



ΙΔΕΠ

Ινστιτούτο
Χημικών
Διεργασιών και
Ενεργειακών
Πόρων

Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

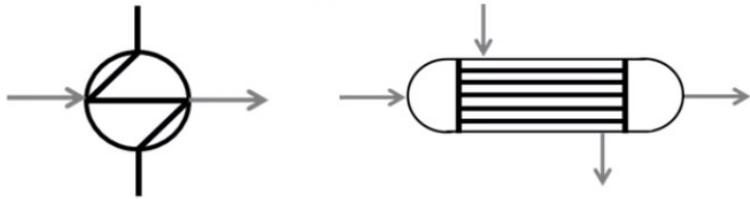
Σχεδιασμός Χημικών Εγκαταστάσεων I

Εναλλάκτες

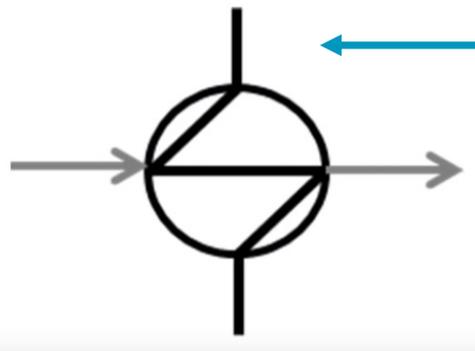
Καλογιάννης Κων/νος, kkalogiannis@uowm.gr

Εαρινό εξάμηνο 2022-2023

Εναλλάκτες

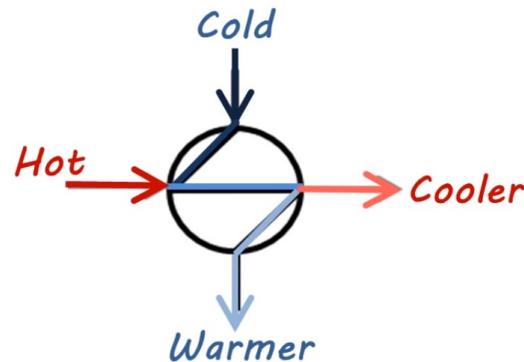
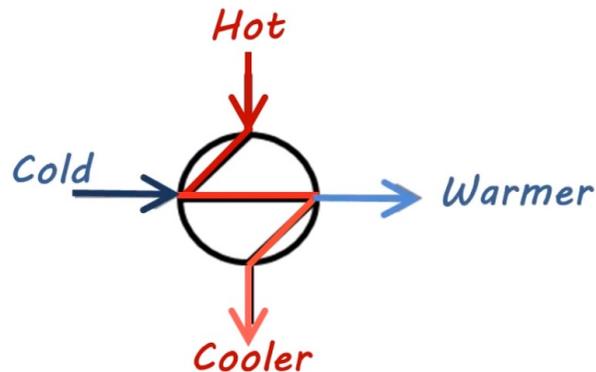


- Οι εναλλάκτες θερμότητας στηρίζονται στη μετάδοση θερμότητας μέσω μίας επιφάνειας μέσω αγωγής και συναγωγής.



Βοηθητική ροή: Αποσκοπεί στη θέρμανση ή ψύξη του άλλου ρεύματος.

Ροή – Ρεύμα διεργασίας: Ρεύμα της χημικής διεργασίας που απαιτεί θέρμανση ή ψύξη.



Τύποι βοηθητικών ροών σε εναλλάκτες

cw *Cooling Water, 30°C*

rw *Refrigerated Water, 5°C*

rb *Refrigerated Brine, -45°C*

lps *Low Pressure Steam, 140-160°C*

mps *Medium Pressure Steam, 180-200°C*

hps *High Pressure Steam, 250-270°C*

el *Electric Heat, 220, 440, 660 V*

htm *Heat Transfer Medium, Up to 400°C*

Τύποι βοηθητικών ροών σε εναλλάκτες

glycol -10°C

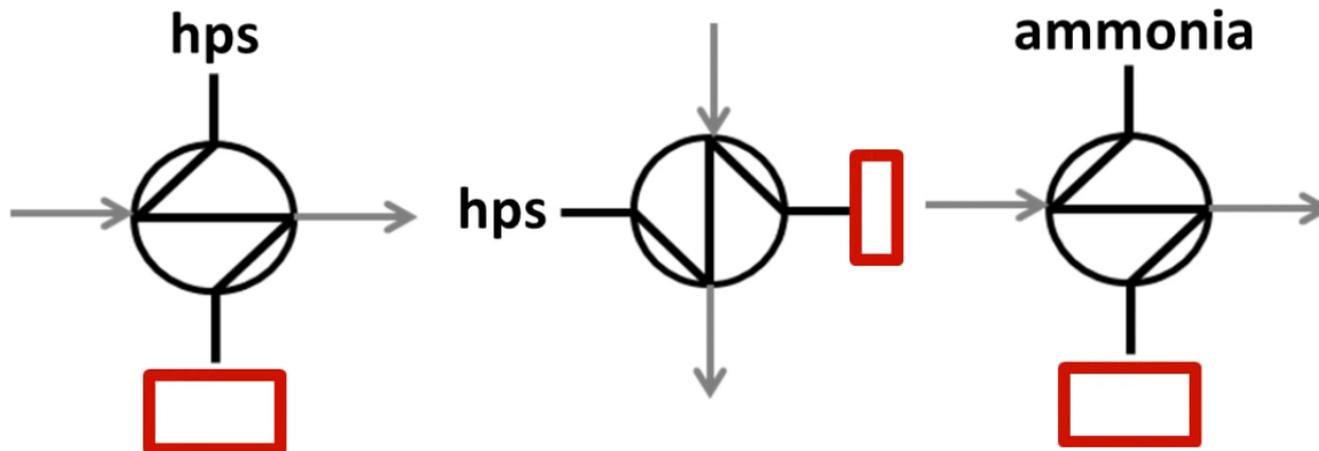
butane -10°C

freon -30°C

ammonia -35°C

propane -50°C

ethane -100°C

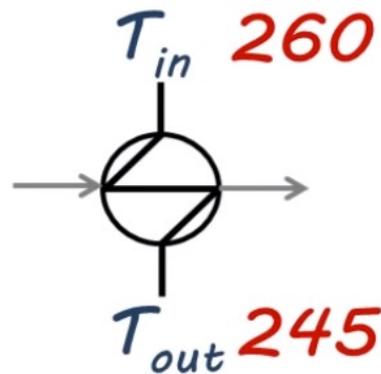


Οι βοηθητικές ροές έχουν ετικέτα μόνο στην είσοδο μιας και χρησιμοποιούνται μόνο για θέρμανση ή ψύξη.

Τύποι βοηθητικών ροών σε εναλλάκτες

Ένας γενικός κανόνας που διέπει τις βοηθητικές ροές είναι ο παρακάτω:

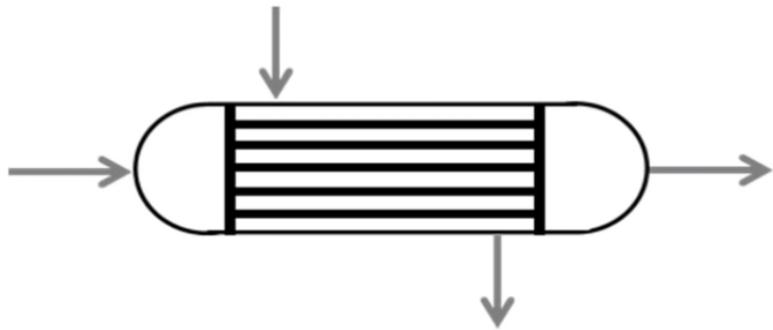
$$5 \leq |T_{out} - T_{in}| \leq 20$$



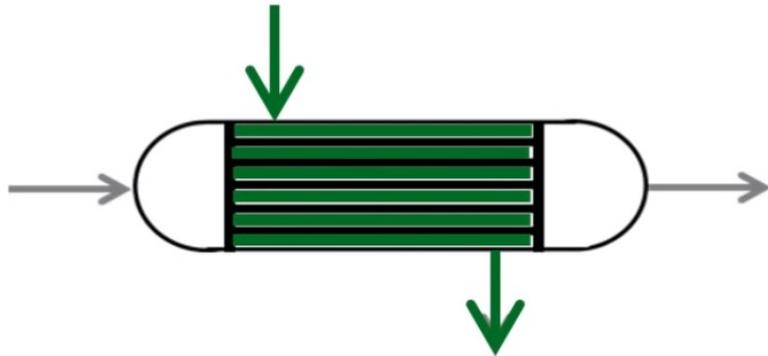
- Εάν $T_{out} - T_{in} > 20$ τότε υπάρχουν υπερβολικές ενεργειακές απαιτήσεις στις οποίες δε μπορεί να ανταπεξέλθει ο εξοπλισμός που παράγει τη βοηθητική ροή.
- Εάν $T_{out} - T_{in} < 5$ τότε απαιτούνται υπερβολικά μεγάλες ροές βοηθητικής ροής.

Τύποι εναλλακτών

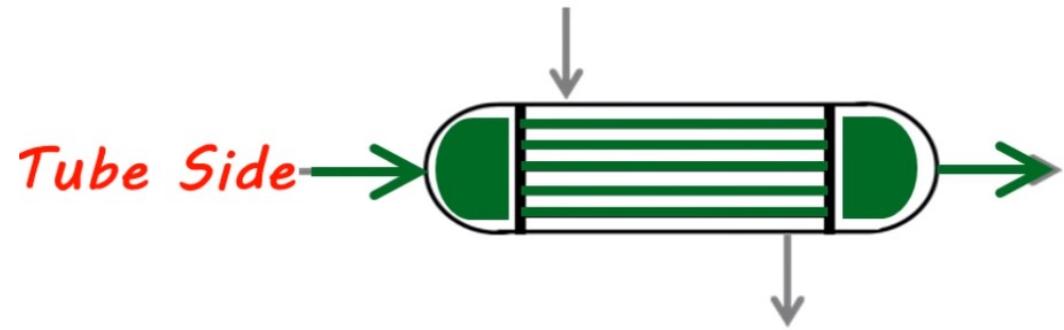
Εναλλάκτες κελύφους και σωλήνων



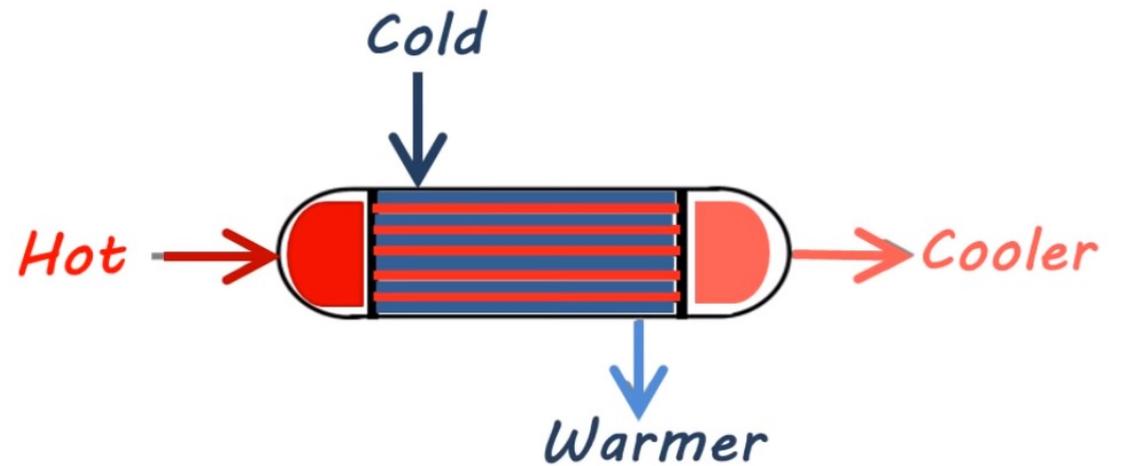
Shell Side



Tube Side

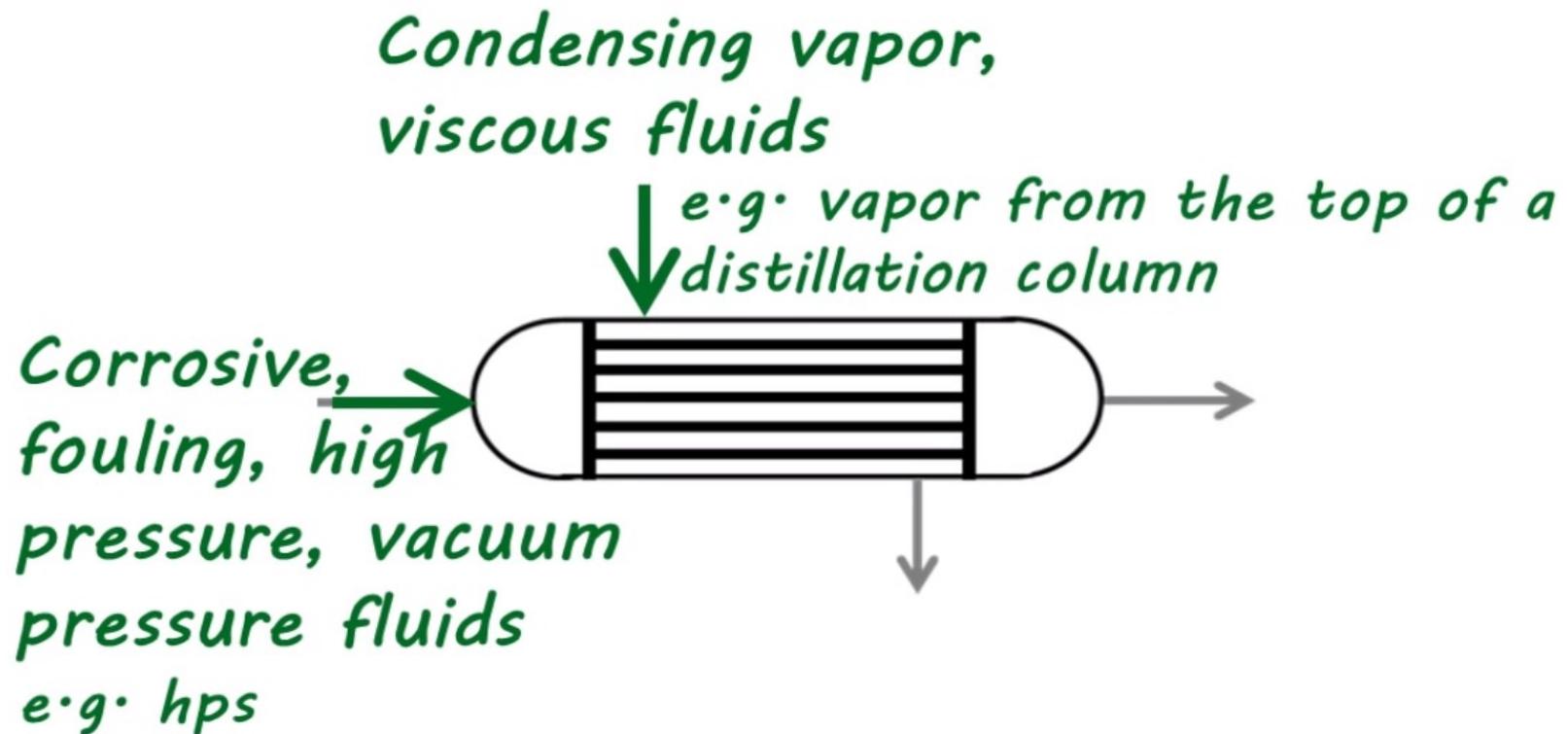


Hot



Τύποι εναλλακτών

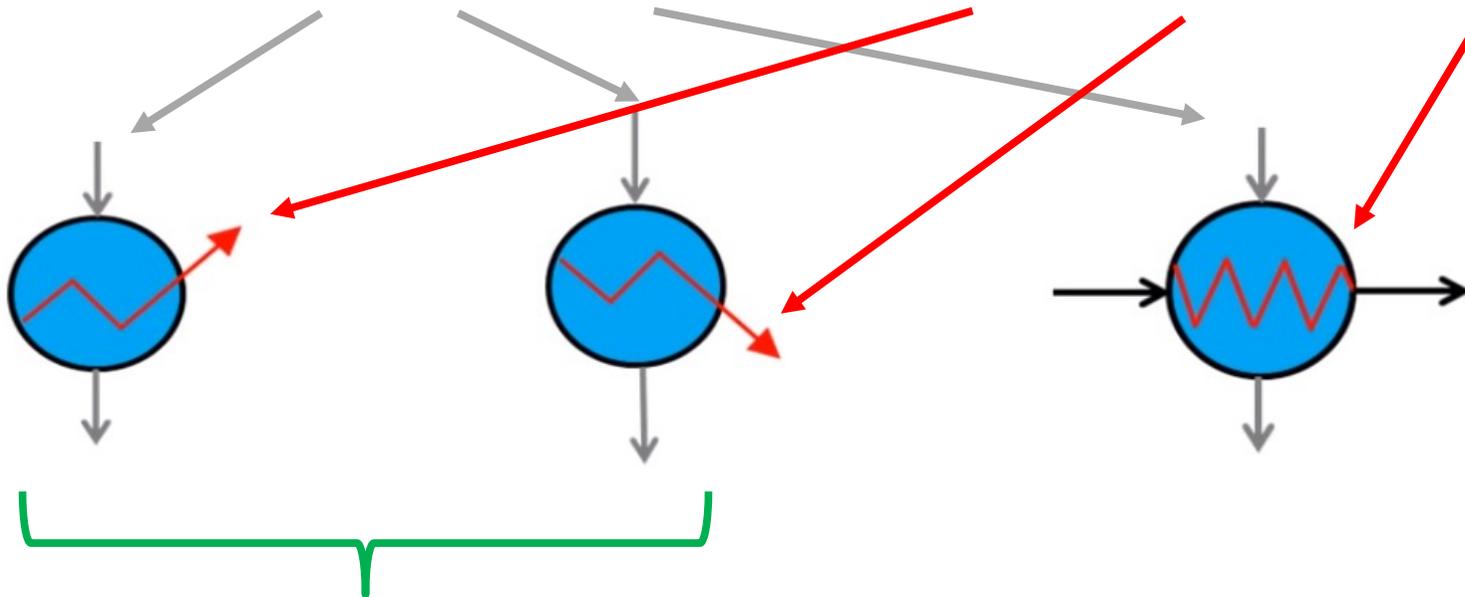
Εναλλάκτες κελύφους και σωλήνων



Τύποι εναλλακτών

Οι γκρι γραμμές είναι τα ρεύματα **διεργασίας**

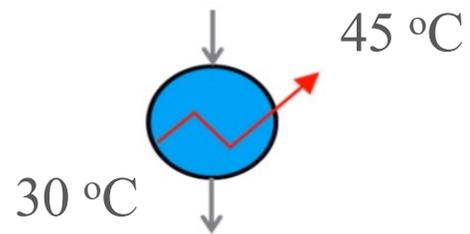
Οι κόκκινες γραμμές είναι **βοηθητικές ροές**



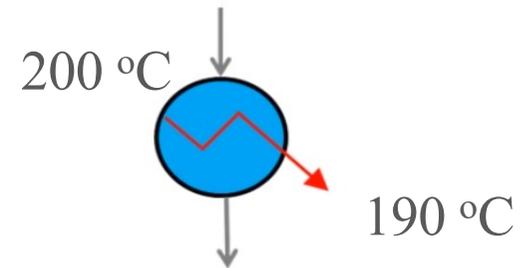
Γενικού τύπου εναλλάκτες

Εναλλάκτης 2 ρευμάτων

Τύποι εναλλακτών

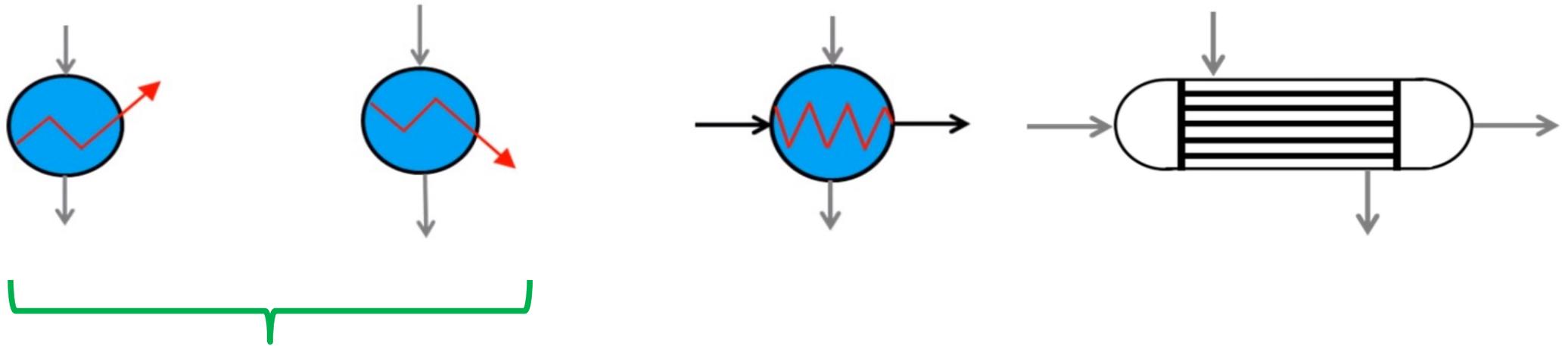


Βέλος δείχνει προς τα επάνω: η βοηθητική ροή ψύχει το ρεύμα διεργασίας



Βέλος δείχνει προς τα κάτω: η βοηθητική ροή θερμαίνει το ρεύμα διεργασίας

Τύποι εναλλακτών



Γενικού τύπου εναλλάκτες: σε λογισμικό σχεδιασμό χημικών διεργασιών όπως Aspen, Chemcad, ο ρόλος τους είναι να κλείνουν τα διαγράμματα ροής και τοποθετούνται προσωρινά.

Αφού επιλυθεί το διάγραμμα ροής και βελτιστοποιηθεί η διεργασία, αντικαθιστούμε τους γενικού τύπου εναλλάκτες με εναλλάκτες δύο ρευμάτων. Εκεί βλέπουμε τι τύπου βοηθητική ροή απαιτείται, σε τι ροή κτλ.

Πληροφορίες που αφορούν σε εξοπλισμό εναλλακτών

Ένας τυπικός πίνακας που δίνει αναλυτικά τις πληροφορίες που αφορούν σε εναλλάκτες της διεργασίας μας έχει την παρακάτω μορφή:

Πίνακας 1. Περιληπτικός πίνακας εναλλακτών διεργασίας παραγωγής αιθυλενοξειδίου

Heat Exchangers	E-101	E-102	E-103	E-104
Type	Floating Head Shell & Tube	Floating Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube
Area (m ²)	553.0	687.0	421.0	399.0
Heat Duty (GJ/hr)	55.4	67.9	18.7	12.9
Heat Transfer Coefficient (W/m ² °C)	15.0	15.0	605.0	900.0
Log Mean Temperature Difference (°C)	100.8	96.9	79.9	43.9
Shell Side Properties				
Materials of Construction	316 SS	CS	CS	CS
Flowrate (metric tons / hr)	20.0	45.0	0.2	64.0
Inlet Temperature (°C)	67.0	77.0	30.0	55.3
Outlet Temperature (°C)	210.0	210.5	43.0	5.8
Inlet Pressure (bar)	5.5	5.6	2.1	4.7
Outlet Pressure (bar)	5.4	5.5	2.0	4.6
Phase	Gas	Gas	Liquid	Partially Condensed
Tube Side Properties				
Materials of Construction	CS	CS	CS	A-201 CS
Flowrate (metric tons / hr)	0.4	0.6	65.0	0.5
Inlet Temperature (°C)	260.0	260.0	210.3	-22.0
Outlet Temperature (°C)	245.0	245.0	60.0	-10.0
Inlet Pressure (bar)	45.0	45.0	5.3	5.5
Outlet Pressure (bar)	40.0	38.9	5.2	5.3
Phase	Condensed	Condensed	Partially Condensed	Vaporized

Είδη εναλλακτών

Το είδος του εναλλάκτη είναι βασική σχεδιαστική επιλογή:

- Δε μπορεί να μας το δώσει λογισμικό όπως Aspen, Chemcad, είναι ενεργητική επιλογή του μηχανικού.
- Το είδος επιλέγεται βάσει διαφόρων παραμέτρων, όπως κόστος, συνθήκες που επικρατούν στα ρεύματα και ιδιότητες αυτών.

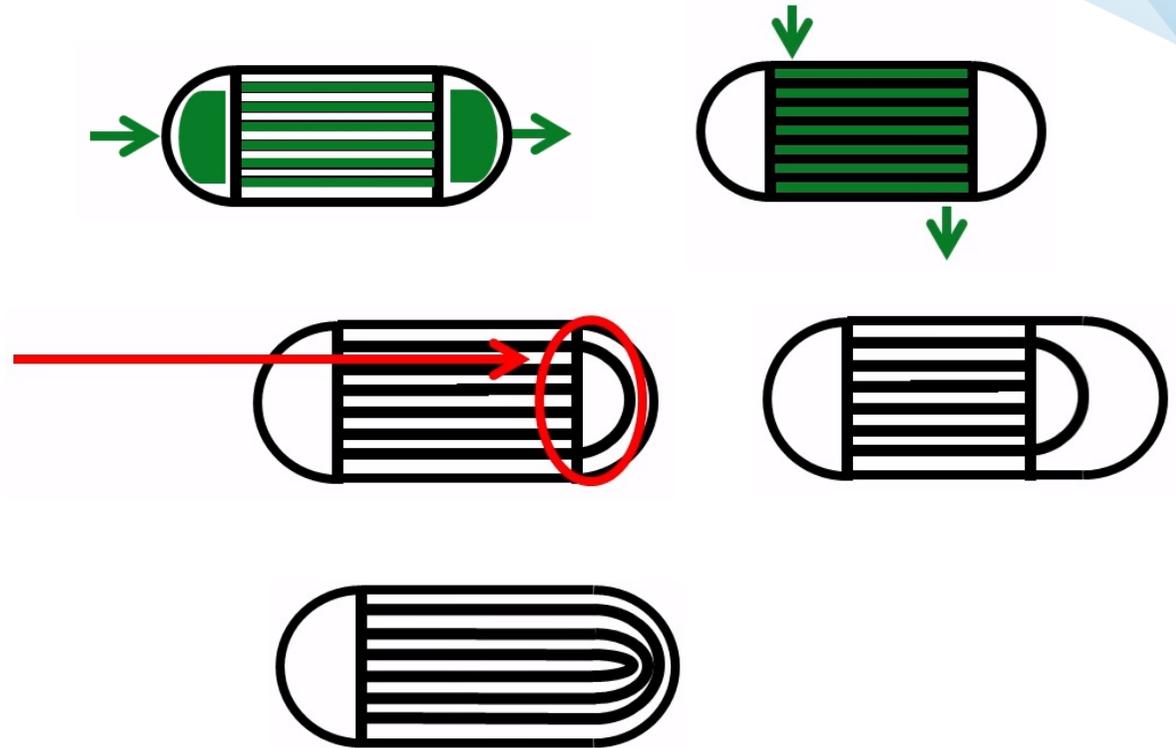
Είδη εναλλακτών

Εναλλάκτες κελύφους και σωλήνων:

- Fixed head – Σταθερού καθρέπτη
- Floating head – Πλωτής κεφαλής
- U-tube – Τύπου φουρκέτας

Βασικά πλεονεκτήματα:

- Κατάλληλοι για υψηλές ροές
- Μεγάλο εύρος επιφανειών (3-1000 m²)
- Μεγάλο εύρος θερμοκρασιών
- Χαμηλό κόστος

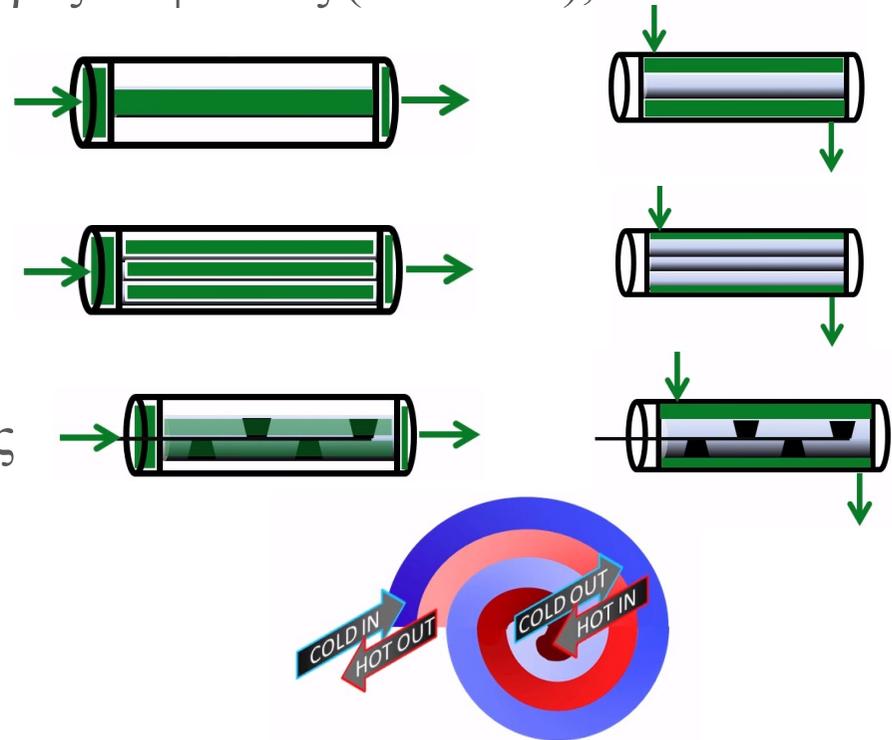


- ✓ Οι πλωτής κεφαλής και τύπου φουρκέτας μπορούν να διαχειριστούν υψηλότερες ΔT λόγω των ανοχών τους σε διαστολή λόγω θερμοκρασίας.
- ✓ Ο τύπου φουρκέτας είναι κατάλληλος για ρεύματα με υψηλά ιξώδη.

Είδη εναλλακτών

Σε περίπτωση που απαιτούνται σχετικά μικρές επιφάνειες ($< 200 \text{ m}^2$), τότε κατάλληλοι είναι και οι:

- Double pipe – Διπλού σωλήνα
- Multiple pipe – Πολλαπλού σωλήνα
- Scraped wall – Αποξεόμενης επιφάνειας
- Spiral plate – Σπειροειδής



Βασικά πλεονεκτήματα:

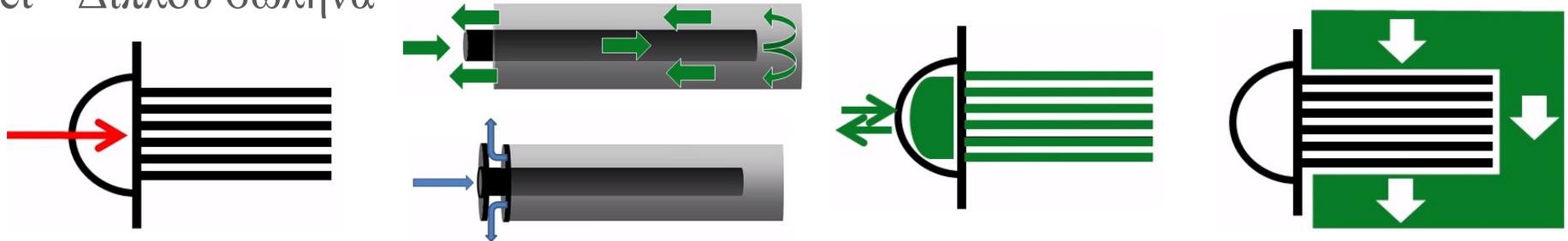
- Για εφαρμογές με μικρές επιφάνειες
- Κατάλληλοι για ιξώδη ρευστά

- ✓ Οι αποξεόμενης επιφάνειας κατάλληλοι για ρεύματα με κρυστάλλους και καταβυθιζόμενες ουσίες
- ✓ Οι σπειροειδής είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί σε σχέση με την επιφάνεια τους και έχουν μικρούς όγκους (κομπακτ)

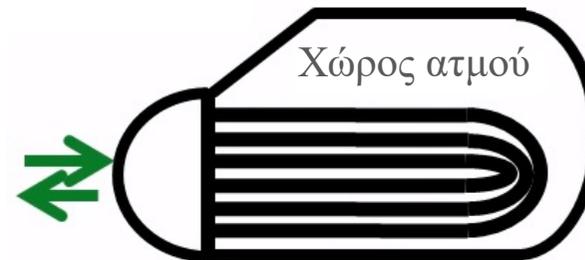
Είδη εναλλακτών

Σε περίπτωση που έχουμε βρασμό, εξάτμιση, συμπύκνωση, τότε κατάλληλοι είναι οι:

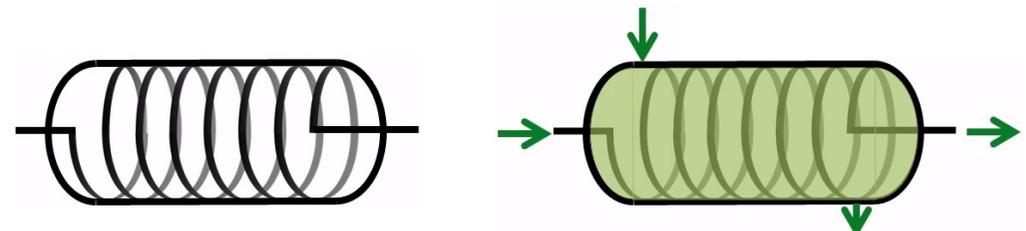
- Bayonet – Διπλού σωλήνα



- Kettle reboiler – Αναβρασμού



- Spiral tube – Ελικοειδή ελάσματα



Είδη εναλλακτών

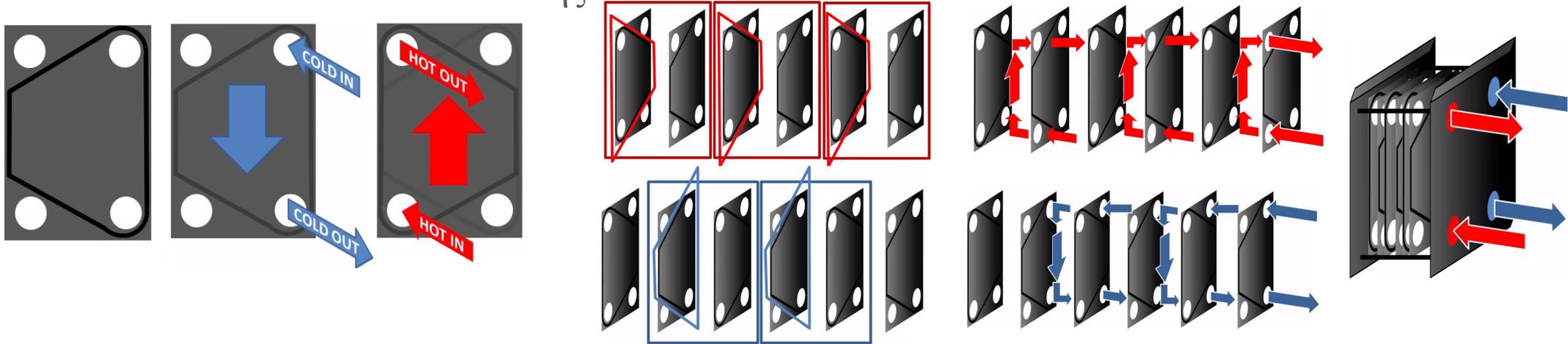
Σε περίπτωση που έχουμε βρασμό, εξάτμιση, συμπύκνωση, τότε κατάλληλοι είναι οι:

- Bayonet – Διπλού σωλήνα
 - Εύκολη εγκατάσταση – απεγκατάσταση
 - Κατάλληλος για ανάκτηση θερμότητας από θερμά αέρια και για εξάτμιση
 - Κατάλληλος για ρεύματα με μεγάλες ΔT λόγω ανοχών σε διαστολές
- Kettle reboiler – Αναβρασμού
 - Κατάλληλος για βρασμό υγρών
 - Το σχήμα βοηθά στον έλεγχο της ροής ατμών
- Spiral tube – Ελικοειδή ελάσματα
 - Κατάλληλος για μικρές επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας (1-50 m²)
 - Ρευστά χαμηλής πίεσης
 - Βρασμό ή συμπύκνωση ρευστών
 - Έχει μικρό όγκο που τον κάνει κατάλληλο για ιξώδη, διαβρωτικά ρευστά και ρευστά που προκαλούν επικαθήσεις

Είδη εναλλακτών

Για αποδοτική μεταφορά θερμότητας και μεγάλο εύρος επιφανειών:

- Plate and frame – Πλακοειδής



Μεγάλο εύρος επιφανειών (1-2500 m²)

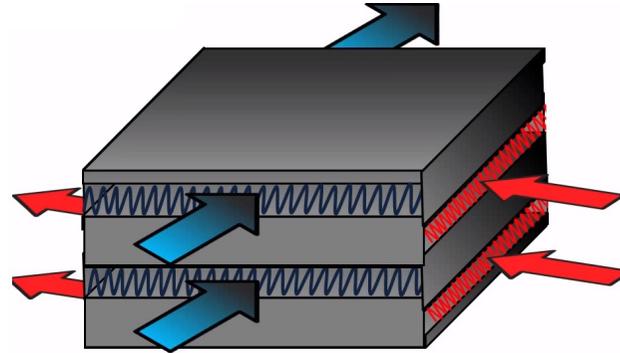
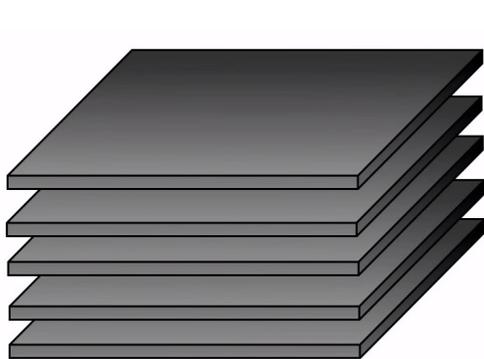
- Plate and fin – Πλακοειδείς πτερυγιοφόροι
Ακόμη μεγαλύτερο εύρος επιφανειών (1-30000 m²)

Είδη εναλλακτών

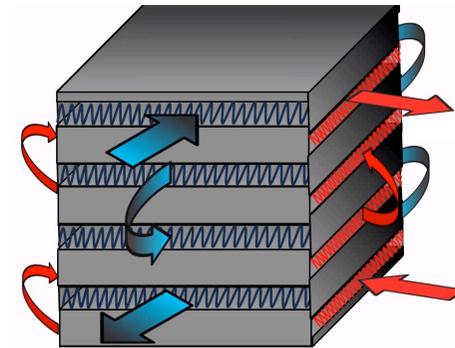
Για αποδοτική μεταφορά θερμότητας και μεγάλο εύρος επιφανειών:

- Plate and fin – Πλακοειδείς πτερυγιοφόροι

Ροή ενός περάσματος



Πολλαπλά περάσματα



Βασικά πλεονεκτήματα:

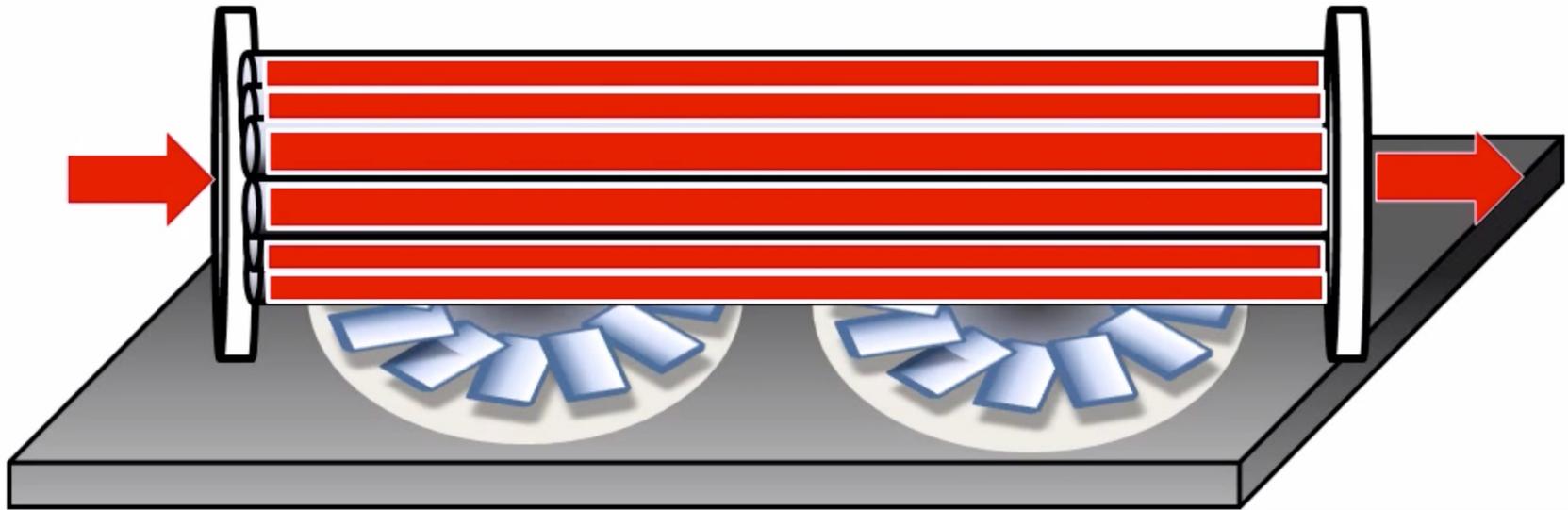
- Πολύ αποδοτική μεταφορά θερμότητας
- Μεγάλο εύρος επιφανειών

Μειονεκτήματα:

- Κόστος
- Υψηλή πτώση πίεσης
- Ακατάλληλοι για ιξώδη, διαβρωτικά και «βρώμικα» ρευστά

Είδη εναλλακτών

- Air cooled / fin – fan – Αερόψυκτος



Βασικά πλεονεκτήματα:

- Μεγάλο εύρος επιφανειών (5 – 20000 m²)
- Χαμηλής συντήρησης
- Χαμηλό κόστος συνολικά

Επιλογή εναλλακτών

Για την επιλογή εναλλάκτη:

- Απαιτούμενη επιφάνεια
- Τύπος ρευστού (ιξώδες, διαβρωτικό, αντιδραστικό, που προκαλεί επικαθήσεις)
- Εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών και για τα δύο ρεύματα

Τελευταίο βήμα: Σύγκριση κόστους, συνήθως τα τρέχοντα έξοδα ξεπερνούν τα αρχικά έξοδα.

Τύποι εναλλακτών

Heat Exchangers	E-101	E-102	E-103	E-104
Type	Floating Head Shell & Tube	Floating Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube

Στάνταρ ρευστά, μεγάλη επιφάνεια, μεγάλη μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά:

- Επιλέγουμε πλωτής κεφαλής

Heat Exchangers	E-101	E-102	E-103	E-104
Type	Floating Head Shell & Tube	Floating Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube

Στάνταρ ρευστά, μεγάλη επιφάνεια, μεσαία μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά:

- Επιλέγουμε σταθερού καθρέπτη ως φτηνότερη λύση

Τύποι εναλλακτών

Heat Exchangers	E-101	E-102	E-103	E-104
Type	Floating Head Shell & Tube	Floating Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube
Area (m ²)	553.0	687.0	421.0	399.0
Heat Duty (GJ/hr)	55.4	67.9	18.7	12.9

$$Q = U * A * \Delta T_{LM}$$

Θερμότητα που απαιτείται
Θερμικό καθήκον

Συνολικός συντελεστής
μεταφοράς θερμότητας

Επιφάνεια
εναλλάκτη

Μέση λογαριθμική
διαφορά θερμοκρασίας

Προσοχή: Ο υπολογισμός του U είναι το πιο κρίσιμο στοιχείο για να γίνει σωστή εκτίμηση της επιφάνειας A του εναλλάκτη

Τύποι εναλλακτών

Heat Exchangers	E-101	E-102	E-103	E-104
Type	Floating Head Shell & Tube	Floating Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube
Area (m ²)	553.0	687.0	421.0	399.0
Heat Duty (GJ/hr)	55.4	67.9	18.7	12.9
Heat Transfer Coefficient (W/m ² °C)	15.0	15.0	605.0	900.0

Χαμηλός συντελεστής,
ατμός θερμαίνει αέριο

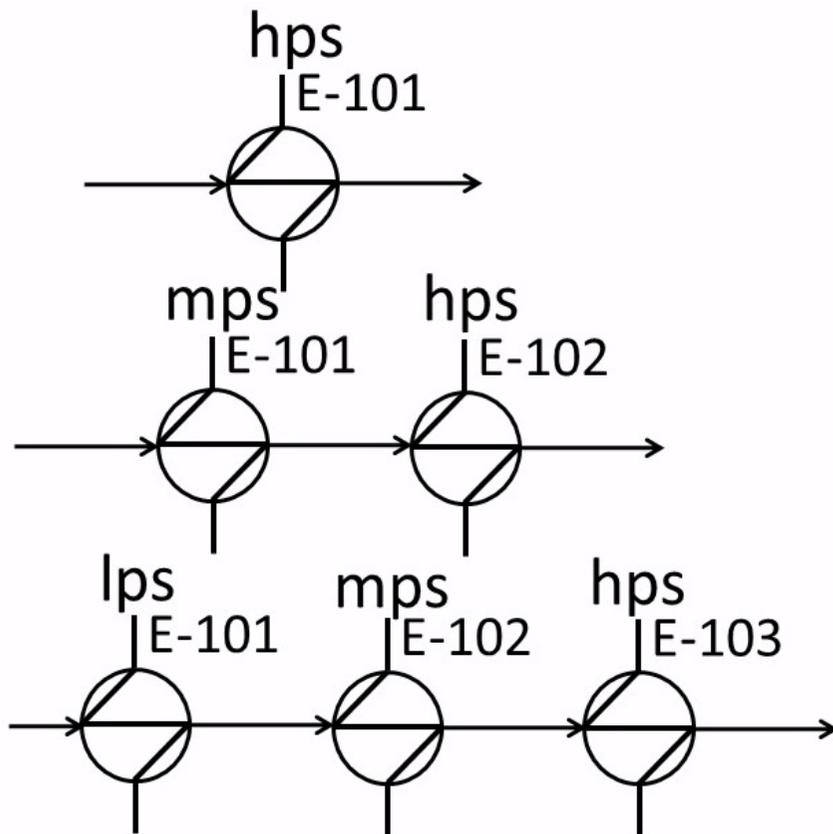
Υψηλός συντελεστής, νερό
ψύχει αέριο με μερική
αλλαγή φάσης

Υψηλότερος συντελεστής,
με συμπύκνωση και
εξάτμιση στα ρεύματα

Προσοχή: Ο υπολογισμός του U είναι το πιο κρίσιμο στοιχείο για να γίνει σωστή εκτίμηση της επιφάνειας A του εναλλάκτη

Τύποι εναλλακτών

Εάν $\Delta T_{lm} > 100$ °C, πρέπει να σκεφτούμε την εναλλακτική να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι εναλλάκτες σε σειρά.



Για να αποφασίσει ο μηχανικός ποιο σενάριο θα επιλέξει (ένας εναλλάκτης ή πολλαπλοί σε σειρά):

- ✓ Υπολογισμός του παγίου κόστους εξοπλισμού.
- ✓ Υπολογισμός του ετήσιου κόστους συντήρησης.
- ✓ Τελικός υπολογισμός συνολικού κόστους για τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού.

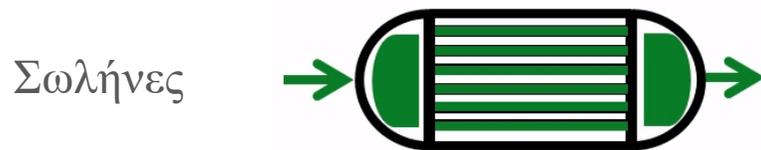
Τύποι εναλλακτών

Heat Exchangers	E-101	E-102	E-103	E-104
Type	Floating Head Shell & Tube	Floating Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube
Area (m ²)	553.0	687.0	421.0	399.0
Heat Duty (GJ/hr)	55.4	67.9	18.7	12.9
Heat Transfer Coefficient (W/m ² °C)	15.0	15.0	605.0	900.0
Log Mean Temperature Difference (°C)	100.8	96.9	79.9	43.9

$$A = \frac{Q}{U * \Delta T_{LM}}$$

Επιλογή τοποθέτησης ρεύματος

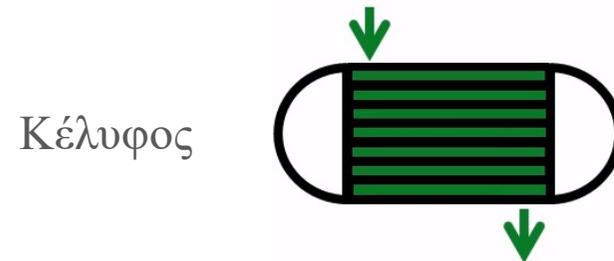
Για την επιλογή εναλλάκτη:



Θερμό
Ψυχρό

Διαβρωτικό, που προκαλεί επικαθήσεις,
υψηλής πίεσης ή υπο κενό (περισσότερο)

Το άλλο ρευστό



Ψυχρό
Θερμό

Το άλλο ρευστό

Υψηλό ιξώδες (περισσότερο),
ή ατμοί που συμπκνώνονται

Πληροφορίες που αφορούν σε εξοπλισμό εναλλακτών

Πίνακας 1. Περιληπτικός πίνακας εναλλακτών διεργασίας παραγωγής αιθυλενοξειδίου

Heat Exchangers	E-101	E-102	E-103	E-104
Type	Floating Head Shell & Tube	Floating Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube
Area (m²)	553.0	687.0	421.0	399.0
Heat Duty (GJ/hr)	55.4	67.9	18.7	12.9
Heat Transfer Coefficient (W/m²°C)	15.0	15.0	605.0	900.0
Log Mean Temperature Difference (°C)	100.8	96.9	79.9	43.9
Shell Side Properties				
Materials of Construction	316 SS	CS	CS	CS
Flowrate (metric tons / hr)	20.0	45.0	0.2	64.0
Inlet Temperature (°C)	67.0	77.0	30.0	55.3
Outlet Temperature (°C)	210.0	210.5	43.0	5.8
Inlet Pressure (bar)	5.5	5.6	2.1	4.7
Outlet Pressure (bar)	5.4	5.5	2.0	4.6
Phase	Gas	Gas	Liquid	Partially Condensed
Tube Side Properties				
Materials of Construction	CS	CS	CS	A-201 CS
Flowrate (metric tons / hr)	0.4	0.6	65.0	0.5
Inlet Temperature (°C)	260.0	260.0	210.3	-22.0
Outlet Temperature (°C)	245.0	245.0	60.0	-10.0
Inlet Pressure (bar)	45.0	45.0	5.3	5.5
Outlet Pressure (bar)	40.0	38.9	5.2	5.3
Phase	Condensed	Condensed	Partially Condensed	Vaporized

Νερό και αιθυλενοξείδιο που συμπυκνώνεται

Ψυκτικό που εξατμίζεται

Νερό ψύξης

Αν και συμπυκνώνεται εν μέρει, τοποθετείται στους σωλήνες λόγω χημικής σύστασης

O₂ και αιθυλένιο

Ατμός υψηλής πίεσης

Υλικά εναλλακτών

Τα υλικά κατασκευής εναλλακτών επιλέγονται λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση κόστους – ανθεκτικότητας στις λειτουργικές συνθήκες.

Αρχικά επιλέγουμε υλικά δια του αποκλεισμού με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- ✓ Υπερβολικές θερμοκρασίες (<-45 °C, > 480 °C).
- ✓ Ύπαρξη οξειδωτικών ενώσεων, χλωριούχων ουσιών, οξέων, βάσεων.

Υπολογισμός κόστους των πιθανών λύσεων για τελική απόφαση

Υλικά εναλλακτών

Τυπικά υλικά κατασκευής (αυξανόμενο κόστος καθώς κατεβαίνουμε στη λίστα):

Carbon Steel

Low Alloy Steels

Stainless Steel

Aluminum and Alloys

Copper and Alloys

Brass

Bronze

Nickel and Alloys

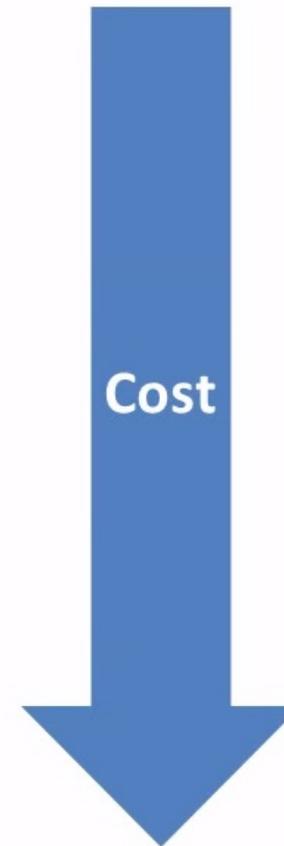
Monel

Inconel

Incoloy

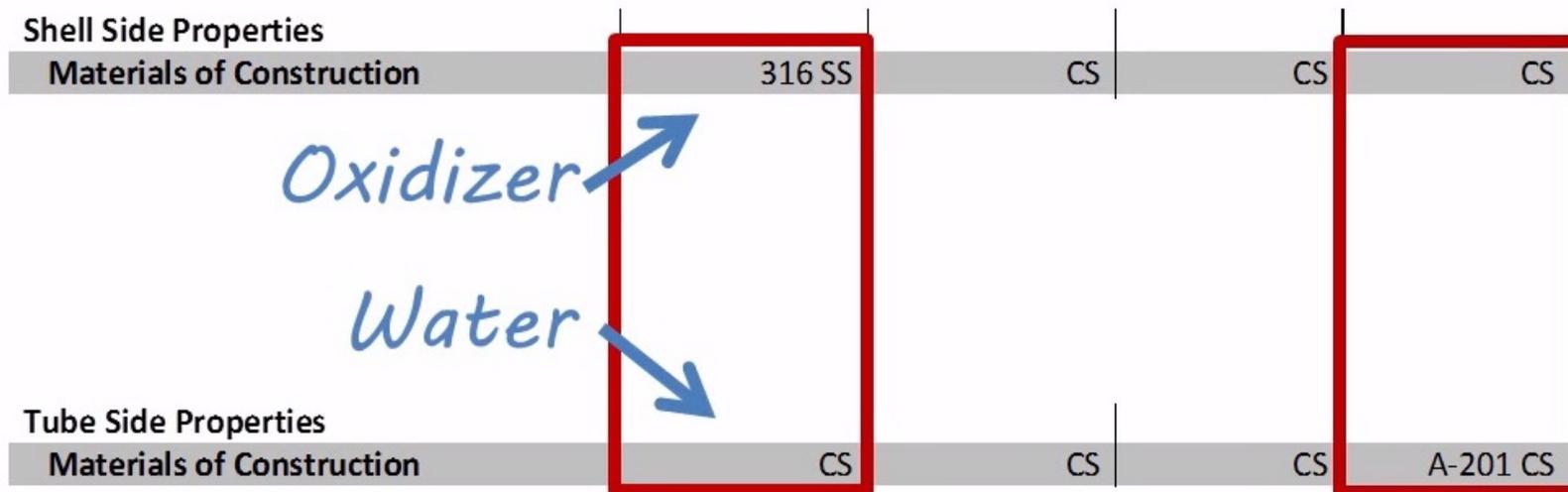
Hastelloy

Titanium and Alloys



Υλικά εναλλακτών

Υπάρχει (και επιβάλλεται σχεδιαστικά) η επιλογή της κατασκευής του κελύφους και των σωλήνων (για τους ανάλογους εναλλάκτες) από διαφορετικά υλικά.



- Τα εξωτικά, επομένως ακριβά, υλικά μόνο στις επιφάνειες που είναι απαραίτητο.
- Κοινή πρακτική είναι και η χρήση υλικών με επιστρώσεις (cladded).



Περισσότερα για επιλογή υλικών: Plant Design and Economics for Chemical Engineers 5th Edition by Max Peters, Klaus Timmerhaus, Ronald West

Υλικά εναλλακτών

Τέλος οι επιπλέον πληροφορίες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση σχεδιασμού εναλλάκτη είναι:

- Ροές των ρευμάτων.
- Θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου ρευμάτων.
- Πιέσεις εισόδου και εξόδου ρευμάτων.
- Φάσεις ρευμάτων.

Heat Exchangers	E-101	E-102	E-103	E-104
Type	Floating Head Shell & Tube	Floating Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube	Fixed Head Shell & Tube
Area (m²)	553.0	687.0	421.0	399.0
Heat Duty (GJ/hr)	55.4	67.9	18.7	12.9
Heat Transfer Coefficient (W/m²°C)	15.0	15.0	605.0	900.0
Log Mean Temperature Difference (°C)	100.8	96.9	79.9	43.9
Shell Side Properties				
Materials of Construction	316 SS	CS	CS	CS
Flowrate (metric tons / hr)	20.0	45.0	0.2	64.0
Inlet Temperature (°C)	67.0	77.0	30.0	55.3
Outlet Temperature (°C)	210.0	210.5	43.0	5.8
Inlet Pressure (bar)	5.5	5.6	2.1	4.7
Outlet Pressure (bar)	5.4	5.5	2.0	4.6
Phase	Gas	Gas	Liquid	Partially Condensed
Tube Side Properties				
Materials of Construction	CS	CS	CS	A-201 CS
Flowrate (metric tons / hr)	0.4	0.6	65.0	0.5
Inlet Temperature (°C)	260.0	260.0	210.3	-22.0
Outlet Temperature (°C)	245.0	245.0	60.0	-10.0
Inlet Pressure (bar)	45.0	45.0	5.3	5.5
Outlet Pressure (bar)	40.0	38.9	5.2	5.3
Phase	Condensed	Condensed	Partially Condensed	Vaporized