

Μέθοδος πρόβλεψης και ανάλυσης της απόδοσης προθερμαντών συμπυκνώματος υψηλής πίεσης με χρήση τεχνικών υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

των Α.Ν. Καραγιάννη και Ν.-Χ. Γ. Μαρκάτου

Περίληψη

Οι προθερμαντές συμπυκνώματος (Closed Feedwater Heaters, CFHs) είναι αναπόσπαστα τμήματα του κύκλου ισχύος των σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας είτε συμβατικών είτε πυρηνικών. Η απόδοσή τους είναι στενά συνδεδεμένη με τη συνολική απόδοση του κύκλου, οπότε μικρές βελτιώσεις στο σχεδιασμό τους, ή τις λειτουργικές τους παραμέτρους μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, λόγω των πολύ μεγάλων εξυπηρετούμενων θερμικών φορτίων. Αναπτύχθηκε μια μέθοδος για την προσομίωση της λειτουργίας των CFHs με χρήση τεχνικών υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της απόδοσης ενός

τριζωνικού προθερμαντή που είναι εγκατεστημένος σε έναν από τους λιγνιτικούς σταθμούς της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) στην Ελλάδα. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίθηκαν με αυτά των μετρήσεων της ΔΕΗ με καλή συμφωνία. Συμπεραίνεται ότι οι τεχνικές υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μπορούν να προβλέψουν με επιτυχία την απόδοση των CFHs και επομένως να βοηθήσουν τον μηχανικό της πράξης, να βελτιστοποιήσει τόσο τον σχεδιασμό όσο και την λειτουργία και τα προγράμματα συντήρησης αυτών των περίπλοκων εναλλακτών θερμότητας.

1. Εισαγωγή - Η θέση των προθερμαντών συμπυκνώματος σε έναν κύκλο ισχύος

Κατά τον απλό κύκλο Rankine (Σχήμα 1α) ένα μεγάλο ποσοστό της διαπανώμενης ενέργειας απορρίπτεται στο περιβάλλον μέσω του συμπυκνωτή, πράγμα που καταλήγει σε βαθμούς απόδοσης κάτω του 50%. Η μελέτη του φαινομένου

αυτού οδήγησε στην επινόηση των απομαστευόμενων κύκλων ισχύος (Σχήμα 1β). Σε αυτά, μέρος του ατμού, αφού υποστεί μερική εκτόνωση στο στρόβιλο, παρακάμπτει το συμπυκνωτή και αφού χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση του συμπυκνώματος που τροφοδοτείται στο λέβητα, αναμειγνύεται τελικά με αυτό. Έτσι επιτυγχάνεται αύξηση του βαθμού απόδοσης που μπορεί να γίνει μεγαλύτερη όταν η απομάστευση γίνεται από πολλά σημεία, επιτυγχάνοντας σταδιακή προθέρμανση του συμπυκνώματος. Συνήθως χρησιμοποιούνται 5-8 ενδιάμεσα σημεία (πίεσεις) απομάστευσης.

Οι προθερμαντές του νερού τροφοδοσίας του λέβητα είναι εναλλάκτες κελύφους σωλήνων με το προς προθέρμανση νερό στους σωλήνες και τον απομαστευόμενο ατμό στο κέλυφος. Οι σωλήνες είναι συνήθως τύπου U διαταγμένοι σε δύο περάσματα. Η ειδική κατασκευή του κελύφους, καθώς και ο τρόπος τοποθέτησης του εναλλάκτη (οριζόντια ή κάθετα) υπαγορεύεται από

Ο Α. Καραγιάννης είναι Υ.Α. στο Τμήμα Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ και Ερευνητής. Ο Ν. Μαρκάτος είναι καθηγητής και Πρόεδρος της ΕΜΠ.

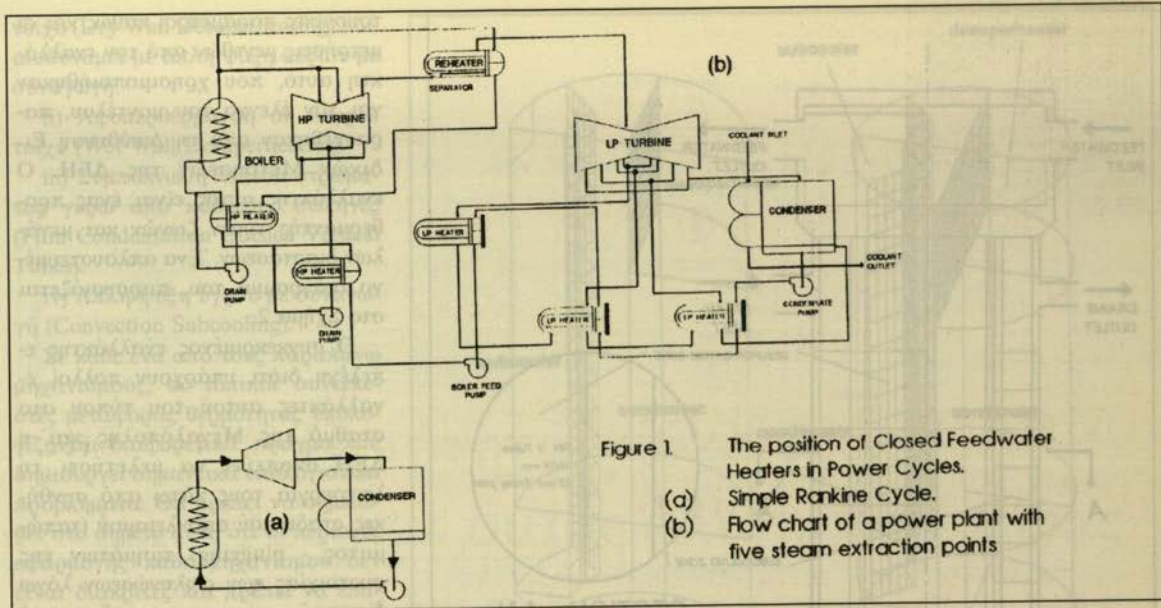


Figure 1. The position of Closed Feedwater Heaters in Power Cycles.
(a) Simple Rankine Cycle.
(b) Flow chart of a power plant with five steam extraction points

τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του, ανάλογα με τον βαθμό υπερθέρμανσης του ατμού που ρέει στο κέλυφος. Πράγματι, στους συμβατικούς σταθμούς ενέργειας, ο ατμός των πρώτων σημείων απομάστευσης έχει μερικές εκατοντάδες βαθμούς Κελσίου υπερθέρμανση αντίθετα με τους πυρηνικούς σταθμούς όπου είναι σχεδόν κορεσμένοι. Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας από τον κορεσμένο ή υπέρθερμο ατμό είναι εντελώς διαφορετικοί, οδηγώντας σε διαφορετικές προσεγγίσεις στο σχεδιασμό του εναλλάκτη, εφόσον απαιτείται ιδιαίτερος εξοπλισμός για την κάθε περίπτωση. Έτσι, μπορούμε να έχουμε προθερμαντές μιάς, δύο ή τριών ζωνών. [1]. Οι προθερμαντές μιας ζώνης, απλώς συμπυκνώνουν κορεσμένο ατμό ενώ οι προθερμαντές δύο ζωνών, περιλαμβάνουν είτε συμπύκνωση/υπόψυξη είτε αφυπερθέρμανση/ συμπύκνωση. Με την ίδια λογική οι προθερμαντές τριών ζωνών, περιλαμβάνουν και τις τρεις προαναφερθείσες διεργασίες σε ένα κέλυφος.

Ο κύριος στόχος του σχεδιασμού των προθερμαντών είναι να ανυψώσουν τη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας όσο το δυνατόν περισσότερο, απορροφώντας τη μεγαλύ-

τερη δυνατή θερμική ενέργεια από τον διαθέσιμο ατμό απομάστευσης. Με βάση αυτό το στόχο, ορίζονται και οι δύο όροι που χαρακτηρίζουν την απόδοση των προθερμαντών, η Τερματική Θερμοκρασιακή Διαφορά (Terminal Temperature Difference, TTD) και η Προσέγγιση Ψύκτη Συμπυκνώματος (Drain Cooler Approach, DCA). [1].

2. Τεχνικές υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την προσομοίωση εξοπλισμού μεταφοράς θερμότητας

Η πρώτη εμφάνιση των τεχνικών ΥΡΔ στο σχεδιασμό εξοπλισμού εναλλαγής θερμότητας γίνεται το 1974 από τους S. V. Patankar και D. B. Spalding [2]. Οι ίδιοι ερευνητές είχαν στα προηγούμενα δύο χρόνια αναπτύξει μια πολύ αποδοτική τεχνική για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τη ροή των ρευστών και τη μετάδοση θερμότητας [3] και ήθελαν να κάνουν μια επίδειξη των δυνατοτήτων της στο σχεδιασμό μηχανολογικού εξοπλισμού. Παρ' όλο που η φιλοδοξία των δύο ερευνητών ήταν η δημιουργία ενός νέου τρόπου σκέψης στο σχεδιασμό, σήμερα 20 σχεδόν χρόνια αργότερα, οι παραπάνω μέθοδοι σχεδιασμού, χρησιμοποιούνται ακό-

μη στην πράξη μόνο από την πυρηνική και αεροδιαστημική βιομηχανία [4,5].

Η λογική πίσω από τη μοντελοποίηση εξοπλισμού μεταφοράς θερμότητας με χρήση τεχνικών υπολογιστικής ρευστοδυναμικής είναι απλή [6,8]. Μετά από ένα προκαταρκτικό υπολογισμό των βασικών γεωμετρικών παραμέτρων, ο χώρος που καταλαμβάνει το κέλυφος διαιρείται σε έναν αριθμό υπολογιστικών κελιών (που εξαρτάται μόνον από τις απαιτήσεις του σχεδιαστή για ακρίβεια και τη διαθεσιμότητα υπολογιστικής ισχύος και η τάξη μεγέθους του οποίου μπορεί να κυμανθεί από 10^3 , όπως στο παράδειγμα που παρουσιάζεται παρακάτω, μέχρι 10^6 ή και παραπάνω) όπως στο Σχ. 6.1. Η λεπτομερής αυτή διαίρεση του χώρου κάνει πού εύκολη την περιγραφή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της γεωμετρίας του κελύφους (αγωγής εισόδου - εξόδου, ανακλαστές, διαχωριστές περασμάτων κ.λπ.) και της συστοιχίας των σωληνώσεων (tube bundle) που περιγράφεται με την προσέγγιση του συνεχούς μέσου [6-8].

3. Το Υπολογιστικό μοντέλο

Η μαθηματική περιγραφή της

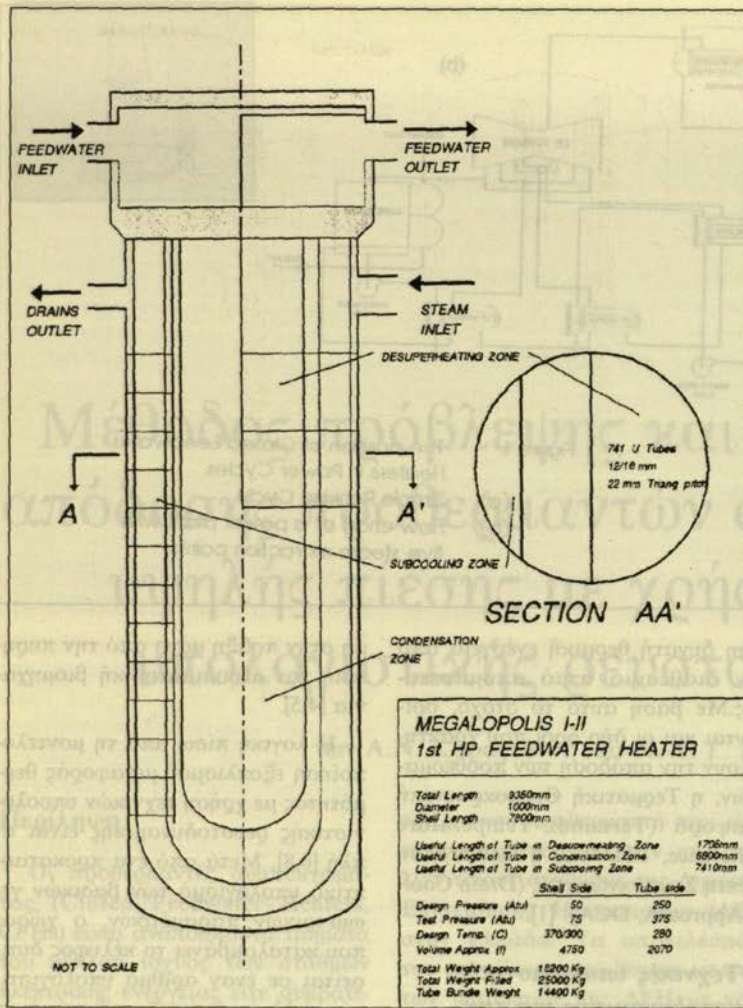


Figure 2. Simplified diagram of the PPC 3-zone Feedwater Heater.

μονο- (και πολυ-) φασικής ροής και μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό εναλλακτών θερμότητας, δεν είναι παρά η εφαρμογή των φυσικών νόμων διατήρησης μάζας, ορμής, και ενέργειας:

Νόμοι Διατήρησης

- Νόμος της κίνησης του Νεύτωνα (Διατήρηση Ορμής).

- Πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα (Διατήρηση Ενέργειας).

- Αξίωμα Διατήρησης Μάζας.

Νόμοι Μεταφοράς

- Νόμος Ξέωδους του Νεύτωνα (Μεταφοράς Ορμής).

- Νόμος αγωγής του Fourier (Μεταφορά Ενέργειας).

- Νόμος διάχυσης του Fick.

Οι παραπάνω φυσικοί νόμοι πε-

ριγράφονται από Διαφορικές Εξισώσεις με Μερικές παραγώγους (PDEs) οι οποίες για οικονομία χώρου δεν παρουσιάζονται εδώ. Καταστατικές εξισώσεις, σχέσεις Θερμοκρασίας - Ενθαλπίας, σχέσεις μεταφοράς θερμότητας και, τελικά, οριακές και ειδικές εσωτερικές συνθήκες, κλείνουν το σύστημα.

4. Ο Προθερμαντής συμπυκνώματος της ΔΕΗ - Αποτελέσματα

Ο Προθερμαντής που μελετήθηκε είναι ο πρώτος Προθερμαντής Υψηλής Πίεσης της μονάδας I-II του ληγνιτικού σταθμού της ΔΕΗ στη Μεγαλόπολη. Τα σχέδια, οι λει-

τουργικές παράμετροι καθώς και οι μετρήσεις μεγεθών από τον εναλλάκτη αυτό, που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο του μοντέλου, παρασχέθηκαν από τη Διεύθυνση Ειδικών Μετρήσεων της ΔΕΗ. Ο εναλλάκτης αυτός είναι ένας προθερμαντής τριών ζωνών και μεγάλων διαστάσεων. Ένα απλουστευμένο διάγραμμά του, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.

Ο συγκεκριμένος εναλλάκτης επελέγη διότι υπάρχουν πολλοί εναλλάκτες αυτού του τύπου στο σταθμό της Μεγαλόπολης και η ΔΕΗ σκοπεύει να μελετήσει τη λειτουργία τους κάτω από συνθήκες σταδιακού αποκλεισμού (ταπώματος - plugging) τμημάτων της συστοιχίας των σωληνώσεων λόγω διαρροών, για τον προσδιορισμό ενός βέλτιστου σχήματος συντήρησης. Ένας πιο φιλόδοξος στόχος ήταν η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του συγκεκριμένου εναλλάκτη σε απότομες μεταβολές των παραμέτρων των ρευσμάτων εισόδου.

4.1 Διακεκριμενοποίηση του χώρου και περιγραφή της γεωμετρίας

Χρησιμοποιήθηκε ένα πολικό υπολογιστικό πλέγμα 8x12x20 (angular x radial x axial) για τη διακεκριμενοποίηση του εσωτερικού του εναλλάκτη και την περιγραφή των δύο εσωτερικών κελυφών (του αφυπερθερμαντή και υπ - ψύκτη). Μια τρισδιάστατη άποψη της εσωτερικής γεωμετρίας του εναλλάκτη, όπως αυτή περιγράφεται στο μοντέλο, δίδεται στο Σχήμα 3.

Το υπολογιστικό μοντέλο περιγράφηκε και επιλύθηκε μέσω του γενικού περιβάλλοντος Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής PHOENICS ver. 2.0 που είναι διαθέσιμο στη Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

4.2 Μοντελοποίηση των Θερμικών Διεργασιών

Τουλάχιστον τέσσερις διαφορετικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας διακρίνονται στον προθερμαντή, που εμφανίζεται σε απλουστευμένη μορφή στο Σχήμα 4:

i) Αφυπερθερμανση σε «ξηρό»

τοίχο (Dry Wall Desuperheating) που ισοδυναμεί με απλή ψύξη αερίου με συναγωγή.

ii) Αφυπερθέρμανση σε «υγρό» τοίχο (Wet Wall Desuperheating).

iii) Συμπύκνωση λεπτού στρώματος γύρω από κάθετους σωλήνες (Film Condensation Outside Vertical Tubes).

iv) Απλή ψύξη υγρού με συναγωγή (Convection Subcooling).

Σε κάθε ένα από τους παραπάνω μηχανισμούς, οι τοπικοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας υπολογίζονται διαφορετικά, πράγμα που δημιουργεί σημαντικά υπολογιστικά προβλήματα. Θα πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι οι περιοχές εφαρμογής κάθε μηχανισμού δεν είναι διακριτές και πρέπει να επανακαθορίζονται συνέχεια κατά τη διάρκεια των επαναληπτικών υπολογισμών χρησιμοποιώντας ειδικά κριτήρια.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι τα πεδία των πιέσεων, ταχυτήτων, ενθαλπών και θερμοκρασιών των δύο φάσεων (νερού και ατμού), ενώ προσδιορίζεται και η θέση της στάθμης του συμπυκνώματος. Δείγματα των αποτελεσμάτων παρατίθενται στο Σχήμα 5.

Ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την επίλυση του ανωτέρω μοντέλου, κυμαίνεται από μερικές ώρες (σε ένα PC 486) έως μερικά λεπτά σε ένα μοντέρνο RISC based workstation. Σε κάθε περίπτωση οι παραμετρικές μελέτες που απαιτούνται για τον έλεγχο διαφόρων εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού, μπορούν να συγκριθούν και να μελετηθούν με πολύ μικρό κόστος.

5. Συμπεράσματα

Η παρουσίαση αυτή περιγράφει σύντομα μια νέα προσέγγιση στα σχεδιαστικά προβλήματα των προθερμαντών συμπυκνώματος χρησιμοποιώντας μοντέρνες τεχνικές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων σχεδιασμού, τόσο συμβατικών όσο και πολύπλοκων και εξειδικευμένων εναλλακτών θερμότητας, όπως ο παραπάνω, με στρατηγικές σχεδια-

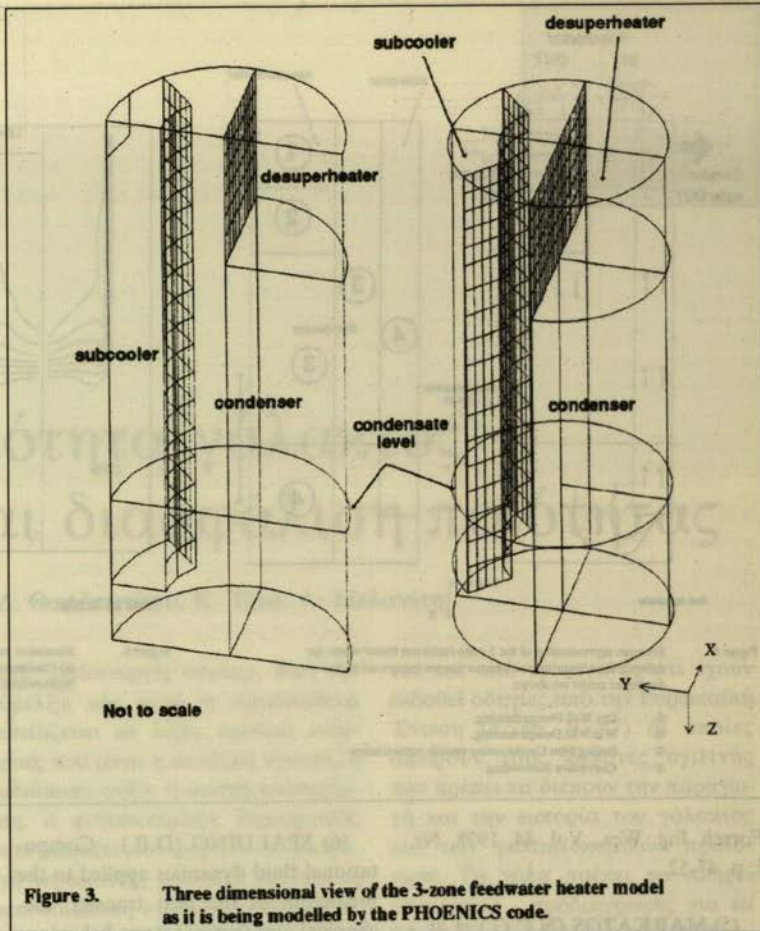


Figure 3. Three dimensional view of the 3-zone feedwater heater model as it is being modelled by the PHOENICS code.

σμού που λαμβάνουν υπ' όψη τους τοπικές και όχι συνολικές παραμέτρους, είναι προφανή. Η ανάπτυξη τεχνικών στηριγμένων στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, όπως η προαναφερθείσα, αποτελούν ένα ακόμη βήμα προς την επίτευξη αυτού του δύσκολου στόχου.

6. Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς επιθυμούν να ευχαριστήσουν τη Διεύθυνση Ειδικών Μετρήσεων της ΔΕΗ και συγκεκριμένα τους κ. Χατζηφώτη και Βιόλο για την παροχή στοιχείων σχετικά με τον υπό μελέτη προθερμαντή και την εταιρεία CHAM Ltd, London, UK, για την άδεια χρήσης του προγράμματός της PHOENICS ver. 20.

Βιβλιογραφία

(1) SINGH K.P. Closed Feedwater

Heaters - An Overview. In *Heat Transfer Equipment Design*, Advanced Study Institute Book, Hemisphere Publishing Co., London, 1988.

(2) PATANKAR (S.V.) and SPALDING (D.B.). - A calculation procedure for the transient and steady-state behaviour of shell-and-tube heat exchangers, In *Heat exchangers, design and theory source-book* (Afgan, N & Schlunder E.U. eds.), Mc Graw - Hill, 1974.

(3) PATANKAR (S.V.) and SPALDING (D.B.). - A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flow. *Int J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, (1972), p. 1987-1806.

(4) PATANKAR (S.V.) and SPALDING (D.B.). - Computer analysis of the three-dimensional flow and heat transfer in a steam generator.

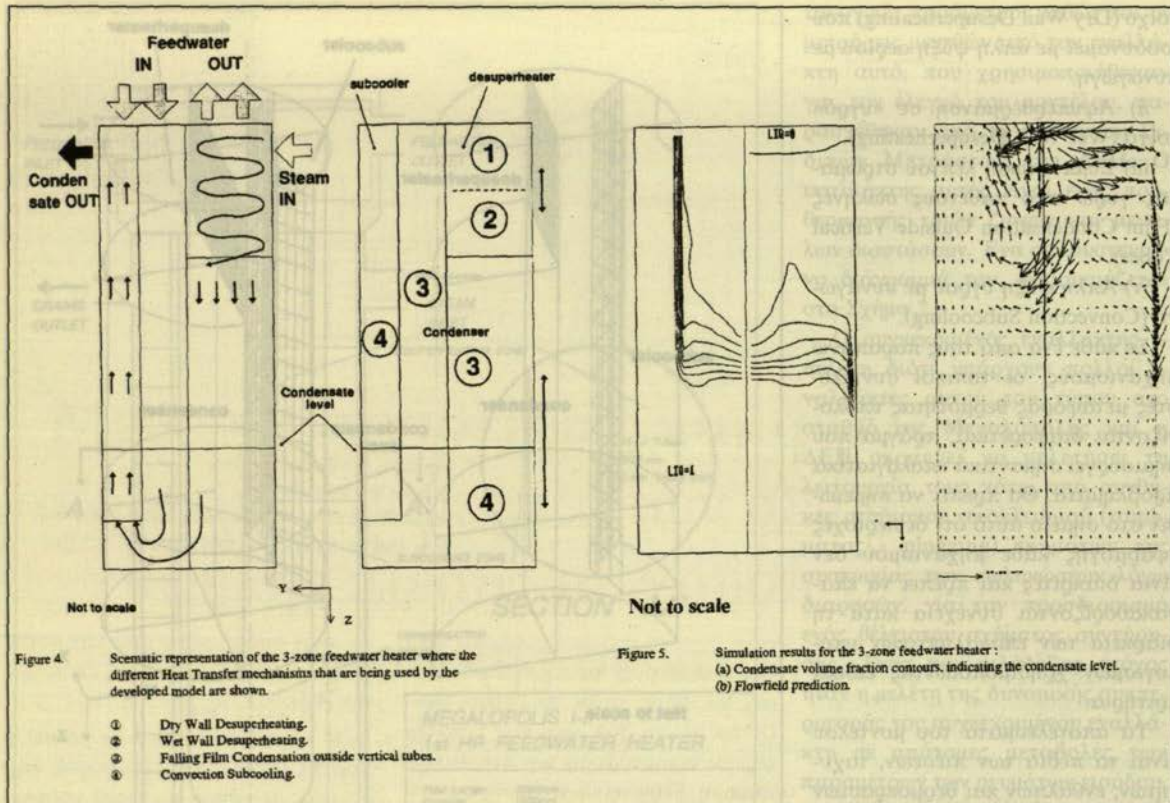


Figure 5. Simulation results for the 3-zone feedwater heater:
 (a) Condensate volume fraction contours, indicating the condensate level.
 (b) Flowfield prediction.

Forsch. Ing. Wes., Vol. 44, 1978, Nr. 2, p. 47-52.

(5) MARKATOS (N.C.G.) et al. - Calculation of steady, three-dimensional, two-phase flow and heat transfer in steam generators, In *Two-Phase Momentum, Heat and Mass Transfer in Chemical, Process, and Energy Engineering Systems* (Durst, F., Tsiklauri, G.V. & Afgan, N.H. eds.), Hemisphere, Washington D.C. 1980.

(6) SPALDING (D.B.) - Computational fluid dynamics applied to the prediction of the heat transfer, mechanical and thermal stress behaviour of heat exchangers. In *Heat Transfer Equipment Design*, Advanced Study Institute Book, Hemisphere Publishing Co., London, 1988.

(7) KARAYANNIS A.N. & MARKATOS N.C.G., «Rating and Design of Process Heat Exchangers. From Classical Methods to Compu-

tational Fluid Dynamics Techniques», *Proc. EURO THERM 33 seminar*, Paris, 13-14 Oct 1993. To be published by Editions Europeennes Thermique et Industrie (EETI).

(8) KARAYANNIS A.N. & MARKATOS N.C.G., «Mathematical Modelling of Heat Exchangers» *10th International Heat Transfer Conference*. Also presented at the *6th PHOENICS European User Conference*, November 1994, Warwick, U.K.