



# Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας



## “Energy resources: Technologies & Management”

“Τεχνολογίες “καθαρού” άνθρακα”

**Δρ. Γεώργιος Σκόδρας**  
**Αν. Καθηγητής**



## Νέες «καθαρές» τεχνολογίες



- Ανακυκλοφορούσα ρευστοστερεά κλίνη καύσης (CFBC)
- Ρευστοστερεά κλίνη καύσης σε υψηλή πίεση (PFBC)
- Ολοκληρωμένο σύστημα εξαερίωσης συνδυασμένου κύκλου (IGCC)
- Υβριδικό σύστημα συνδυασμένου κύκλου
- Συνδυασμένος κύκλος υδρογονοεξαερίωσης και εξαερίωσης με CO<sub>2</sub>
- Μαγνητοϋδροδυναμικό σύστημα παραγωγής ενέργειας.



# Νέες «καθαρές» τεχνολογίες



Οι νεότερες τεχνολογίες καύσης και εξαερίωσης είναι:

- ✓ **Ανακυκλοφορούσα ρευστοστερεά κλίνη καύσης (CFBC), με καθαρισμό των αερίων για περιορισμό των εκπομπών σωματιδίων (βλέπε κεφάλαιο 8, διαφ. 85-92)**
- ✓ **Ρευστοστερεά κλίνη καύσης σε υψηλή πίεση (PFBC), με σύστημα συνδυασμένου κύκλου αεριοστροβίλου (βλέπε κεφάλαιο 8, διαφ. 93-100)**
- ✓ **Ολοκληρωμένο σύστημα εξαερίωσης συνδυασμένου κύκλου (IGCC), με χαρακτηριστικό την πλήρη μετατροπή του άνθρακα σε καύσιμο αέριο, καθαρισμό του αερίου και συνδυασμένο κύκλο αεριοστροβίλου-ατμοστροβίλου για παραγωγή ενέργειας (βλέπε και κεφάλαιο 9)**



# Νέες «καθαρές» τεχνολογίες



Οι νεότερες τεχνολογίες καύσης και εξαερίωσης είναι:

- ✓ **Υβριδικό σύστημα συνδυασμένου κύκλου μερικής εξαερίωσης, καύσης του αερίου καυσίμου σε αεριοστρόβιλο και καύσης του απομένοντος εξανθρακώματος σε λέβητα για ατμοπαραγωγή.**
- ✓ **Συνδυασμένος κύκλος υδρογονοεξαερίωσης και εξαερίωσης με διοξείδιο του άνθρακα (βλέπε κεφάλαιο 9, διαφ. 52)**
- ✓ **Μαγνητοϋδροδυναμικό σύστημα παραγωγής ενέργειας.**



## Νέες «καθαρές» τεχνολογίες



Στις κύριες αυτές ομάδες συστημάτων, σημαντικός είναι ο ρόλος των **διαφορετικών εναλλακτικών λύσεων τροφοδοσίας του καυσίμου, καθαρισμού των αερίων και άλλων σχεδιαστικών παραμέτρων**. Στην ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών, ιδιαίτερα έχει βοηθήσει και ο **μεγάλος βαθμός απόδοσης αεριοστροβίλων «υψηλού φορτίου»**. Σήμερα, η δυναμικότητα των αεριοστροβίλων και η αξιοπιστία τους έχουν βελτιωθεί τόσο ώστε να θεωρείται εφικτή η άμεση εφαρμογή τους σε μόνιμη λειτουργία.

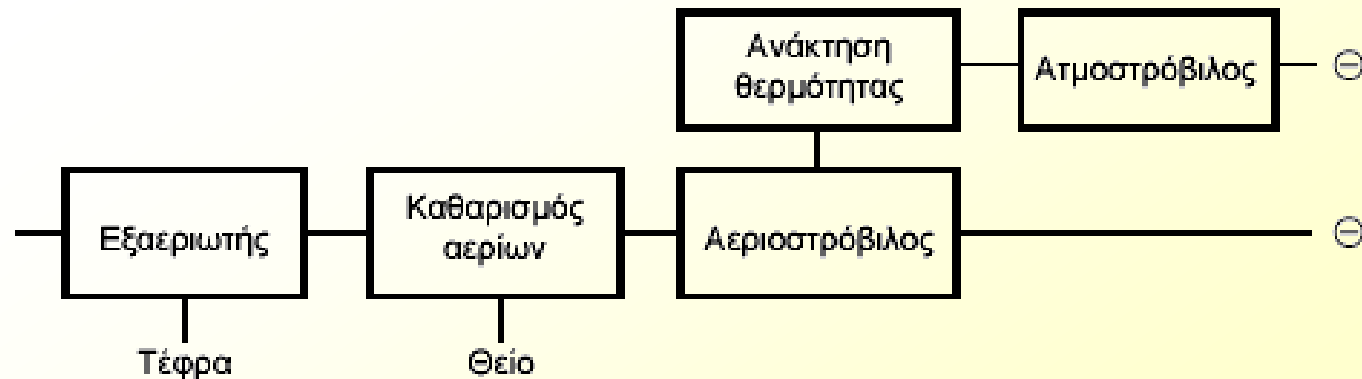
Καθώς κάθε διάταξη περιλαμβάνει πολλές επιμέρους διεργασίες, ο αριθμός των δυνατών εναλλακτικών λύσεων αυξάνει, με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτιστοποίησης. Αυτό όμως κάνει δύσκολη την σύγκριση των επιπτώσεων που έχουν οι διάφορες σχεδιαστικές επιλογές.



## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

Η διεργασία IGCC αποτελεί έναν ολοκληρωμένο συνδυασμό των ακόλουθων βασικών στοιχείων: εξαεριωτής άνθρακα, φυσικές διεργασίες καθαρισμού αερίου, βοηθητικό σύστημα συμπίεσης αέρα, διαχωρισμού και μεταφοράς άνθρακα και διατάξεις αεριοστροβίλου / ατμοστροβίλου για παραγωγή ενέργειας. Ο εξαεριωτής που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση αυτή μπορεί να είναι σταθερής ή κινούμενης κλίνης, ρευστοστερεάς κλίνης ή αντιδραστήρας παράσυρσης όπου μπορεί να τροφοδοτείται ξηρός κονιοποιημένος άνθρακας ή πολτός (slurry).

Τα 3 αυτά συστήματα εξαερίωσης έχουν φτάσει σε ικανοποιητικό επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας και προσφέρονται από αρκετούς κατασκευαστές.



Γενική διάταξη εγκατάστασης IGCC





## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

Το αέριο καύσιμο που παράγεται από τον εξαεριωτή υφίσταται καθαρισμό και στην συνέχεια τροφοδοτείται στον αεριοστρόβιλο, όπου καίεται με συμπιεσμένο αέρα.

Τα θερμά, υψηλής πίεσης καυσαέρια κινούν τον στρόβιλο και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Τα εκτονωμένα καυσαέρια διέρχονται από λέβητα ανάκτησης θερμότητας όπου παράγεται ατμός υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Ο ατμός οδηγείται σε ατμοστρόβιλο για παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε ένα τέτοιο σύστημα, ο αεριοστρόβιλος παράγει το 60% περίπου της συνολικής ισχύος.



## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

Συγκριτικά με τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από καύση κονιοποιημένου καυσίμου (PF) που δεν χρησιμοποιούν συνδυασμένο κύκλο, ένα σύστημα IGCC παρουσιάζει το «μειονέκτημα» της μεταφοράς του άνθρακα σε καύσιμο αέριο.

Η υψηλή απόδοση που επιτυγχάνεται όμως από τον συνδυασμένο κύκλο αντισταθμίζει το μειονέκτημα αυτό.

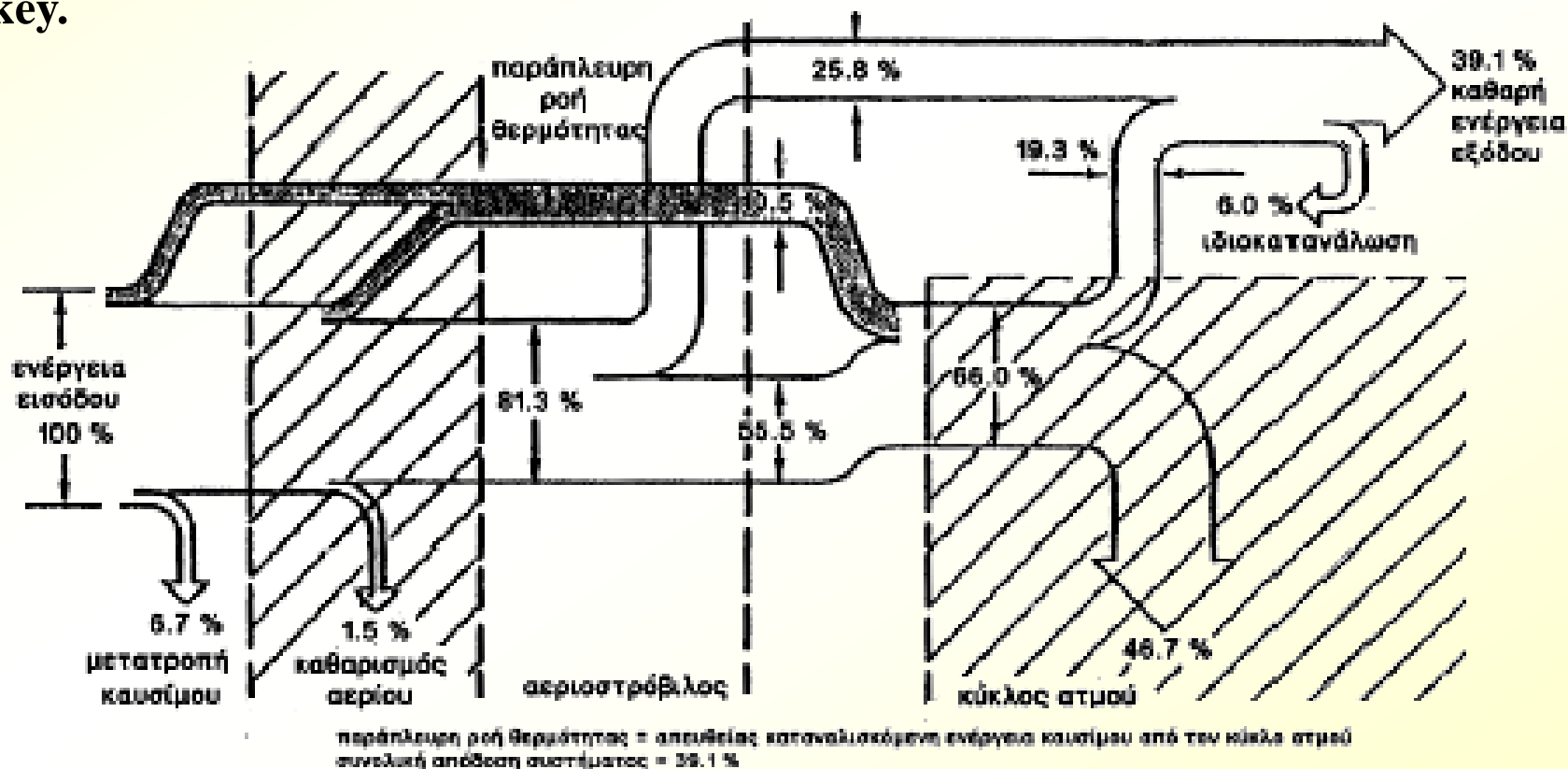
Πέρα από την υψηλή απόδοση, τα συστήματα IGCC έχουν, σε σχέση με τα συστήματα PF, εξαιρετική περιβαλλοντική συμπεριφορά, μικρότερη ποσότητα στερεών καταλοίπων, μικρότερη κατανάλωση νερού και δυνατότητα κατασκευής σε φάσεις.





## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

Η ροή ενέργειας σε ένα τυπικό σύστημα IGCC παρουσιάζεται στο διάγραμμα Sankey.



Διάγραμμα κατανομής ενέργειας κατά Sankey κύκλου IGCC.



## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

Φαίνεται ότι ο αεριοστρόβιλος συμβάλλει κατά 60 % περίπου στην συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος και ότι η λειτουργία του κύκλου ατμοστροβίλου παρουσιάζει τις μεγαλύτερες απώλειες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η απόδοση μετατροπής καυσίμου, ο λόγος παράκαμψης ενέργειας και η απόδοση παραγωγής εξαρτώνται από τις επιλεγόμενες κάθε φορά διεργασίες εξαερίωσης και καθαρισμού των αερίων. Οι απώλειες για καθαρισμούς αερίων μπορεί να είναι μεγαλύτερες από αυτές του διαγράμματος, όσο αυξάνουν οι περιορισμοί εκπομπών.



## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

Από το διάγραμμα Sankey είναι προφανές ότι τα τρία κύρια στοιχεία της διεργασίας είναι η μετατροπή του εισερχόμενου άνθρακα σε καθαρό αέριο καύσιμο, ο αεριοστρόβιλος και το σύστημα της ατμογεννήτριας.

Δύο λιγότερο εμφανή αλλά εξίσου σημαντικά στοιχεία του διαγράμματος είναι ο «λόγος παράκαμψης ενέργειας» και η καθαρή απόδοση σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται μεταξύ τους με την εξίσωση:

$$E_{\text{sys}} = E_{\text{con}} * (E_{\text{gt}}(1-E_{\text{sc}})(1-H_{\text{bp}}) + E_{\text{sc}}) * E_{\text{gen}}$$

όπου  $E_{\text{sys}}$  : η συνολική απόδοση του συστήματος IGCC

$E_{\text{con}}$  : η απόδοση μετατροπής του καυσίμου

$E_{\text{gt}}$  : οι αποδόσεις των κύκλων αεριοστροβίλου

$E_{\text{sc}}$  : η απόδοση του ατμοστροβίλου

$H_{\text{bp}}$  : ο λόγος παράκαμψης ενέργειας και

$E_{\text{gen}}$  : η απόδοση της παραγωγής



## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

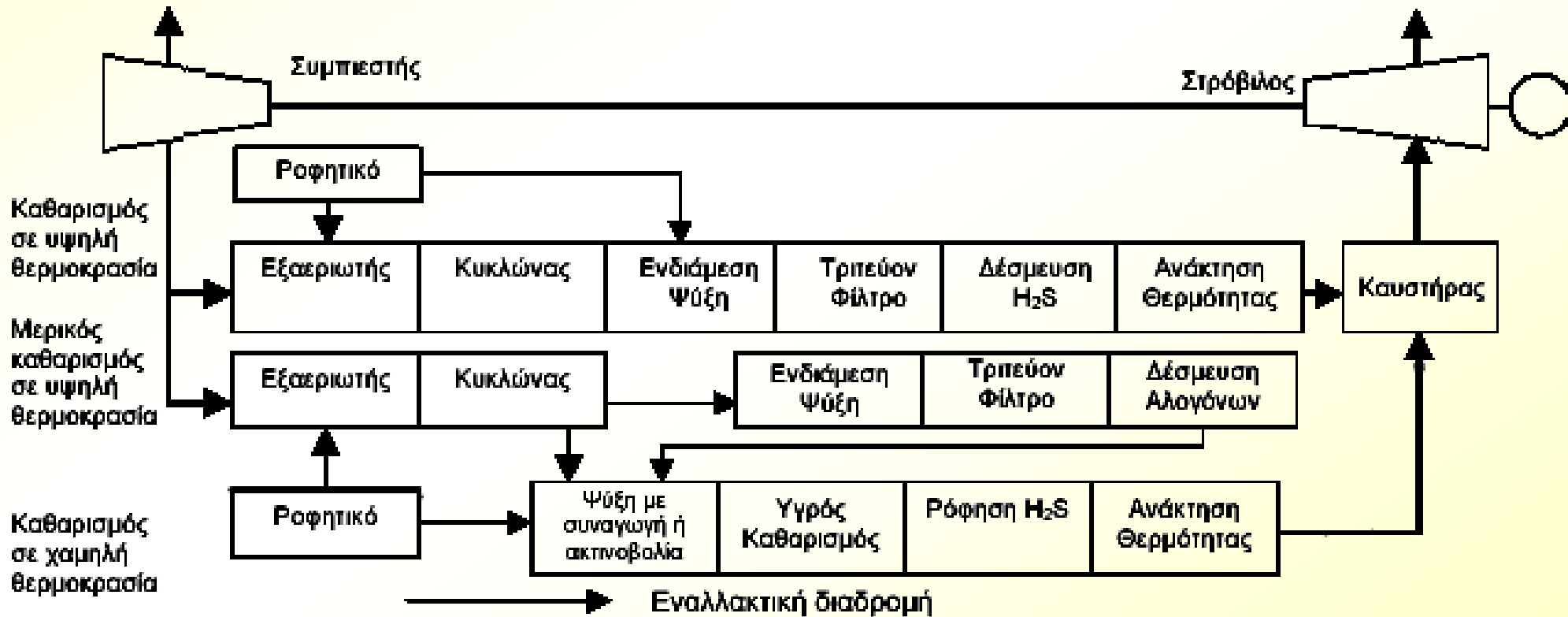
Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων IGCC είναι οι **χαμηλές εκπομπές αερίων ρύπων.**

Για την σωστή λειτουργία των αεριοστροβίλων, αλλά και για τον περιορισμό των εκπομπών από την εγκατάσταση, σημαντικός είναι ο ρόλος διεργασιών καθαρισμού των καυσαερίων.



## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

Στο Σχήμα παρουσιάζονται τα κρίσιμα στοιχεία και η ακολουθία των κυριότερων διαχωρισμών σε υψηλή και χαμηλή θερμοκρασία. Υπάρχει μεγάλος αριθμός διαθέσιμων διεργασιών καθαρισμού και απομάκρυνσης των ανεπιθύμητων ενώσεων.



Καθαρισμός αερίων IGCC.



## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

Στις αναγωγικές συνθήκες της διεργασίας εξαερίωσης, το θείο του άνθρακα μετατρέπεται σε υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ) και όχι σε διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ).

Το υδρόθειο μπορεί εύκολα να απομακρυνθεί από τα αέρια με απορρόφηση σε διάλυμα και πάνω από 99% του θείου ανακτάται σε στοιχειακή, εμπορεύσιμη μορφή.

Πιο δύσκολη είναι η απομάκρυνση διθειούχου και οξυθειούχου άνθρακα που πιθανόν να επηρεάζουν και την απομάκρυνση του  $\text{H}_2\text{S}$ .

Ανάλογα, το άζωτο του άνθρακα μετατρέπεται σε αμμωνία που διαλύεται εύκολα στο νερό και απομακρύνεται στην στήλη απορρόφησης.

Τα λεπτόκοκκα σωματίδια που πιθανόν να μεταφέρονται με τα απαέρια απομακρύνονται σχεδόν πλήρως σε κυκλώνες και/ή πύργους απορρόφησης.





## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

Στον Πίνακα συγκρίνονται οι εκπομπές  $\text{SO}_2$  και  $\text{NO}_x$  καθώς και τα παραγόμενα στερεά κατάλοιπα από εγκαταστάσεις καύσης κονιοποιημένου άνθρακα με αποθείωση

των απαερίων (PCF-FGD), ατμοσφαιρικής ρευστοστερεάς κλίνης (AFBC) και συστήματος IGCC.

Σ' όλες τις περιπτώσεις το  $\text{SO}_2$  προέρχεται από το S του καυσίμου, ενώ τα  $\text{NO}_x$  παράγονται από το άζωτο του καυσίμου και του αέρα της καύσης.

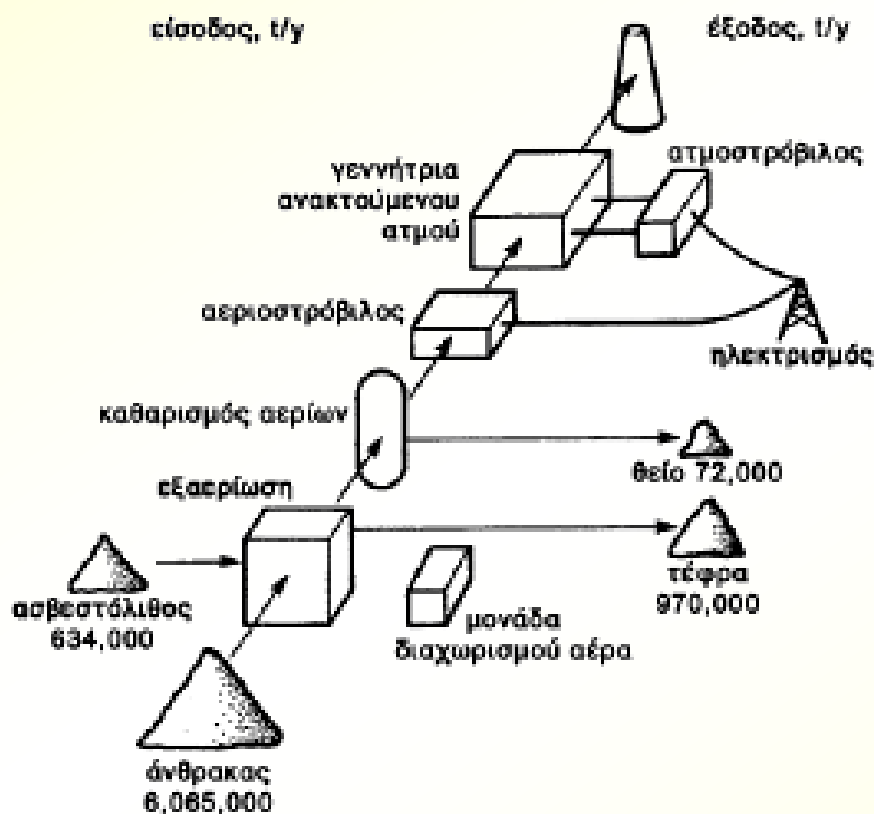
Στην περίπτωση του κύκλου IGCC, όμως, το άζωτο του καυσίμου έχει απομακρυνθεί ήδη σαν αμμωνία και κατά συνέπεια τα παραγόμενα  $\text{NO}_x$  προέρχονται από το άζωτο του αέρα καύσης. Προσεκτική διαχείριση της καύσης, όπως σταδιακή καύση, έγχυση ατμού ή νερού περιορίζει σημαντικά τις εκπομπές  $\text{NO}_x$ .

	Αέρια		Στερεά
	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	
PCF + FGD	13	7	680
AFBC	6	4	1090
IGCC	4	3	270

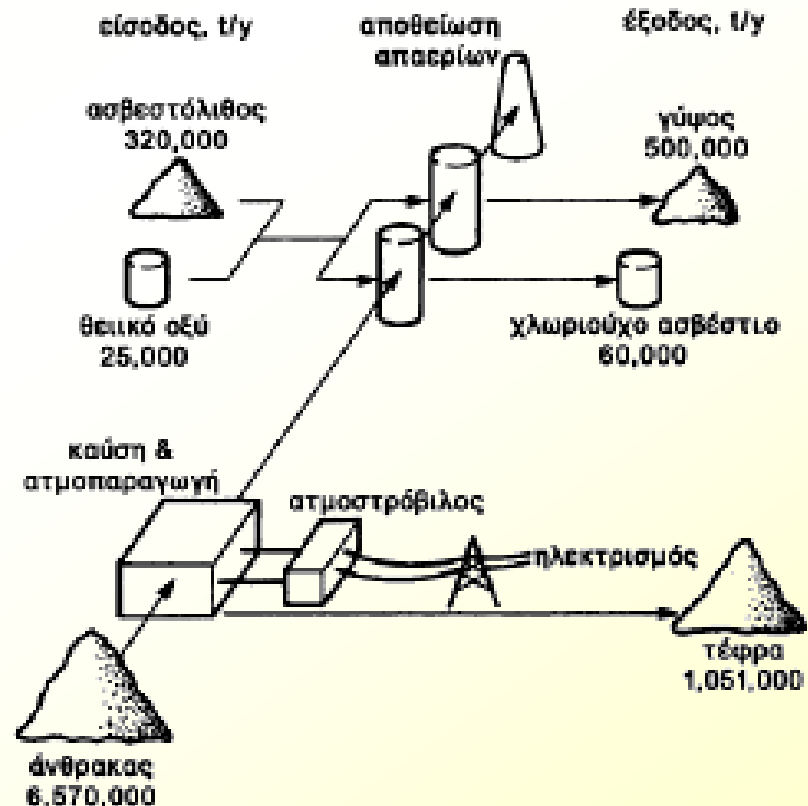


## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

Στο Σχήμα γίνεται ποσοτική σύγκριση των στερεών καταλοίπων μιας τυπικής μονάδας IGCC και μιας εγκατάστασης PF + FGD, για την ίδια παραγωγή ισχύος 2000 MWe



(α) μονάδα εξαερίωσης συνδυασμένου κύκλου 2000 MWe



(β) συμβατική μονάδα παραγωγής ενέργειας 2000 MWe, με FGD



## Νέες «καθαρές» τεχνολογίες



Η ποσότητα του τροφοδοτούμενου άνθρακα στην μονάδα IGCC είναι κατά 8% μικρότερη αυτής του συστήματος PF + FGD, ενώ τα στερεά κατάλοιπα στην πρώτη είναι κατά 60% λιγότερα.

**Το θείο** λαμβάνεται υπόψη ξεχωριστά αφού παράγεται σε στοιχειακή μορφή και αποτελεί **εμπορεύσιμο παραπροϊόν**. Αν και ο παραγόμενος γύψος από την μονάδα αποθείωσης των καυσαερίων της εγκατάστασης PF μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν οικοδομικό υλικό, το μεγαλύτερο μέρος του, προς το παρόν, αποτίθεται σε χωματερές.

Συνεπώς, **οι εγκαταστάσεις IGCC** προσφέρουν ένα επιπλέον πλεονέκτημα καθώς **απαιτούν περιορισμένο χώρο απόθεσης των στερεών καταλοίπων**.

Τέλος, σημαντικές προσπάθειες καταβάλλονται για την αξιοποίηση της τέφρας των εξαεριωτών και των CFBC από μονάδες IGCC ως κατασκευαστικών υλικών (τούβλων, επιστρωμάτων οδών, κ.λ.π.), για την ανακύκλωσή τους στα ορυχεία, για την σταθεροποίηση του εδάφους ή για την παρασκευή ζεολιθικών υλικών.



## Ολοκληρωμένα Συστήματα Εξαερίωσης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

Οι εγκαταστάσεις IGCC χαρακτηρίζονται από **μειωμένες απαιτήσεις σε νερό**, αφού τα 2/3 σχεδόν της συνολικής ισχύος παράγονται στον αεριοστρόβιλο που δεν παράγει ατμό και συνεπώς δεν απαιτεί νερό ψύξης για συμπύκνωση ατμού.

Αντίθετα, οι κλασσικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής από καύση κονιοποιημένου άνθρακα απαιτούν πολύ μεγάλες ποσότητες νερού για συμπλήρωση του νερού στο σύστημα ψύξης και για αντικατάσταση του εξατμιζόμενου νερού στους πύργους ψύξης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένας σταθμός συνολικής ισχύος 1000 MWe από καύση κονιοποιημένου άνθρακα απαιτεί περίπου 5000t νερού την ώρα για αντικατάσταση των ανωτέρω απωλειών.

Αν ο σταθμός διαθέτει και σύστημα αποθείωσης των καυσαερίων απαιτούνται επιπλέον 230 t/h για τις στήλες απορρόφησης. **Σταθμοί IGCC που διαθέτουν σύστημα αποθείωσης** και χρησιμοποιούν αιώρημα άνθρακα για την τροφοδοσία τους **απαιτούν μόνο το 70% του νερού που χρησιμοποιείται σε κλασσικές εγκαταστάσεις καύσης.**



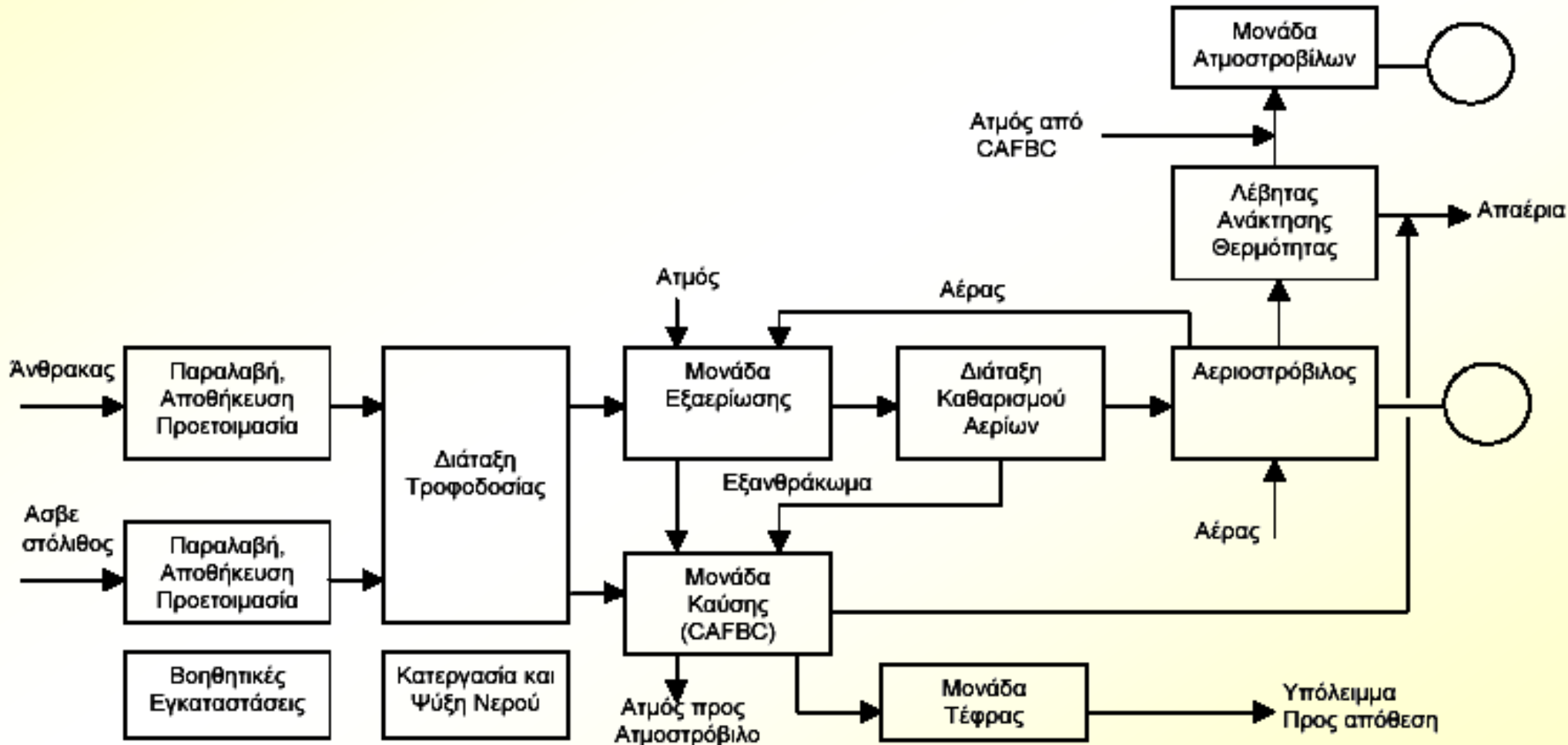
## Υβριδικοί Συνδυασμένοι Κύκλοι

Η ιδέα των υβριδικών συνδυασμένων κύκλων, η «**αναβαθμισμένων**» κύκλων, προτάθηκε αρχικά σαν μέθοδος υπέρβασης των περιορισμών που υπεισέρχονται από την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου στους συνδυασμένους κύκλους PFBC.



# Νέες «καθαρές» τεχνολογίες

## Υβριδικό Συνδυασμένο Κύκλο



Διάγραμμα ροής για υβριδικό συνδυασμένο κύκλο





## Νέες «καθαρές» τεχνολογίες



### Υβριδικοί Συνδυασμένοι Κύκλοι

Οι υβριδικοί κύκλοι περιλαμβάνουν ένα στάδιο παραγωγής αερίου από εξαερίωση άνθρακα και ένα στάδιο καύσης του εναπομένοντος εξανθρακώματος, σε συνδυασμό με αεριοστρόβιλο και ατμοστρόβιλο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στον εξαεριωτή χρησιμοποιείται ασβεστόλιθος για την απομάκρυνση θειούχων ενώσεων.

Στο στάδιο της εξαερίωσης παράγεται όλο το αναγκαίο αέριο για την λειτουργία του αεριοστροβίλου. Το εναπομένον εξανθράκωμα καίγεται σε λέβητα αποδίδοντας θερμότητα για ατμοπαραγωγή. Πρόσθετη θερμότητα για ατμοπαραγωγή ανακτάται επίσης από τα εκτονωμένα αέρια του αεριοστροβίλου. Ο αέρας που απαιτείται στον εξαεριωτή παραλαμβάνεται υπό πίεση από τον συμπιεστή του αεριοστροβίλου.



## Υβριδικοί Συνδυασμένοι Κύκλοι

Ο αρχικός σχεδιασμός των υβριδικών συνδυασμένων κύκλων βασιζόταν στην σχετικά απλή λύση της αποπτητικοποίησης του άνθρακα. Πιο πρόσφατες προτάσεις περιλαμβάνουν κάποιο βαθμό εξαερίωσης, με στόχο την αύξηση της μετατροπής του άνθρακα και την βελτίωση της συνολικής απόδοσης της μονάδας.

Σ' όλες τις περιπτώσεις το εναπομένον από την εξαερίωση εξανθράκωμα, καίεται για παραγωγή ατμού πιθανόν με προσθήκη φρέσκου άνθρακα. Στις πρώτες εγκαταστάσεις το παραγόμενο καύσιμο αέριο χρησιμοποιούταν για την αύξηση της θερμοκρασίας των αερίων που εξέρχονται από τον PFBC πριν εισέλθουν στον αεριοστρόβιλο, από 850°C σε 1250°C περίπου. Ο συνδυασμός αυτός χαρακτηρίστηκε ως “αναβαθμισμένος” κύκλος topping cycle από την British Coal που τον ανέπτυξε στην Μ. Βρετανία.



## Υβριδικοί Συνδυασμένοι Κύκλοι

Σε πιο πρόσφατες σχεδιαστικές λύσεις, τα δύο ρεύματα των καυσίμων διαχωρίζονται. Με τον τρόπο αυτόν, οι απαιτήσεις καθαρισμού των αερίων μειώνονται και μόνο καθαρό καύσιμο αέριο χρησιμοποιείται στον στρόβιλο για παραγωγή ισχύος. Το στερεό εξανθράκωμα της εξαερίωσης χρησιμοποιείται για παραγωγή θερμότητας και ατμού.

Σε ορισμένες εγκαταστάσεις, τα εκτονούμενα από τον στρόβιλο αέρια που περιέχουν σημαντική ποσότητα οξυγόνου χρησιμοποιούνται σαν προθερμασμένος αέρας καύσης στον λέβητα του εξανθρακώματος, με πιθανή τροφοδοσία και συμπληρωματικού αέρα για βελτίωση της απόδοσης καύσης. Σε άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται εναλλάκτες για την ανάκτηση θερμότητας από τα εκτονούμενα αέρια του στροβίλου και πλήρως αυτόνομος αέρας για την καύση του εξανθρακώματος.



## Υβριδικοί Συνδυασμένοι Κύκλοι

Γενικά εκτιμάται ότι τα συστήματα που περιγράφονται στον Πίνακα δεν έχουν φτάσει ακόμη σε επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας, ωστόσο αρκετά χαρακτηριστικά τους έχουν επιδειχθεί σε σημαντική κλίμακα.

### Υβριδικοί συνδυασμένοι κύκλοι σε διάφορα στάδια σχεδιασμού ή/και ανάπτυξης

Χώρα	Θέση	Μέγεθος	Κατασκευαστής	Σύστημα	Μονάδα
Γερμανία	-		Deutsche Babcock	Circofluid δύο βαθμίδων	Πιλοτική
Γερμανία	-		Lurgi	Εξαεριωτής PFBC/Λέβητας	Πιλοτική
Γερμανία	Erlangen	750 MWe	GFA	Φυσικό αέριο/λέβητας PF	Μελέτη
Γερμανία	Werne	700 MWe	VEW	Φυσικό αέριο/λέβητας PF	Εγκατάσταση
Γερμανία	-	250 MWe	VEW	Λέβητας/CFBC	Μελέτη
Μ. Βρετανία	GRE, Cheltenham		British Coal	Λέβητας/CFBC	Πιλοτική
ΗΠΑ	Manitowoc, WI	60 MWe	Foster Wheeler		
ΗΠΑ	Des Moines, IA	80 MWe	Pyropower	PCFBC	Σχεδιασμός
ΗΠΑ	Des Moines, IA	140 MWe	Pyropower	Εξαεριωτής PFBC/Λέβητας	Πρόταση



## Νέες «καθαρές» τεχνολογίες



### Υβριδικοί Συνδυασμένοι Κύκλοι

Αξιοπρόσεκκτη, είναι η μονάδα της VEW στην Werne ισχύος 700 MWe. Η μονάδα λειτουργεί με καύση φυσικού αερίου. Τα εκτονωμένα αέρια από τον αεριοστρόβιλο χρησιμοποιούνται σαν προθερμασμένος αέρας για καύση άνθρακα σε λέβητα κονιοποιημένου καυσίμου.

Η VEW ανέπτυξε αυτόν τον υβριδικό κύκλο με προοπτική να λειτουργεί αποκλειστικά με άνθρακα. Έχουν γίνει πιλοτικές δοκιμές με αντιδραστήρα παράσυρσης 30 MWe για την εξαερίωση του άνθρακα. Επιπλέον σχεδιάζεται αναβάθμιση του συστήματος εξαερίωσης ώστε να παρέχει καύσιμο αέριο σε επιδεικτική μονάδα υβριδικού κύκλου 250 MWe



## Υβριδικοί Συνδυασμένοι Κύκλοι

Η συνεχιζόμενη ανάπτυξη των υβριδικών κύκλων κατέδειξε μία σειρά πλεονεκτημάτων, όπως το ότι δεν είναι τόσο σημαντική η επίτευξη υψηλής μετατροπής του άνθρακα στον πρώτο εξαεριωτή για την συνολική λειτουργία του συστήματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο μειώνεται η χρήση ατμού στο στάδιο της εξαερίωσης και συνεπώς οι θερμικές απώλειες από την λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών στα απαέρια.

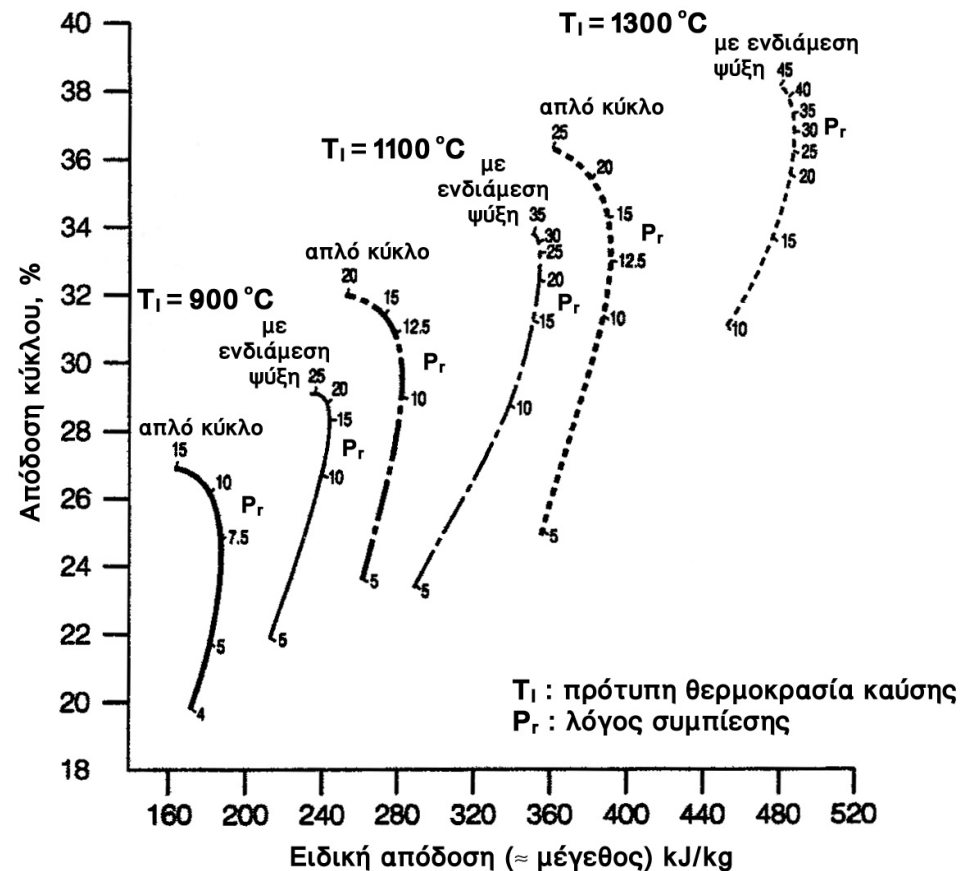
Εφόσον η παραγωγή καυσίμου δεν είναι κρίσιμη για την διασφάλιση σωστών συνθηκών λειτουργίας, οι σχεδιαστικές και λειτουργικές απαιτήσεις για το στάδιο της εξαερίωσης γίνονται λιγότερο αυστηρές. Στο στάδιο της καύσης, όμως, φαίνεται να παράγεται στερεό υπόλειμμα με αυξημένη περιεκτικότητα σε θειικά, με πιθανά προβλήματα διάθεσής του ανάλογα με αυτά των ρευστοστερεών κλινών καύσης.





## Υβριδικοί Συνδυασμένοι Κύκλοι

Το κύριο πλεονέκτημα των υβριδικών κύκλων είναι η επίτευξη αυξημένης θερμοκρασίας των αερίων που εκτονώνονται στον αεριοστρόβιλο. Ενώ τα κλασσικά συστήματα PFBC ή εξαερίωσης θέτουν ένα άνω όριο  $900^{\circ}\text{C}$  περίπου για την είσοδο των αερίων στον στρόβιλο, οι υβριδικοί κύκλοι επιτυγχάνουν θερμοκρασίες καυσαερίων  $1250-1300^{\circ}\text{C}$ . Η θερμική όμως απόδοση των αεριοστροβίλων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην θερμοκρασία εισόδου των αερίων.



Χαρακτηριστικά αεριοστροβίλου



# Νέες «καθαρές» τεχνολογίες



## Υβριδικοί Συνδυασμένοι Κύκλοι

**Η απόδοση των στροβίλων αυξάνει κατά 2% για κάθε 100°C αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου.**

**Δεδομένου ότι οι στρόβιλοι νέας τεχνολογίας λειτουργούν με θερμοκρασίες εισόδου 1300°C, η βελτίωση της απόδοσης στις υψηλές θερμοκρασίες αερίων των υβριδικών κύκλων αναμένεται να φτάσει τις οκτώ εκατοστιαίες μονάδες, σε σύγκριση με την απόδοση-βάση των κλασσικών συστημάτων.**



## Υβριδικοί Συνδυασμένοι Κύκλοι

Οι σημερινές αποδόσεις των υβριδικών κύκλων φτάνουν το 45.8% επί Κ.Θ.Δ. (ή 43.7% επί Α.Θ.Δ.) για εγκαταστάσεις με ατμό σε υποκρίσιμες συνθήκες και με καθαρισμό αερίων σε χαμηλή θερμοκρασία.

Εγκαταστάσεις που λειτουργούν με ατμό σε υπερκρίσιμες συνθήκες και με καθαρισμό αερίων σε υψηλή θερμοκρασία οι αποδόσεις φθάνουν το 48.8% επί Κ.Θ.Δ. (ή 46.5% επί Α.Θ.Δ.).

Βέβαια, οι υβριδικοί κύκλοι δεν έχουν φθάσει ακόμη σε πλήρη τεχνολογική ωριμότητα, πράγμα που συνεπάγεται κάποιες ανασφάλειες στην εφαρμογή τους.



## Μαγνητοϋδροδυναμικός Κύκλος (MHD)

Ο μαγνητοϋδροδυναμικός (MHD) καυστήρας και ο αντίστοιχος κύκλος έχουν αναγνωριστεί σαν μία μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με πολύ υψηλή θερμική απόδοση.

Έχουν προταθεί διάφορες λύσεις που περιλαμβάνουν **ανοιχτούς ή κλειστούς κύκλους**, με κοινό χαρακτηριστικό την μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική με την βοήθεια μιας μαγνητοϋδροδυναμικής διάταξης.

Στα συστήματα ανοιχτού κύκλου, ο άνθρακας καίγεται με προθερμασμένα αέρια ή οξυγόνο υπό πίεση μέχρι 10 atm. Ίχνη αλκαλίων προστίθενται στα καυσαέρια πριν εκτονωθούν διαμέσου του μαγνητοϋδροδυναμικού καναλιού για να αυξηθεί η αγωγιμότητά τους. Στους κλειστούς κύκλους χρησιμοποιούνται συνήθως υγρά μέταλλα ως ψυκτικά.



## Μαγνητοϋδροδυναμικός Κύκλος (MHD)

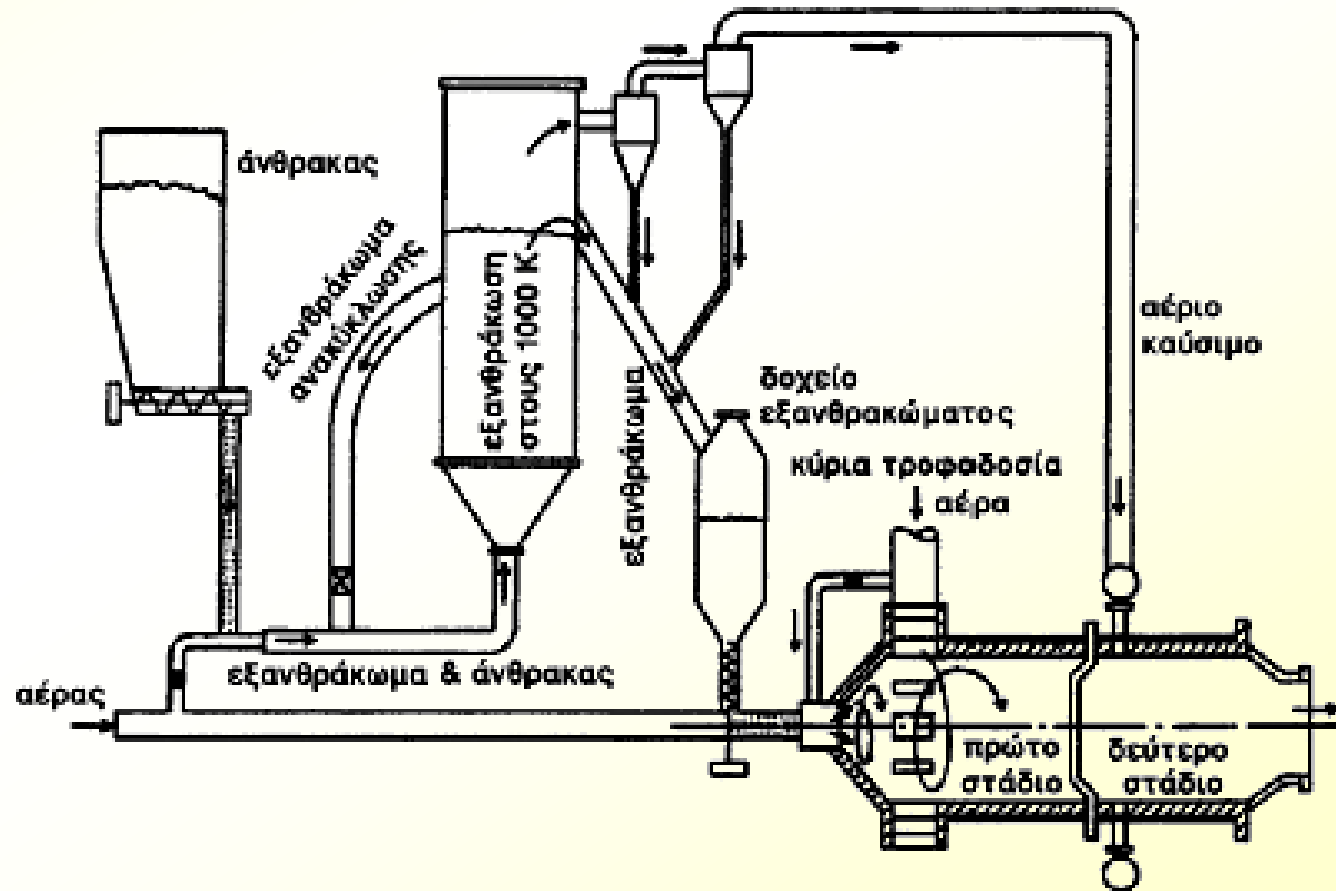
Ο ανοιχτός κύκλος απευθείας καύσης είναι ο πιο δημοφιλής. Η τυπική συμπεριφορά των καυστήρων αυτών μελετήθηκε στο University of Tennessee Space Institute χρησιμοποιώντας καυστήρα ενός σταδίου και πίεση λειτουργίας 4 atm. Το οξειδωτικό μέσο στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι καθαρό οξυγόνο.

Ο καυστήρας είναι υδρόψυκτος με ογκομετρικό ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας  $320 \text{ MW/m}^3$ . Στη διάταξη αυτή έχουν επιτευχθεί αγωγιμότητες πλάσματος της τάξης των  $10 \text{ mho/m}$ .



## Μαγνητούδροναμικός Κύκλος (MHD)

Μια διαφορετική προσέγγιση για την επίτευξη υψηλού βαθμού απόρριψης τέφρας είναι ο καυστήρας δύο σταδίων που προτάθηκε το 1974 από τον Way.



Καυστήρας 2 σταδίων της Westinghouse





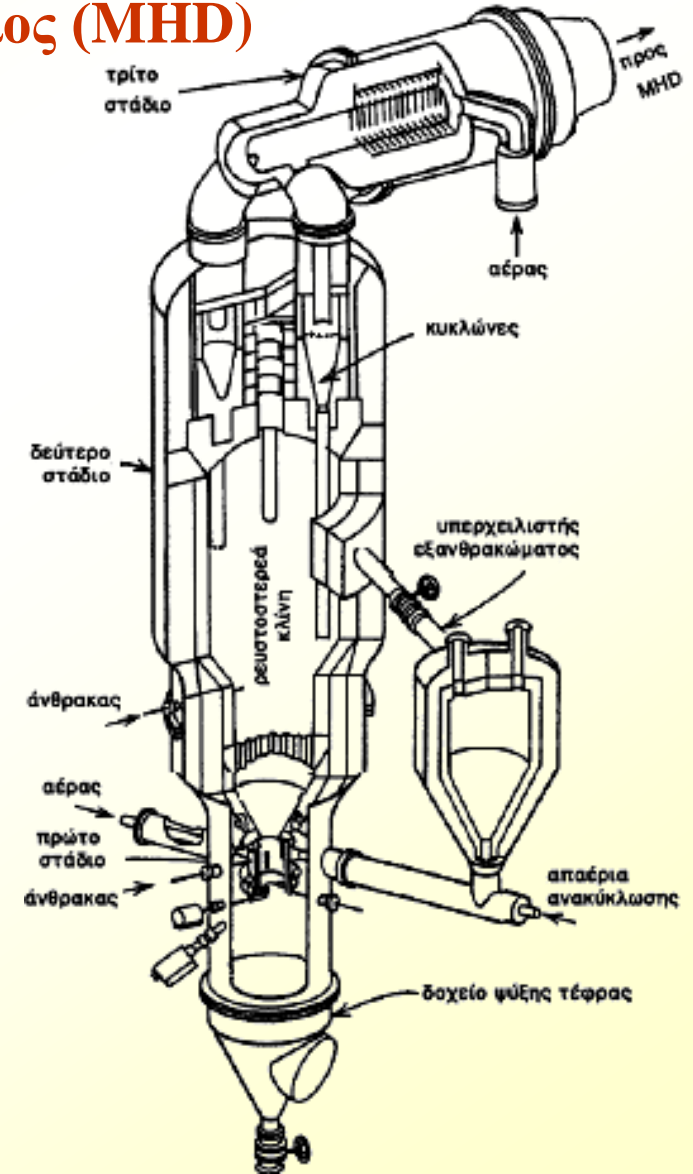
## Μαγνητοϋδροδυναμικός Κύκλος (MHD)

Το USBM κατασκεύασε ένα καυστήρα-εξαεριωτή τριών σταδίων με εισερχόμενη θερμότητα 5 MW, που λειτουργεί σε πίεση 8 atm.

Στο πρώτο στάδιο εξαερώνεται άνθρακας και ανακυκλούμενο εξανθράκωμα με αέρα και ανακυκλωμένα απαέρια στους 2000 K. Η τηγμένη τέφρα που σχηματίζεται, απορρίπτεται στον πυθμένα.

Το δεύτερο στάδιο είναι μία ρευστοστερεά κλίνη εξανθράκωματος που χρησιμοποιεί τα αέρια του πρώτου σταδίου σαν μέσο ρευστοποίησης και λειτουργεί στους 1400 K.

Στο 2ο στάδιο τροφοδοτείται άνθρακας που αποπτητικοποιείται. Τα απαέρια καθαρίζονται από τα σωματίδια σε κυκλώνες και το τελικό αέριο καίγεται στο τρίτο στάδιο παράγοντας το επιθυμητό πλάσμα.





## Μαγνητοϋδροδυναμικός Κύκλος (MHD)

Συγκρίνοντας τις παραπάνω διατάξεις παρατηρούνται τα εξής:

- ❑ **Οι διατάξεις ενός σταδίου** είναι απλές αλλά απορρίπτουν μικρό μέρος της τέφρας, γεγονός που καθιστά αδύνατη την ανάκτηση των ιχνών μετάλλου και ανεβάζει σημαντικά το λειτουργικό κόστος.
- ❑ **Οι καυστήρες πολλών σταδίων** διαχωρίζουν το μεγαλύτερο μέρος της τέφρας αλλά είναι πολύπλοκοι. Τα συστήματα αυτά εμφανίζουν κάποια προβλήματα υλικών αλλά επιτρέπουν την ανάκτηση και ανακύκλωση των ιχνών μετάλλου σε μεγάλο βαθμό.