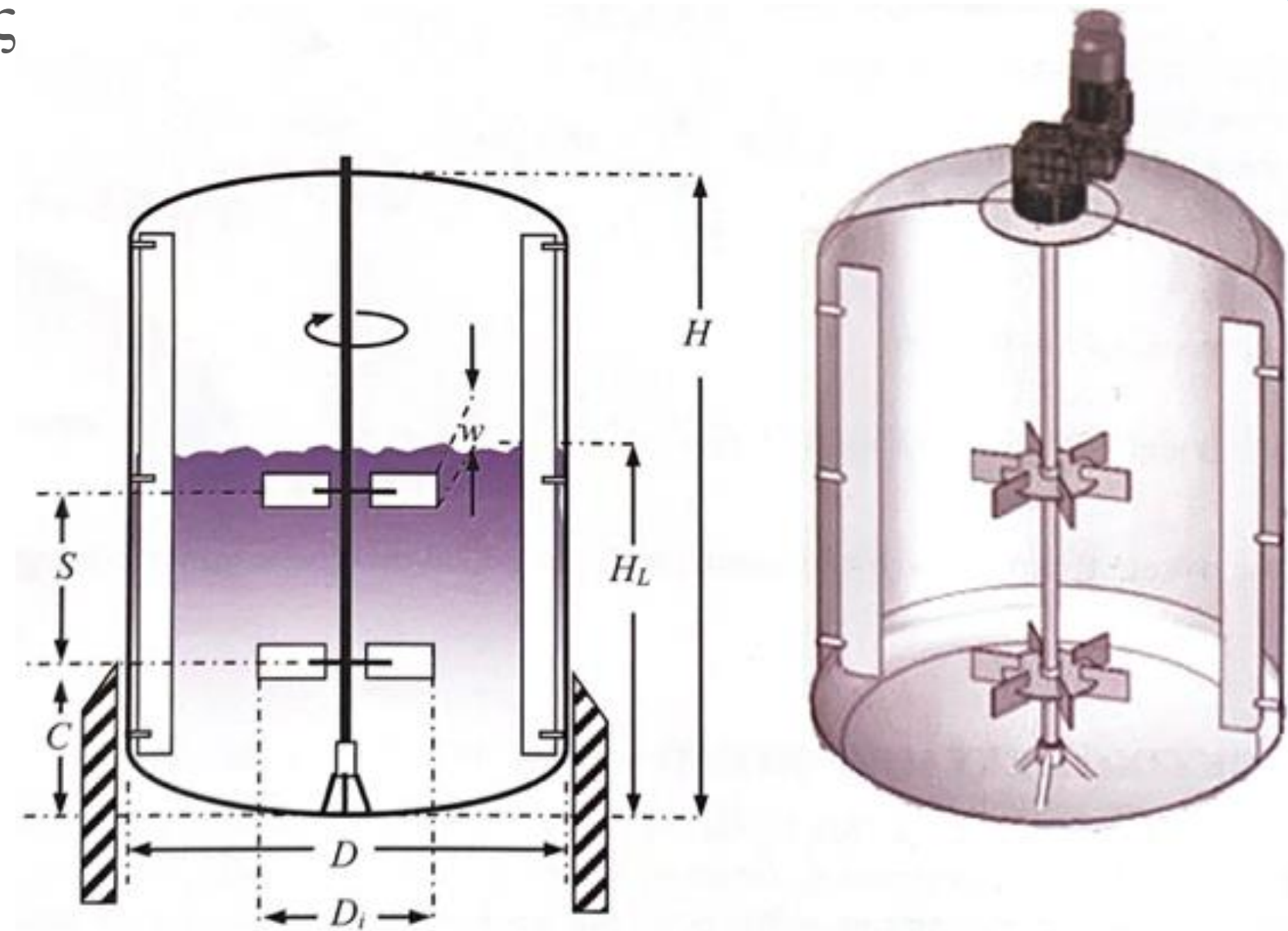


ΣΧΗΜΑ 8.18. Εναλλακτικοί τρόποι εναλλαγής θερμότητας σε αναδευόμενα δοχεία.

Διαστασιολόγηση δοχείων με ανάδευση

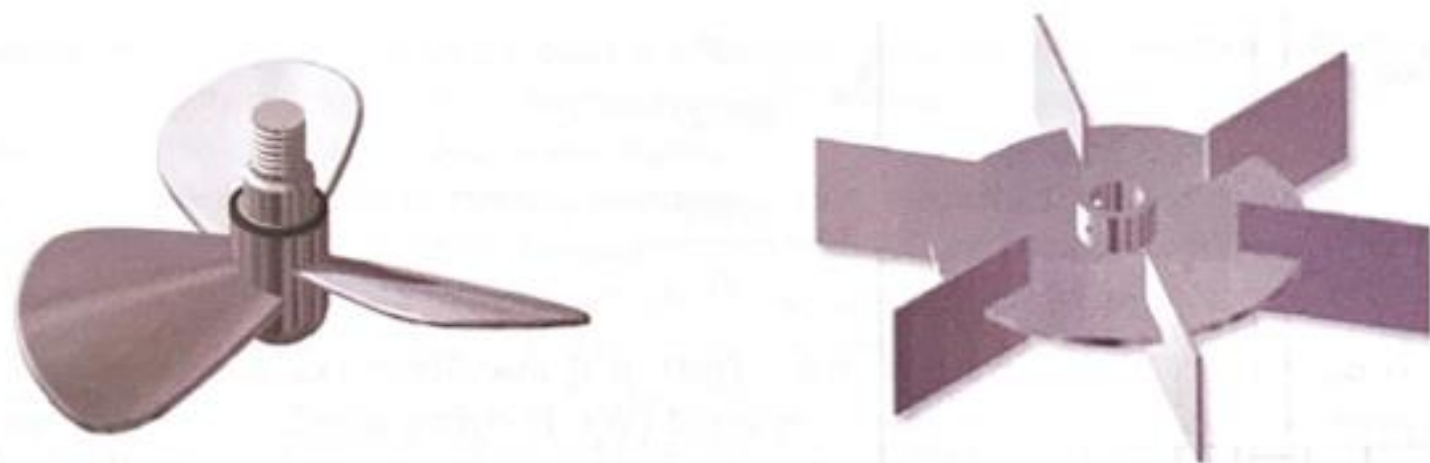
Στο σχήμα 8.19 παρουσιάζονται κάποιες βασικές διαστάσεις αναδευόμενου δοχείου με διπλό αναμίκτη τύπου στροβίλου και δύο ανακλαστήρες για τη βελτίωση της ανάμιξης:

- Ύψος δοχείο H_L ίσο με τη διάμετρο D
- Ωφέλιμος όγκος $\sim 80\%$ μέγιστο.
- Διάμετρος αναμίκτη $D_i \sim 1/3 D$
- Απόσταση αναμίκτη από τη βάση του δοχείου και απόσταση μεταξύ πολλαπλών αναμικτών $\sim D_i$
- Κατανάλωση ενέργειας ανάμιξης $\sim 10 \text{ kw/m}^3$ για μικρά δοχεία – νευτώνεια ρευστά
- $\sim 1-3 \text{ kw/m}^3$ (δοχεία 100 m^3)



$$H_L = D, \quad D_i = D/3, \quad w = D_i/8 \dots D_i/5, \quad C > D_i, \quad 1.25 < H/H_L$$

ΣΧΗΜΑ 8.19. Τυπικές διαστάσεις αναδευόμενου δοχείου.



ΣΧΗΜΑ 8.20. Τύποι αναδευτήρων προπέλας (propeller) και στροβίλου (turbine).

Διαστασιολόγηση δοχείων με ανάδευση

Ακριβέστερος υπολογισμός βασίζεται στους αδιάστατους αριθμούς ισχύος N_p και Reynolds Re

$$\text{Αριθμός ισχύος} \quad N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_i^5} \quad (8.76)$$

$$\text{Αριθμός Reynolds} \quad Re = \frac{\rho N D_i^2}{\mu} \quad (8.77)$$

Όπου:

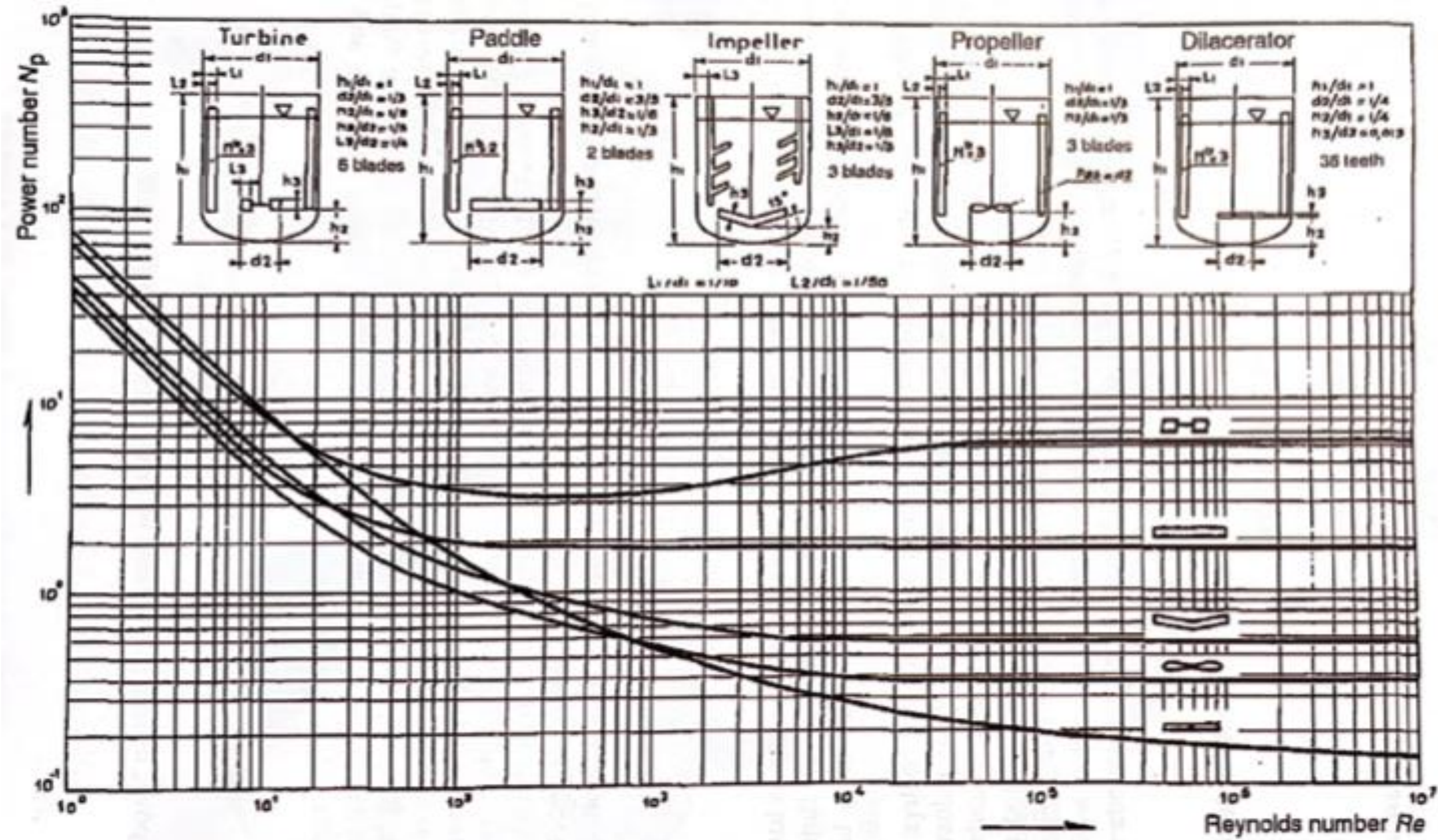
- ✓ N αριθμός περιστροφών ανα s (rpm)
- ✓ ρ πυκνότητα (kg/m^3)
- ✓ μ ιξώδες ($Pa \cdot s = kg/(m \cdot s)$)
- ✓ P καταναλισκόμενη ισχύς (W)

Η σχέση μεταξύ των δύο αυτών αδιάστατων αριθμών δίνεται στο σχήμα 21 (Ι. Κούκος, Εισαγωγή στο σχεδιασμό χημικών εργοστασίων, 2^η έκδοση).

Όπου:

- ✓ Οι αναμίκτες τύπου προπέλας έχουν σαφώς μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με του στροβίλου.
- ✓ Προπέλας αποτελεσματικοί σε ιξώδη $1-5 Pa \cdot s$, στροβίλου αποτελεσματικοί μέχρι ιξώδη $100 Pa \cdot s$
- ✓ Για πολλαπλές προπέλες/στροβίλους, πολλαπλασιάζεται η απαιτούμενη ισχύς για ένα με το πλήθος των αναδευτήρων

Διαστασιολόγηση δοχείων με ανάδευση



ΣΧΗΜΑ 8.21. Εξάρτηση του αριθμού ισχύος από τον αριθμό Reynolds για διάφορους τύπους αναδευτήρων.

Διαστασιολόγηση δοχείων με ανάδευση

Από το σχήμα φαίνεται πως για $Re < 10$ ο αριθμός ισχύος N_p είναι αντιστρόφως ανάλογος του Re , ενώ για $Re > 10.000$ λαμβάνει σταθερή τιμή που δίνεται προσεγγιστικά από τους παρακάτω τύπους:

$$\text{Αριθμός ισχύος για στροβίλους} \quad N_p \approx \begin{cases} 70/Re, & Re < 10 \\ 5, & Re > 10,000 \end{cases} \quad (8.78)$$

$$\text{Αριθμός ισχύος για προπέλες} \quad N_p \approx \begin{cases} 40/Re, & Re < 10 \\ 0.35, & Re > 10,000 \end{cases} \quad (8.79)$$

Στην περίπτωση αερισμού του δοχείου οι ενεργειακές απαιτήσεις ανάδευσης μειώνονται. Μια εκτίμηση δίνεται από τον εξής τύπο (Hughmark, 1980, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 19, pp 638-641).

$$\frac{P_g}{P} = \frac{1}{10} \left(\frac{F_g}{NV_L} \right)^{-1/4} \left(\frac{N^2 D_i^4}{g_w V_L^{2/3}} \right)^{-1/5} \quad (8.80)$$

Όπου:

- ✓ P_g απαιτούμενη ισχύς για ανάδευση με αερισμό
- ✓ F_g ογκομετρική παροχή του αέρα
- ✓ V_L όγκος του υγρού στο δοχείο

Ένα ποσοτικό κριτήριο για την αποδοτικότητα στα δοχεία ανάμιξης είναι ο χρόνος ανάμιξης t_m . Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται μέχρι μία σημειακή προσθήκη ουσίας (πχ χρωστική) στο δοχείο να κατανεμηθεί ομοιόμορφα στο σύνολο του όγκου του δοχείου.