



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΓΙΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΨΥΧΡΟΥ ΠΛΑΣΜΑ

Design and implementation of main elements for cold plasma
manufacturing processing device

Διπλωματική εργασία

Άγγελος Γαρύφαλλος

Αθήνα 2012

Στη μητέρα μου

Στην αδελφή μου

Ευχαριστίες

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά,

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή Γ. Βοσνιάκο της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και επιβλέποντα καθηγητή μου

Για την άρτια καθοδήγηση και ουσιαστική βοήθεια του όλο αυτό το διάστημα.

Για την υποστήριξη του, για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας στο πανεπιστημιακό ερευνητικό κέντρο Technopole Helioparc του Pau στη Γαλλία.

Για την συμπαράσταση του και για την υπομονή του στις προσωπικές μου δυσκολίες στο διάστημα από το τέλος της διπλωματικής μου έως σήμερα.

Τον υπεύθυνο μου στο ερευνητικό κέντρο του Pau στη Γαλλία, Διδάκτορα φυσικής Ε. Πανούση της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Για την καθοδήγηση και υποστήριξη του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου στη Γαλλία.

Για όλο το χρόνο που αφιέρωσε στην ανάλυση και επεξήγηση των φυσικών φαινομένων και τους μηχανισμούς δημιουργίας πλάσμα.

Για τις υποδείξεις και τη βοήθεια του όλο αυτό το διάστημα.

Τους φίλους και συναδέλφους Χρήστο και Γιώργο

Τους φίλους Μανώλη, Αλέξανδρο, Κώστα, Νίκο, Θοδωρή, Δημήτρη, Γιάννη, Γιώργο, Αντώνη, Βασιλική, Χριστίνα, Ιωάννα, Πηνελόπη

Όλους όσους ξέχασα..

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	5
Περιεχόμενα	7
Εισαγωγή	11
Κεφάλαιο 1	13
1 Θεωρία	15
1.1 Βασικές έννοιες	15
1.2 Πλάσμα	19
1.2.1 Ορισμός ιστορική αναδρομή	19
1.2.2 Ψυχρό πλάσμα εκτός ισορροπίας	20
1.2.3 Εκκενώσεις Διηλεκτρικού Φράγματος	21
Κεφάλαιο 2	23
2 Διάταξη για μελέτη ηλεκτροδίων	25
2.1 Ορισμός προβλήματος	25
2.2 Μελέτη διάταξης	27
2.2.1 Δοχείο	27
2.2.2 Ηλεκτρόδια	28
2.2.3 Τηλεσκοπικός μηχανισμός συγκράτησης ηλεκτροδίων	29
2.2.4 Πέρασμα υψηλής τάσης	30
2.2.5 Αισθητήρια πίεσης	31
2.2.6 Μηχανικός εξοπλισμός κενού	34
2.2.6.1 Μηχανική αντλία Varian	34
2.2.6.2 Διακοπτική βαλβίδα Varian	34
2.2.6.3 Μοριακή αντλία τούρμπο Alcatel	35
2.2.7 Είσοδος αερίου και πέρασμα γείωσης	38
2.2.8 Εμπρόσθια διόπτρα φασματοσκοπίας	39
2.2.9 Κάτω επιφάνεια του δοχείου	39
2.3 Αποσυναρμολόγηση - καθαρισμός	41
2.4 Συναρμολόγηση	43
2.5 Σύστημα ψύξης αντλίας τούρμπο	47
2.6 Δοκιμές και Αντιμετώπιση Προβλημάτων	49
2.6.1 Διαρροές	49

2.6.2	Απόπλυση	50
2.6.3	Εσφαλμένη ένδειξη πίεσης	50
2.6.4	Θέρμανση του αντιδραστήρα για αποβολή σωματιδίων.	51
2.6.5	Αντικατάσταση διόπτρας quartz	52
2.7	Σχεδιασμός.....	53
2.8	Συμπεράσματα.....	59
Κεφάλαιο 3		61
3	Μικρός αντιδραστήρας.....	63
3.1	Ορισμός προβλήματος.....	63
3.2	Περιορισμοί	65
3.3	Μοντελοποίηση	65
3.4	Ο αντιδραστήρας	67
3.5	Σχεδιασμός.....	69
3.5.1	Παροχή τάσης και αερίου	69
3.5.2	Ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.....	71
3.5.3	Ενδιάμεσο μονωτικό τμήμα	72
3.5.4	Ακροφύσιο	73
3.5.5	Κυρίως σώμα.....	74
3.6	Συναρμολόγηση	75
3.7	Συμπεράσματα.....	77
Κεφάλαιο 4		79
4	Εφαρμογή κατεργασίας Ξύλου	81
4.1	Εισαγωγή	81
4.2	Ορισμός προβλήματος.....	83
4.3	Αρχική προσέγγιση του προβλήματος	84
4.4	Συμπεράσματα.....	93
5	Γενικά συμπεράσματα	95
6	Βιβλιογραφία.....	99
Παραρτήματα		101
7	Παράρτημα Ι: Προσχέδια μικρού αντιδραστήρα 3 ^{ου} κεφαλαίου	101
7.1	Πρώτη έκδοση.....	101
7.2	Δεύτερη έκδοση.....	104

7.3	Τρίτη έκδοση	105
7.4	Τελική μορφή	106

Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις αποτελούν κομμάτι από ένα πλήθος φυσικών φαινομένων που παρατηρούνται στη καθημερινή μας ζωή. Οι περισσότερες διαδεδομένες εφαρμογές τους, είναι στους λαμπτήρες φθορισμού, στις λάμπες νέον και στις τηλεοράσεις πλάσματος, ενώ πληθώρα εφαρμογών αφορά κατεργασίες σε βιομηχανικό επίπεδο. Το πιο γνωστό και άμεσα αναγνωρίσιμο φαινόμενο ηλεκτρικής εκκένωσης είναι ο κεραυνός.

Η παρούσα εργασία εντάσσεται στα πλαίσια της μελέτης, σχεδιασμού και κατασκευής πειραματικών διατάξεων προκειμένου να διαπιστωθεί στο εργαστήριο αν η κατεργασία με πλάσμα είναι αποτελεσματική σε συγκεκριμένες εφαρμογές

Ολόκληρη η εργασία εκπονήθηκε στο κτήριο Iprem στο εργαστήριο ηλεκτρονικής αερίων και πλάσματος στο ερευνητικό κέντρο Technopole Helioparc στο Pau της Γαλλίας, μέσω του προγράμματος ERASMUS. Τα αποτελέσματα, η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή όσων περιγράφονται έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια παραμονής μου στη Γαλλία από τον Απρίλιο μέχρι και τον Ιούλιο του 2008.

Το σχεδιαστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των τρισδιάστατων μοντέλων και των μηχανολογικών σχεδίων ήταν το SolidWorks 2008 [1,2]

Επιβλέπων καθηγητής ήταν ο Αναπληρωτής καθηγητής Βοσνιάκος Γεώργιος – Χριστόφορος

Υπεύθυνος μου στη Γαλλία ήταν ο Δρ. Εμμανουήλ Πανούσης μηχανικός έρευνας του εργαστηρίου.

Στη διπλωματική εργασία μελετήθηκαν τρία προβλήματα κατεργασιών πλάσμα μια σύντομη περιγραφή των οποίων δίνεται παρακάτω:

- Κατασκευή διάταξης για μελέτη εκκένωσης σε αέρια, με ηλεκτρόδια διαφόρων γεωμετριών και υλικών, σε ελεγχόμενες συνθήκες.
- Κατασκευή αντιδραστήρα ψυχρού πλάσμα ατμοσφαιρικής πίεσης διαστάσεων μικρότερων των $(25 \times 25 \times 200)mm$ που θα μπορεί να λειτουργεί σε τάσεις μικρότερες ή ίσες των 6 kV, διατηρώντας παράλληλα τα χαρακτηριστικά του μεγαλύτερου πειραματικού αντιδραστήρα του εργαστηρίου.
- Κατασκευή πρότυπης διάταξης ανάμιξης του παραγόμενου πλάσματος με ατμούς χημικών διαλυμάτων για την κατεργασία επιφανειών ξύλου, με σκοπό την αντοχή

τους στην ανάπτυξη μυκήτων και δυνατότητα χρήσης της σε γραμμή παραγωγής βιομηχανίας κατασκευής παλετών.

Στο πρώτο κεφάλαιο ορίζονται οι βασικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση των μεγεθών και τη φυσικής που αφορούν το πλάσμα και την παράγωγη του.

Στο δεύτερο κεφαλαίο περιγράφεται αναλυτικά ο λόγος και η αναγκαιότητα κατασκευής διάταξης αντιδραστήρα μελέτης ηλεκτροδίων. Γίνεται επεξήγηση των επιμέρους τμημάτων του, ανάλυση της λειτουργίας του και αναφορά στα προβλήματα που πρόέκυψαν.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του λόγου και της αναγκαιότητας κατασκευής πρότυπου αντιδραστήρα μικρού μεγέθους καθώς και οι πιθανές εφαρμογές του. Αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του, η διαδικασία σχεδιασμού του και γίνεται περιγραφή των τμημάτων του.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται ο μηχανισμός που αναπτύχθηκε για την πειραματική μελέτη μιας υβριδικής κατεργασίας ψυχρού πλάσματος και χημικών ουσιών καθώς και οι εναλλακτικές μέθοδοι που εξετάστηκαν.

Κεφάλαιο 1

1 Θεωρία

Σε αυτό το κεφάλαιο ορίζονται οι βασικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση των μεγεθών και τη φυσικής που αφορούν το πλάσμα και την παράγωγη του. Τα παρακάτω εκτός και αν ορίζεται ξεχωριστά πηγάζουν από τις παραπομπές [3,4,5,6,7]

1.1 Βασικές έννοιες

Σαν άτομο ορίζεται η ελάχιστη ποσότητα ύλης, που διατηρεί τις χημικές και φυσικές ιδιότητες του στοιχείου. Ως μόριο ορίζεται η ελάχιστη ποσότητα μιας χημικής ένωσης που διατηρεί τις χημικές και φυσικές ιδιότητες της και αποτελείται από δυο ή περισσότερα άτομα.

Τα βασικά σωματίδια που συνθέτουν ένα άτομο είναι τα νετρόνια, τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια που έχουν αντίστοιχα, ουδέτερο, θετικό και αρνητικό φορτίο. Ως βασική ποσότητα φορτίου $1e$ (1.602×10^{-19} Coulomb) ορίζεται το ηλεκτρικό φορτίο ενός πρωτονίου ή ισοδύναμα το αντίθετο και ίσο φορτίο ενός ηλεκτρονίου $-1e$. Το άτομο όλων των γνωστών στοιχείων αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια στον πυρήνα του (εκτός από αυτόν του υδρογόνου που δεν έχει νετρόνια) και από τα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω του. Από πλευράς μεγέθους και μάζας πρώτα έρχεται το νετρόνιο (1.6749×10^{-27} kg), κατά λίγο μικρότερο του είναι τα πρωτόνια (1.6726×10^{-27} kg) ενώ το ηλεκτρόνιο (0.00091×10^{-27} kg) έχει πολύ μικρότερο μέγεθος με μάζα κατά 1838 φορές μικρότερη του πρωτονίου. Όταν ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια διαφύγουν από το άτομο, του προσδίδουν θετικό φορτίο αφού πλέον στο ισοζύγιο υπερτερούν τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια. Τα άτομα αυτά ονομάζονται ιόντα και η διαδικασία αποβολής των ηλεκτρονίων τους ιονισμό. Ιόντα ονομάζονται επίσης και τα μόρια ενώσεων που λόγω έλλειψης ηλεκτρονίων έχουν θετικό φορτίο.

Διαφορά δυναμικού μεταξύ δυο σημείων ονομάζεται η διαφορά του ηλεκτρικού φορτίου που οφείλεται στη έλλειψη (θετικό φορτίο) ή πλεόνασμα (αρνητικό φορτίο) ηλεκτρονίων. Ανάμεσα στα σημεία εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο που ορίζεται σαν τον χώρο όπου εάν τοποθετήσουμε ένα ηλεκτρόνιο αυτό θα κινηθεί υπό την επίδραση των ηλεκτρικών φορτίων.

Ως ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται η προσανατολισμένη μετακίνηση ηλεκτρονίων από ένα σημείο χαμηλού δυναμικού (πλεόνασμα ηλεκτρονίων) σε ένα σημείο με υψηλό δυναμικό (έλλειμμα ηλεκτρονίων). Κατά τη μετακίνηση τους γεννάται ένα μαγνητικό πεδίο και αντίστοιχα ρεύμα μπορεί να γεννηθεί από ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο κάτι που περιγράφεται μαθηματικά από τις εξισώσεις του Maxwell.

Τα στοιχεία από ηλεκτρικής πλευράς χωρίζονται κυρίως σε δυο μεγάλες κατηγορίες τους αγωγούς και τους μονωτές με δύο ομάδες ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους ημιαγωγούς και τους υπεραγωγούς να τις συμπληρώνουν. Για να είναι ένα σώμα καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος πρέπει να “άγει” πρέπει δηλαδή να επιτρέπει την διέλευση των ηλεκτρονίων. Για το λόγο αυτό κυρίως τα μέταλλα είναι καλοί αγωγοί αφού λόγω της φύσης του μεταλλικού δεσμού, τα ηλεκτρόνια μπορούν να μετακινούνται σχετικά εύκολα μέσα σε αυτά.

Κάθε υλικό έχει μια συγκεκριμένη αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα που είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων και το μέγεθος των μορίων του. Σε ατομικό επίπεδο στους αγωγούς, η ιδιότητα της αντίστασης οφείλεται στις συγκρούσεις που γίνονται κατά την κίνηση των ηλεκτρονίων με τα άτομα, ενώ στους μονωτές στην ανικανότητα (έως ορισμένου σημείου) του πεδίου να διεγείρει τα δεσμευμένα από τα άτομα ηλεκτρόνια.

Το διηλεκτρικό είναι ένα ηλεκτρικός μονωτής που έχει τη δυνατότητα να πολώνει τα άτομα του σε ένα εν δυνάμει ηλεκτρικό πεδίο. Σ’ αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρικά φορτία που το αποτελούν δεν το διαρρέουν, όπως σε έναν αγωγό, απλά προσανατολίζονται αποκλίνοντας ελαφρώς από τις θέσεις ισορροπίας τους, με αποτέλεσμα τη διηλεκτρική πόλωση. Λόγω αυτής, τα θετικά φορτία παρατάσσονται στην πλευρά του χαμηλού δυναμικού του πεδίου (αρνητικό φορτίο) ενώ τα αρνητικά στην πλευρά του υψηλού δυναμικού (θετικό φορτίο). Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία ενός αντίθετου εσωτερικού πεδίου που μειώνει τη συνολική επίδραση του εφαρμοζομένου πεδίου, στο εσωτερικό του διηλεκτρικού.

Ως μονωτής ορίζεται το υλικό που όταν βρεθεί μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο δεν ανταποκρίνεται σε αυτό, αντιθέτως αντιστέκεται ολοκληρωτικά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Στην πράξη τέλει μονωτές δεν υπάρχουν· οπότε όταν γίνεται αναφορά σε μονωτή ουσιαστικά εξετάζεται ένα διηλεκτρικό στοιχείο. Οποιοδήποτε μέσο αν βρεθεί μέσα στο κατάλληλο πεδίο (υψηλή τάση) θα επιτρέψει στο ρεύμα να το διαρρέυσει. Όταν αυξάνεται η τάση αυξάνονται και οι δυνάμεις που ασκούνται στα ηλεκτρόνια του στοιχείου. Κάποια στιγμή οι δυνάμεις αυτές γίνονται μεγαλύτερες από τις δυνάμεις συγκράτησης των ηλεκτρονίων στα άτομα του μέσου, με αποτέλεσμα την καταστροφή “διάσπαση” (breakdown) των δεσμών του υλικού και την εμφάνιση ηλεκτρικού ρεύματος. Η τάση στην οποία παρατηρείται η διάσπαση λέγεται και τάση διάσπασης (breakdown voltage). Η διαδικασία κατά την οποία διασπάται το διηλεκτρικό υπό την εφαρμογή τάσης λέγεται ηλεκτρική εκκένωση (electrical discharge), και το αγωγίμο μονοπάτι που δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο. Η ικανότητα δε του μέσου να αντισταθεί στη “διάσπαση” ονομάζεται διηλεκτρική αντοχή και μετριέται σε MV/m.

Στη φυσική, ως κενό ορίζεται η απόλυτη απουσία ύλης σε μια περιοχή του χώρου. Το τέλειο κενό (ή απόλυτο κενό) είναι μια εξιδανίκευση που φαίνεται πως δεν μπορεί να υπάρξει στην πραγματικότητα του δικού μας σύμπαντος, αλλά προσεγγίζεται μερικώς στο εξώτερο διάστημα. Οι φυσικοί χρησιμοποιούν τον όρο μερικό κενό για να περιγράψουν το ατελές κενό που παρατηρείται στον πραγματικό κόσμο. Μια πλήρης περιγραφή της ατελούς αυτής φυσικής κατάστασης θα απαιτούσε τον ορισμό περισσότερων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία καθώς στην ιδανικότερη παρατηρήσιμη κατάσταση κενού, αυτήν του διαστήματος, υπάρχουν πάντα μερικά άτομα υδρογόνου ανά κυβικό μέτρο.

Στη μηχανολογία, κενό χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε περιοχή εντός της οποίας η πίεση ενός αερίου είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η μονάδα μέτρησης στο SI για την πίεση είναι το Πασκάλ (Pascal σύντμηση Pa), αλλά στην πράξη το κενό μετريέται σε μονάδες torr (Τορρικέλι), που ισούται με 133,3223684 μονάδες Πασκάλ.

Διαβάθμιση του κενού	Περιοχή πιέσεων σε Torr
Χαμηλό κενό	760 έως 25
Μέσο κενό	25 έως 10^{-3}
Υψηλό κενό	10^{-3} έως 10^{-6}
Πολύ υψηλό κενό	10^{-6} έως 10^{-9}
Εξαιρετικά υψηλό κενό	10^{-9} ή λιγότερο

Πίνακας 1

Παραδείγματα:

Ατμοσφαιρική πίεση = 101.3 kPa (760 Torr)

Εσωτερικό ηλεκτρικής σκούπας = περίπου 80 kPa (600 Torr)

Μηχανική αντλία κενού = περίπου 100 Pa έως 100 μ Pa (1 Torr έως 10^{-6} Torr)

Εξώτερο διάστημα πλησίον της γης = περίπου 100 μ Pa (10^{-6} Torr)

Πίεση στην επιφάνεια της Σελήνης = περίπου 1 nPa (10^{-11} Torr)

Διαστρικό διάστημα = περίπου 1 fPa (10^{-17} Torr)

Για να επιτευχθεί πτώση πίεσης στο εσωτερικό ενός δοχείου χρησιμοποιούνται οι αντλίες κενού. Στο εσωτερικό της αντλίας, ένας μηχανισμός διαστέλλει μια μικρή σφραγισμένη κοιλότητα με σκοπό την ελάττωση της πίεσης (αφού μεταβάλει τον όγκο του). Στη συνέχεια, η έξοδος της κοιλότητας προς το δοχείο, φράσσεται και ανοίγεται η έξοδός της προς το περιβάλλον. Τέλος, η κοιλότητα συμπιέζεται και πάλι στο αρχικό της μέγεθος και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Μια μηχανική αντλία κενού εξάγει τον ίδιο όγκο αερίου σε κάθε κύκλο, αλλά καθώς η πίεση του θαλάμου πέφτει, ο όγκος αυτός περιέχει ολοένα και μικρότερο πλήθος

σωματιδίων. Έτσι, η ταχύτητα άντλησης, ελαττώνεται εκθετικά με την πίεση του δοχείου. Στο μεταξύ, τα ποσοστά διαρροής, εξάτμισης και εξαέρωσης παράγουν μια σταθερή ροή μάζας μέσα στο σύστημα. Όταν η ροή μάζας της αντλίας κατέβει στα ίδια επίπεδα με τις ροές μάζας στο θάλαμο, το σύστημα προσεγγίζει ασυμπτωτικά μια σταθερή πίεση που ονομάζεται πίεση βάσης (base pressure) που είναι το όριο λειτουργίας της συγκεκριμένης αντλίας. Όταν η πίεση πέσει κάτω από το 1 kPa περίπου, καθίσταται δυνατή μια άλλη τεχνική δημιουργίας κενού δι' αντλήσεως. Με βάση τους νόμους της μηχανικής των ρευστών, η ροή της ύλης είναι διαφορετική σε διαφορετικές πιέσεις. Σε ατμοσφαιρική πίεση και χαμηλό κενό, τα μόρια αντιδρούν μεταξύ τους και ωθούν τα γειτονικά τους μόρια, σε μια κίνηση που είναι γνωστή ως τυρβώδης ροή. Όταν η απόσταση μεταξύ των μορίων αυξάνει, τα μόρια έρχονται σε επαφή με τα τοιχώματα του θαλάμου συχνότερα από ότι με τα υπόλοιπα μόρια, και η μοριακή άντληση καθίσταται περισσότερο αποτελεσματική από την μηχανική. Αυτή η περιοχή ονομάζεται γενικά υψηλό κενό.

Ένας τύπος μοριακής αντλίας ονομάζεται τούρμπο ή τουρμπομοριακή αντλία, που χρησιμοποιεί βαθμωτά στάδια πτερυγίων μεγάλων ταχυτήτων. Για να είναι αποτελεσματική, η εκτόνωση της πρέπει να γίνεται μέσα στο χαμηλότερης διαβάθμισης κενό που δημιουργούν οι μηχανικές αντλίες. [8,9]

1.2 Πλάσμα

1.2.1 Ορισμός ιστορική αναδρομή

Πλάσμα στη φυσική αποκαλείται η τέταρτη κατάσταση της ύλης, εκτός, της στερεής, της υγρής και της αέριας, η οποία αποτελείται από ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για περισσότερα από διακόσια χρόνια, με σημαντικότερη πρόοδο τα τελευταία εκατό. Το πλάσμα κατέχει σχεδόν το 90% του σύμπαντος. Φαινόμενα όπως, οι ηλιακοί άνεμοι, το βόρειο σέλας και τα αστέρια είναι στην πραγματικότητα πλάσμα.

Ο όρος πλάσμα (Plasma) δόθηκε από τους Langmuir (Βραβείο Nobel 1932) και Tonks το 1928 και αφορά το ιονισμένο αέριο μιας ηλεκτρικής εκκένωσης. Οι Langmuir και Tonks μελετούσαν εκκενώσεις χαμηλής πίεσης σε ατμούς υδραργύρου [10,11]. Υπάρχει η άποψη πως λόγω του τρόπου με τον οποίο αυτό το «ηλεκτρισμένο αέριο» (Όρος που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε) μεταφέρει τα ουδέτερα και φορτισμένα σωματίδια, έδωσαν την ιδέα στους Langmuir και Tonks να το παραλληλίσουν με το πλάσμα του αίματος που μεταφέρει τα διάφορα σωματίδια του αίματος. Εναλλακτικά λέγεται ότι ο όρος προέρχεται από το ελληνικό ρήμα πλάθω. Οι δυο ερευνητές είχαν παρατηρήσει την τάση των φωτεινών παραγώγων της εκκένωσης, να θέλουν να καταλάβουν τον χώρο μέσα στον οποίο γεννήθηκαν και να πάρουν το σχήμα του [12,13]. Σε αυτή την περίπτωση η λέξη πλάσμα δηλώνει μια όλκιμη ελατή ουσία. Ο όρος αυτός, εμφανίστηκε πρώτη φορά στη βιβλιογραφία το 1928 [14] .

Πριν την εύρεση του όρου, οι εκκενώσεις αερίου πλάσμα είχαν ήδη μελετηθεί και εφαρμοστεί στην βιομηχανία. Ο Coulomb το 1785 ήταν ο πρώτος που απέδειξε ότι ο αέρας δεν είναι ένα τέλειο διηλεκτρικό. Η εξέλιξη της επιστήμης της φυσικής στη μελέτη των ηλεκτρικών εκκενώσεων σε αέρια, οφείλεται κυρίως στην έρευνα των κατά χρονολογική σειρά, Faraday, Hittorf, Crookes, Stiletto, Thompson Townsend, ενώ η πρώτη εφαρμογή αυτού του επιστημονικού πεδίου έγινε στο τέλος του 19^{ου} αιώνα και αφορούσε κυρίως εκκενώσεις τόξου στη μεταλλουργία. Το 1901 ο Marconi χρησιμοποίησε μια εκκένωση τόξου στην πρώτη ραδιομετάδοση μεταξύ Ευρώπης και Αμερικής [15].

Ο Siemens το 1857 ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε μια διάταξη για να παράγει όζον από τον αέρα. Χρησιμοποίησε ηλεκτρόδια που έφεραν επικάλυψη από γυαλί αντί των παραδοσιακών μεταλλικών, δημιουργώντας την πρώτη εκκένωση διηλεκτρικού φράγματος Dielectric Barrier Discharge (DBD). Το παραχθέν όζον (O_3) όντας μικροβιοκτόνο και βακτηριοκτόνο χρησιμοποιήθηκε για την αποστείρωση και μετατροπή του νερού σε πόσιμο, σε διάφορα αστικά κέντρα κατά τις αρχές του 20^{ου} αιώνα όπως τη Νίκαια (1907) και στο Παρίσι (1909) της Γαλλίας και τη Μαδρίτη της Ισπανίας (1910) [16].

Ενώ η παραγωγή του στη φύση γίνεται συνήθως κάτω από συνθήκες πολύ υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών, στο εργαστήριο ή στη βιομηχανία όπου και γίνονται κατεργασίες με πλάσμα η παραγωγή γίνεται εφαρμόζοντας ένα ηλεκτρικό πεδίο σε αέριο μέσο. Το πεδίο αυτό ιονίζει τα σωματίδια του αερίου.

Το πλάσμα είναι ηλεκτρικά αγώγιμο αφού τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του, μπορούν να κινηθούν προς την κατεύθυνση που τους επιβάλλει το ηλεκτρικό πεδίο, όπως γίνεται και στους αγωγούς ηλεκτρικού ρεύματος.

1.2.2 Ψυχρό πλάσμα εκτός ισορροπίας

Αναλογιζόμενος τους ορισμούς των Langmuir και Tonks κάποιος μπορεί να εκλάβει το πλάσμα σαν ένα “αέριο” που βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας και περιγράφεται από την καταστατική εξίσωση, όπου μόνο η πίεση και η θερμοκρασία του αρκούν για την μακροσκοπική περιγραφή του. Μια τέτοια προσέγγιση – περιγραφή θα ίσχυε μόνο σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, όπου όλα τα σωματίδια του μέσου έχουν την ίδια θερμοκρασία. Όμως, κάτι τέτοιο σπάνια συναντάται σε πλάσμα ηλεκτρικής εκκένωσης όπου σε απλή προσέγγιση κάθε ένα από τα ηλεκτρόνια, ιόντα και ουδέτερα σωματίδια του αερίου, περιγράφονται από την αντίστοιχη θερμοκρασία τους T_e , T_i , T_g . Γενικότερα ισχύει η:

$$T_e \gg T_i \geq T_g$$

Έτσι και ενώ η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων (T_e) είναι συνήθως της τάξης των eV's (10^4 K), τα υπόλοιπα σωματίδια (ιόντα και ουδέτερα) έχουν θερμοκρασίες λίγο πάνω από την περιβαλλοντική. [10,12].

1.2.3 Εκκενώσεις Διηλεκτρικού Φράγματος

Οι εκκενώσεις διηλεκτρικού φράγματος (Dielectric Barrier Discharges) ή εν συντομία DBD's, προτάθηκαν αρχικά από τον Siemens το δέκατο ένατο αιώνα και αποτελούν ακόμα πεδίο έρευνας. Έχουν μεγάλο φάσμα εφαρμογών από την παραγωγή όζοντος και τη βιολογική αποστείρωση έως τη μέτρηση της ροής στα ρευστά και την κατεργασία επιφανειών. Οι αντιδραστήρες DBD συνήθως αποτελούνται από δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια εκ των οποίων στο ένα ή και στα δύο έχει γίνει επίστρωση με κάποιο μονωτή. Συνήθως τα εφαρμοζόμενα μονωτικά υλικά είναι το πυρέξ, το κουάρτς, τα πολυμερή (π.χ. Τεφλόν PTFE) και τα κεραμικά (π.χ. Οξείδιο του αργιλίου ή αλουμίνα Al_2O_3). Στις περισσότερες των περιπτώσεων, εφαρμόζεται υψηλή τάση (HV) εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) που παρέχει ενέργεια στο αέριο διηλεκτρικό μέσο του διάκενου (αέρας, άζωτο, αργό κλπ), ώστε να γεννήσει το εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας ψυχρό πλάσμα. Γενικά μπορεί να ειπωθεί πως ένα σημαντικό μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται κατά τη διέγερση των ελεύθερων ηλεκτρονίων και την αποβολή κάποιων από τα άτομα ή μόρια του αερίου (ιονισμός), με αποτέλεσμα να παράγεται ένα ιδιαίτερα ενεργό μέσο. Το παράγωγο (afterglow) μιας συσκευής ψυχρού πλάσματος είναι το υπό συνεχή ροή εξερχόμενο ενεργοποιημένο αέριο από αυτή. Αποτελεί αντικείμενο μελέτης προς εναλλακτική προσέγγιση βιολογικών και ιατρικών προβλημάτων όπως η αποστείρωση, η απολύμανση, η αδρανοποίηση βακτηρίων και άλλων που κατηγοριοποιούνται στο νέο πεδίο της ιατρικής-πλάσμα (Plasma medicine).

Το βασικό πλεονέκτημα των DBD είναι ότι διευκολύνει την παραγωγή ψυχρού πλάσματος σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Όπως προαναφέρθηκε η θερμοκρασία των σωματίων του afterglow είναι διαφορετική σε μεγάλο βαθμό. Παρόλο, όμως, που τα ηλεκτρόνια έχουν θερμοκρασία της τάξης των μερικών χιλιάδων βαθμών, το afterglow είναι ανεκτό από το σώμα δίδοντας απλά την αίσθηση του χλιαρού.

Είναι γνωστό πως υπό αυτές τις συνθήκες, οι ηλεκτρικές εκκενώσεις ανάμεσα στα μεταλλικά ηλεκτρόδια είναι πιθανό να δημιουργήσουν τόξο όπου θα έχει σαν αποτέλεσμα την θέρμανση του πλάσματος. Το διηλεκτρικό δρα σαν περιοριστής του ρεύματος εκφόρτισης, αναστέλλοντας την μετάβαση σε τόξο.

Κεφάλαιο 2

2 Διάταξη για μελέτη ηλεκτροδίων

Σε αυτό το κεφαλαίο περιγράφεται αναλυτικά ο λόγος και η αναγκαιότητα κατασκευής διάταξης αντιδραστήρα μελέτης ηλεκτροδίων. Γίνεται επεξήγηση των επιμέρους τμημάτων του, ανάλυση της λειτουργίας του και αναφορά στα προβλήματα που πρόέκυψαν

2.1 Ορισμός προβλήματος

Σκοπός της συγκεκριμένης διάταξης ήταν η μελέτη διηλεκτρικών επιστρώσεων και ηλεκτροδίων σε μεταβλητές συνθήκες εκκένωσης. Σαν μεταβλητές ορίστηκαν το σχήμα και το διηλεκτρικό υλικό των ηλεκτροδίων, το διάκενο τους, το αέριο μέσο της εκκένωσης και η πίεση του. Επιπροσθέτως, έπρεπε να είναι δυνατή η μέτρηση της εκκένωσης με φασματογράφο. Χρειάζόταν, δηλαδή, να υπάρχει οπτική επαφή εξωτερικά της διάταξης με το διάκενο των ηλεκτροδίων.

Η ανάγκη πειραμάτων με διαφορετικά αέρια και δυνατότητα ρύθμισης των πιέσεων τους, επέβαλε τη χρήση στεγανοποιημένου δοχείου με την εκκένωση να λαμβάνει χώρα μέσα σε αυτό. Στη διαδικασία εύρεσης κατάλληλου δοχείου, το σχήμα και το υλικό, έπρεπε να επιλεγούν προσεκτικά ώστε να μην επηρεάζουν την εκκένωση. Από το εσωτερικό του έπρεπε να απέχουν γωνίες και εξοχές που θα αύξαναν τοπικά το ηλεκτρικό πεδίο και θα δημιουργούσαν μερικές εκφορτίσεις. Το υλικό ήταν αναγκαίο να αντέχει στη οξείδωση διότι τα παράγωγα της εκκένωσης κάποιες φορές, ανάλογα και με το αέριο μέσο, είναι οξυντικά. Έτσι η οξείδωση θα αλλοίωνε το εσωτερικό με σωμάτια που θα επηρέαζαν το αέριο μέσο και άρα τις συνθήκες δημιουργίας πλάσματος, καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων του φασματογράφου. Οι αποστάσεις των τοιχωμάτων από τα ηλεκτρόδια έπρεπε να είναι τέτοιες ώστε να μην συμβάλουν στη δημιουργία μερικής ή ολικής εκκένωσης σε οποιοδήποτε σημείο εκτός του ενδιαμέσου χώρου των ηλεκτροδίων, για τάσεις έως και 10kV.

Ακόμα αποφασίστηκε πως το δοχείο έπρεπε να φέρει εξωτερικά:

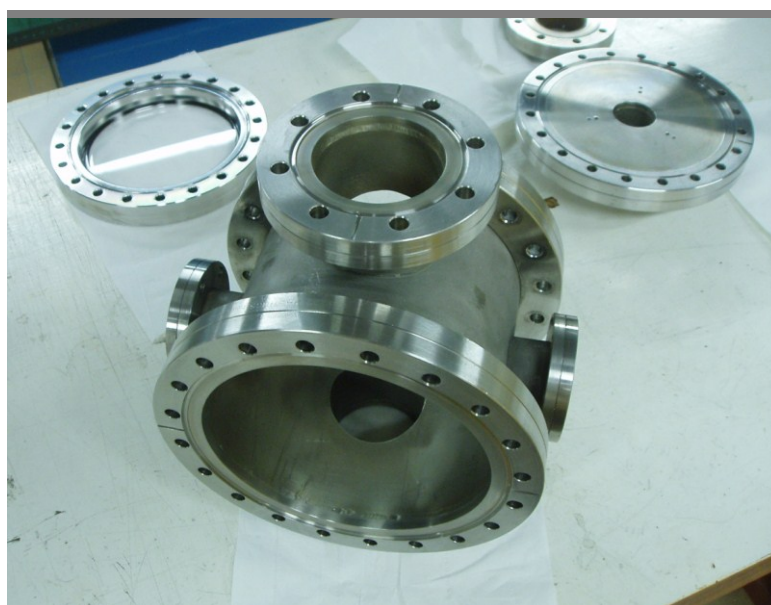
- βαλβίδα πλήρωσης για το αέριο,
- Ρυθμιστικό για το διάκενο,
- Διόδους για τους αγωγούς υψηλής τάσης και γείωσης,
- Παράθυρο κουάρτς για τη φασματοσκοπία,
- Μηχανισμό προσαρμογής και ευθυγράμμισης των οπτικών με τον χώρο δημιουργίας πλάσματος,

- Μετρητή εσωτερικής πίεσης,
- Βαλβίδες στα σημεία σύνδεσης των βοηθητικών συστημάτων της διάταξης, ώστε να είναι δυνατή η απομόνωση επιμέρους τμημάτων,
- Σύνδεση με αντλία κενού. Σκοπός της οποίας ήταν η απόπλυση του εσωτερικού του αντιδραστήρα, όπως επίσης και η ρύθμιση της πίεσης του σε χαμηλές τιμές.

2.2 Μελέτη διάταξης

2.2.1 Δοχείο

Για όλους τους παραπάνω λόγους, τα ηλεκτρόδια πρέπει να βρίσκονται σε πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον. Λόγω οικονομικών και χρονικών περιορισμών, επιλέχτηκε ένα δοχείο κενού που υπήρχε στο εργαστήριο (vacuum vessel). Το δοχείο ήταν κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ατσάλι 316L από την Αγγλική εταιρία Vacuum generators Ltd. Όλες οι διαστάσεις μετρήθηκαν προσεκτικά με όργανα ακριβείας, λόγω έλλειψης κατασκευαστικών σχεδίων, για να μπορούν να διαστασιολογηθούν σωστά τα νέα κομμάτια που θα τοποθετούνταν στο εσωτερικό του. Η επιλογή δοχείου ικανού για βαθύ κενό (vacuum vessel) κρίθηκε αναγκαία ώστε μέσω αυτού να είναι δυνατή η απόπλυση του εσωτερικού του.



Εικόνα 1

Δοχείο κενού της Vacuum generators Ltd.

Όπως είναι γνωστό ελαττώνοντας την πίεση σε ένα χώρο αφαιρούνται από αυτόν τα σωματίδια που αρχικά εμπεριείχε. Όσο βαθύτερο το κενό τόσο λιγότερα σωματίδια υπάρχουν σ' αυτόν. Άρα για να καθαρίσει ο χώρος από αέρια και σωματίδια μη θεμιτά στο περιβάλλον του πειράματος, θα ελαττωνόταν η πίεση στο εσωτερικό του δοχείου. Στη συνέχεια θα γινόταν επαναπλήρωση του με το επιθυμητό αέριο, έως η πίεση του λάβει τιμή περί της ατμοσφαιρικής. Αυτός ο κύκλος θα επαναλαμβανόταν έως ότου θεωρείτο πως το εσωτερικό του δοχείου αποτελείτο μόνο από το επιθυμητό αέριο.

Επιπλέον, μελετήθηκαν οι δυνατοί τρόποι σύνδεσης του κυρίως σώματος του αντιδραστήρα με την αντλία κενού, βαλβίδες μέτρησης και παροχής αερίου και του φασματογράφου. Στο εσωτερικό του έπρεπε να κατασκευαστεί και να τοποθετηθεί βάση για τα δυο ηλεκτρόδια. Η κατασκευή πρέπει να επιτρέπει την αυξομείωση του διακένου χωρίς να

επηρεάζεται η παραλληλία, η σχετική γωνία και η ομοκεντρότητα των ηλεκτροδίων. Τα δυο ηλεκτρόδια έπρεπε να τοποθετούνται σε τέτοιο σημείο ώστε εξωτερικά να είναι ορατός ο μεταξύ τους χώρος από την εμπρόσθια διόπτρα (για να είναι δυνατή η φασματοσκοπία της εκκένωσης). Ακόμα έπρεπε να φέρει αγωγίμη σύνδεση με τα ηλεκτρόδια και τους αγωγούς υψηλής τάσης, να είναι εύκολα τροποποιήσιμη ανάλογα με το μέγεθος και σχήμα των ηλεκτροδίων, να είναι όσο το δυνατόν απλούστερη στην κατασκευή της και να αντέχει σε θερμοκρασίες έως και 100°C

2.2.2 Ηλεκτρόδια

Το πρώτο σετ ηλεκτροδίων προς δοκιμή (εικ 2), είχε παραλληλόγραμμο σχήμα με διαστάσεις 10mm μήκος, 13mm πλάτος και 5mm ύψος. Το υλικό κατασκευής τους ήταν στελλίτης (Stellite) και η διαλεκτική επίστρωση ήταν από αλουμίνα (Οξείδιο του αργιλίου). Θα γινόταν μελέτη της εκκένωσης για δυο περιπτώσεις. Στη μια μόνο το ένα εκ των ηλεκτροδίων θα είχε επίστρωση, ενώ στην άλλη και τα δυο.



Εικόνα 2α
Ηλεκτρόδιο χωρίς επίστρωση.

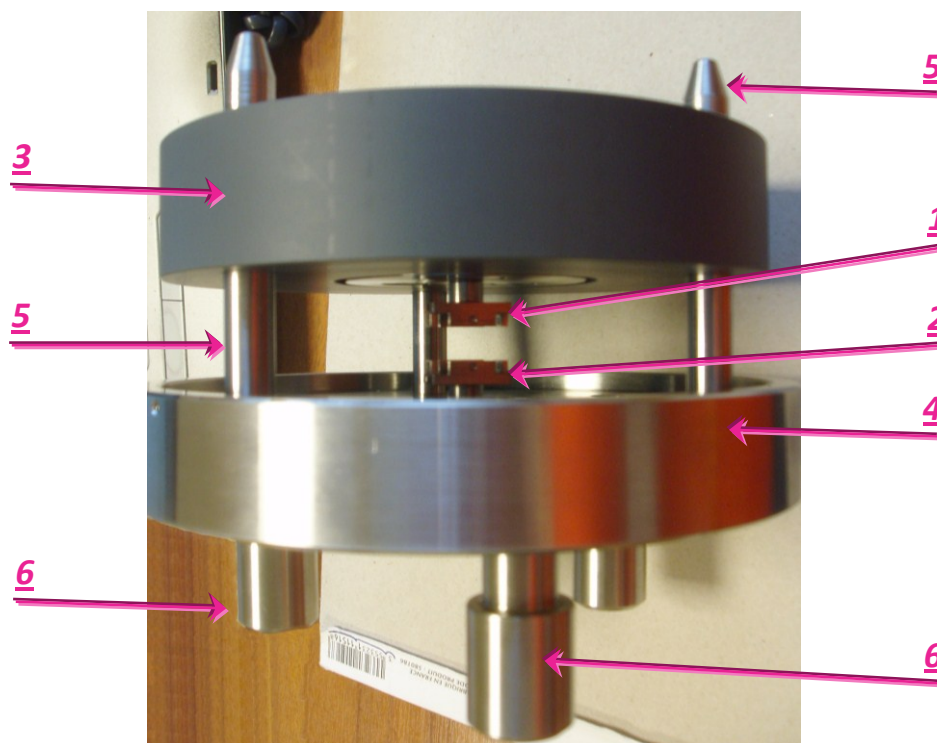


Εικόνα 2β
Ηλεκτρόδιο με επίστρωση.

Ο στελλίτης είναι πολύ σκληρός και για την κατεργασία του απαιτούνται ειδικά εργαλεία που το μηχανουργείο του κέντρου δεν διέθετε, οπότε η σταθεροποίηση του στο μηχανισμό έπρεπε να γίνει εξωτερικά. Ο μηχανισμός συγκράτησης έπρεπε να μπορεί να εναλλάσσεται ώστε να μπορούν να προσαρμοστούν ηλεκτρόδια διαφορετικού σχήματος.

2.2.3 Τηλεσκοπικός μηχανισμός συγκράτησης ηλεκτροδίων

Στην εικόνα 3 απεικονίζεται ο τελικός μηχανισμός που σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και τελικά τοποθετήθηκε εσωτερικά του δοχείου κενού.



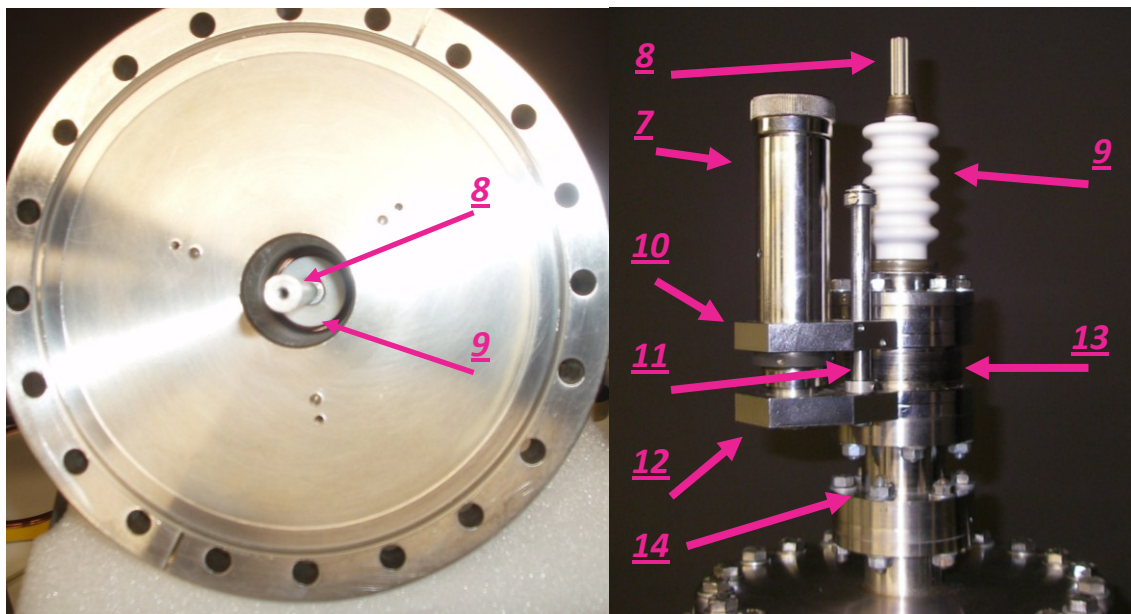
Εικόνα 3

Τελικός μηχανισμός για την μελέτη των ηλεκτροδίων.

Μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας του είναι η εξής: τα ηλεκτρόδια στερεώνονται στους κεντρικούς συγκρατητές υψηλής τάσης (1) και γης (2), οι οποίοι βρίσκονται στο κέντρο των κυλινδρικών βάσεων (3) και (4). Η βάση (3) είναι το κινητό μέρος του τηλεσκοπικού μηχανισμού, ενώ η (4) είναι το σταθερό. Η βάση (4) μαζί με τους τηλεσκοπικούς οδηγούς (5) και τα πρόσθετα ρύθμισης ύψους (6), είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο ατσάλι Inox 316L, ενώ η βάση (3) είναι μερικά κατασκευασμένη από PVC ώστε τα δυο ηλεκτρόδια να είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους. Οι τρεις κάθετοι οδηγοί (5) διαφέρουν κατά γωνία 120 μοιρών έχοντας διαστασιολόγηση και ανοχές ώστε να επιβάλλουν στο άνω τμήμα (3), κατά την μετακίνησή του, να διατηρεί την παραλληλότητα, την ομοαξονικότητα και τη σχετική του γωνία με το σταθερό τμήμα (4). Για τη μεταβολή του διάκενου ρυθμιζόμενου εξωτερικά, το άνω τμήμα (3) είναι συνδεδεμένο με ένα μικρομετρικό τηλεσκοπικό μηχανισμό, περιγραφή του οποίου ακολουθεί (εικ.4).

2.2.4 Πέρασμα υψηλής τάσης

Γενικότερα, στις διατάξεις κενού υπάρχουν περάσματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την ελεγχόμενη αγωγή επικοινωνία του εσωτερικού του αντιδραστήρα με το περιβάλλον. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους είναι ότι η κατασκευή τους επιτρέπει την διατήρησης της χαμηλής πίεσης στο εσωτερικό του δοχείου (κενό) κατά την είσοδο του αγωγού, μονώνοντας το ηλεκτρικά με το μεταλλικό κέλυφος. Στις εικόνες 4α και 4β φαίνεται ένα από τα περάσματα που υπήρχαν στο εργαστήριο.



Εικόνα 4α

Το κάτω μέρος του περάσματος δηλαδή αυτό που θα είναι στο εσωτερικό του δοχείου. Στο άκρο της ράβδου υψηλής τάσης (8), θα εφαρμοστεί ο συγκρατητής υψηλής τάσης (1-εικ.3). Ακόμα είναι ορατό πως η ράβδος εφάπτεται μόνο στο εσωτερικό της πορσελάνης (9).

Εικόνα 4β

Ο μικρομετρικός μηχανισμός (7) που φέρει το εξωτερικό άκρο της ράβδου υψηλής τάσης (8), Ηλεκτρική μόνωση από πορσελάνη (9) μεταξύ ράβδου και κινητής μεταλλικής πλάκας (10), Οδηγό για τις μεταλλικές πλάκες με κανόνα διαβάθμισης (11), σταθερή μεταλλική πλάκα (12), Σερπαντίνα στεγανοποίησης (13), Μετατροπέας σύνδεσης με δοχείο (14).

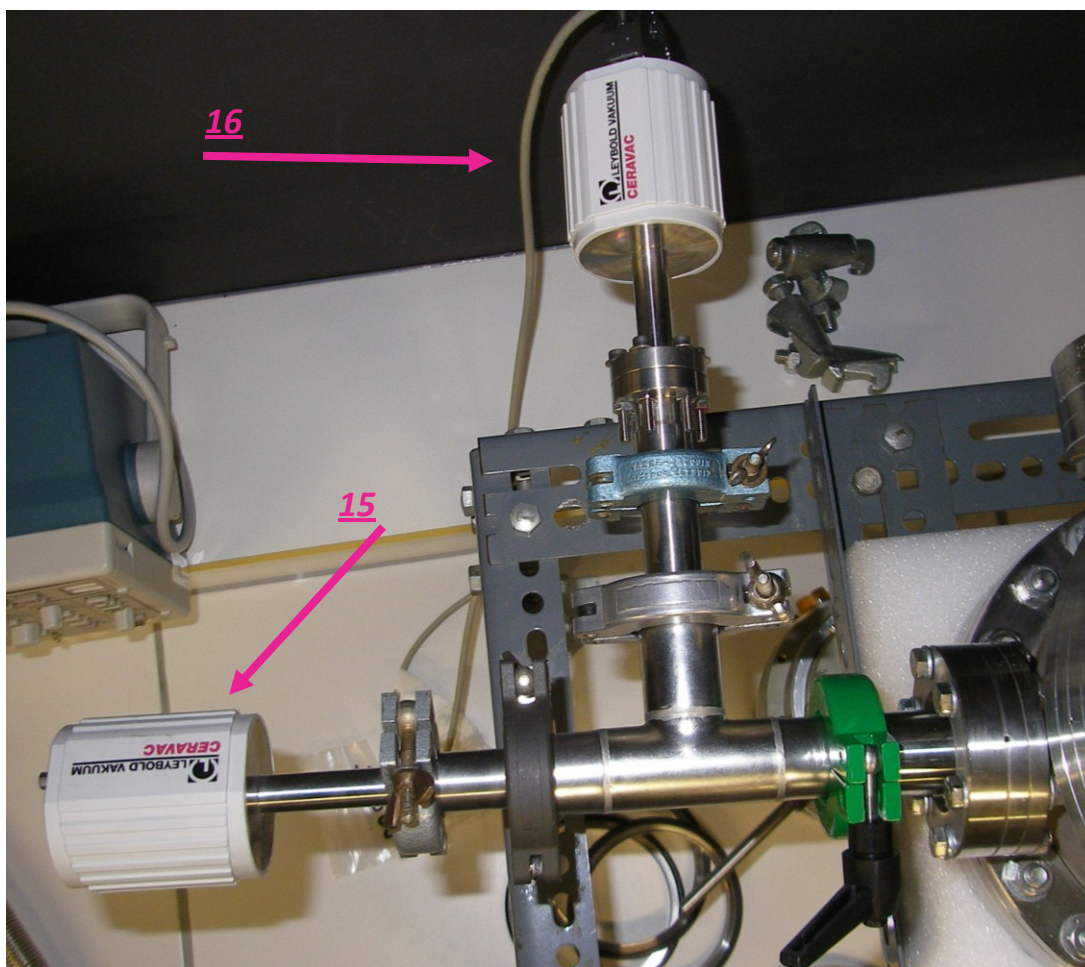
Αυτό ήταν και το τελικό που επιλέχθηκε διότι εξυπηρετούσε στον σκοπό της μεταβολής της απόστασης των ηλεκτροδίων. Η συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιεί για πέρασμα μια μεταλλική ράβδο (8), η οποία στηρίζεται σε ένα μικρομετρικό τηλεσκοπικό μηχανισμό (7) μέσω τμήματος πορσελάνης (9). Η πορσελάνη που εξυπηρετεί στην ηλεκτρική μόνωση της ράβδου με το κέλυφος του δοχείου και τη στεγανοποίηση του από το περιβάλλον, είναι προσκολλημένη στην κινητή μεταλλική πλάκα (10) του μηχανισμού. Ο μικρομετρικός μηχανισμός μεταβάλλει το μήκος του και άρα την απόσταση των δυο μεταλλικών πλακών (10) και (12) στις οποίες είναι προσδεμένος. Μεταξύ των δυο πλακών παρεμβάλλεται εύκαμπτος μεταλλικός σωλήνας ή

αλλιώς μεταλλική σερπαντίνα (13), η οποία και στεγανοποιεί το μεταβλητό σε μήκος τμήμα του τηλεσκοπικού μηχανισμού. Τέλος η κάτω σταθερή πλάκα (12), στερεώνεται στο άνω καπάκι του δοχείου μέσω των κατάλληλων προσαρμογών (14).

Περιγράφοντας την κινητικότητα της διάταξης, κατά την περιστροφή του μοχλού του μικρομετρικού (7), μεταβάλλεται το μήκος του. Στην συνέχεια συμπαρασύρει την πορσελάνη και άρα την ράβδο, στο κάτω μέρος της οποίας (6-εικ.3) προσαρμόζεται η κινητή βάση (3-εικ.3). Τελικά αυξομειώνοντας το μήκος του μικρομετρικού, αυξομειώνεται αντίστοιχα και το διάκενο των ηλεκτροδίων.

2.2.5 Αισθητήρια πίεσης

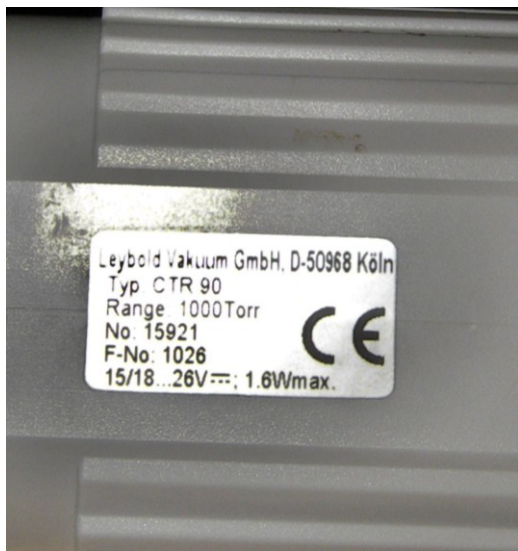
Για την μέτρηση της πίεσης στο εσωτερικό του δοχείου χρησιμοποιήθηκαν δυο μετρητές πίεσης με διαφορετικά εύρη. Αυτοί προσαρμόστηκαν στο αριστερό μέρος της διάταξης με έναν σύνδεσμο τύπου T



Εικόνα 5

Αισθητήρια πίεσης (15), (16) συναρμολογημένα στο δοχείο με τους κατάλληλους συνδέσμους.

Ο πρώτος μετρητής είναι κατασκευασμένος από την Leybold Vacuum GmbH, με μοντέλο 15921 CTR 90 DN16ISO-KF Ceravac βαθμονομημένος με 1000 torr και ικανότητα μέτρησης μέχρι υποπίεση 10^{-1} torr (15-εικ.5 και εικ.5β) . Ο δεύτερος, μεγαλύτερης ευαισθησίας, προσαρμόζεται για την παροχή πληροφοριών υψηλότερης ακρίβειας στις χαμηλότερες πιέσεις, βαθμονομείται με 1 torr και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι την υποπίεση του 10^{-4} torr. Όμοια είναι κατασκευασμένος από την Leybold Vacuum GmbH και αφορά το μοντέλο 15934 CTR 90 DN16CF-R Ceravac (16-εικ.5 και εικ.5γ).



Εικόνα 5β



Εικόνα 5γ

Χαρακτηριστικά των αισθητήρων πίεσης.

Ακολουθεί στην εικόνα 6 η ψηφιακή συσκευή απεικόνισης της τιμής της πίεσης στο εσωτερικό του δοχείου.



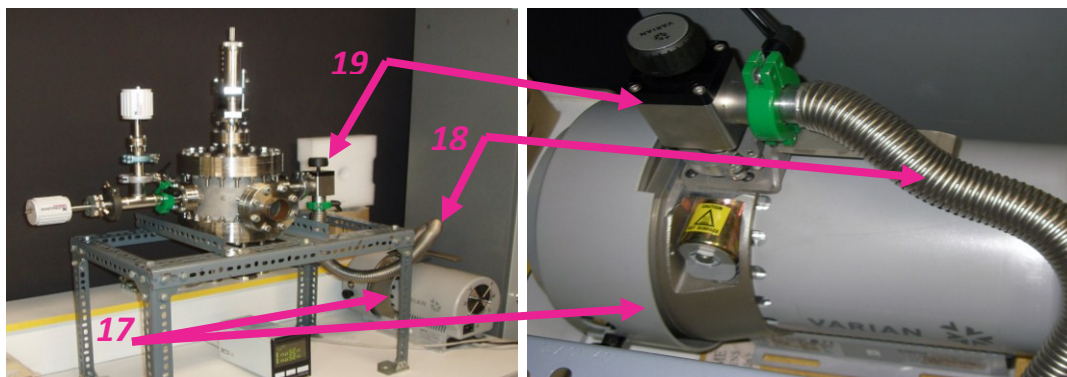
Εικόνα 6

Για την απεικόνιση των μετρήσεων οι δυο μετρητές πίεσης συνδέονται με ψηφιακή συσκευή της Leybold Vacuum GmbH, με τύπο Center Two 230004.

2.2.6 Μηχανικός εξοπλισμός κενού

2.2.6.1 Μηχανική αντλία Varian

Αρχικά για την απόπλυση του εσωτερικού χρησιμοποιήθηκε μια αντλία κενού Varian SH-110 (17). Αυτή τοποθετήθηκε στο δεξί τμήμα του δοχείου και η σύνδεση της έγινε με χρήση μεταλλικού ευκάμπτου σωλήνα (μεταλλική σερπαντίνα) (18).



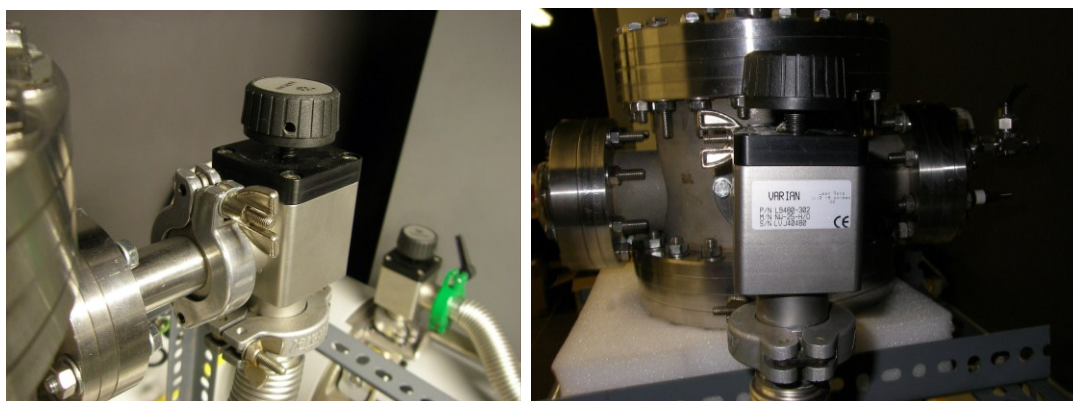
Εικόνα 7α

Εικόνα 7β

Μηχανική αντλία Varian SH-110 (17), ο εύκαμπος σωλήνας σύνδεσης της (18) και η βαλβίδα διακοπής Varian L9480-302 (19).

2.2.6.2 Διακοπτική βαλβίδα Varian

Πάντα στο σημείο συνένωσης του σωλήνα μεσολαβούσε διακοπτική βαλβίδα Varian L9480-302 (19). Η χρήση της κρίθηκε αναγκαία αφού σε περίπτωση διαρροής θα μπορούσαν να απομονωθούν επιμέρους τμήματα για τον έλεγχο ή και την αντικατάσταση εξαρτημάτων της διάταξης.



Εικόνα 8α

Εικόνα 8β

Διακοπτική βαλβίδα Varian L9480-302 καθώς και οι ταχυσύνδεσμοι σφικτήρες κενού.

2.2.6.3 Μοριακή αντλία τούρμπο Alcatel

Για την επίτευξη χαμηλότερων πιέσεων στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, άρα και καλύτερης απόπλυσης του, εξεταζόταν το ενδεχόμενο σύνδεσης μιας αντλίας τούρμπο στη διάταξη. Η αντλία προϋπήρχε στο εργαστήριο και ήταν αχρησιμοποίητη για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ήταν κατασκευασμένη από την Alcatel και είχε τύπο 5150CP (εικ.9), ενώ για την λειτουργία της χρησιμοποιούσε τον ελεγκτή Alcatel CFF 450 TURBO (εικ.10).



Εικόνα 9

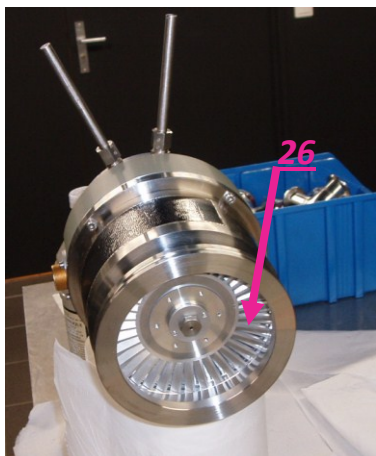
Αντλία τούρμπο Alcatel 5150CP, με τον ακροδέκτη συνδεσμολογίας (20) των καλωδίων ελέγχου με τον ελεγκτή.



Εικόνα 10

Ελεγκτής της αντλίας τούρμπο Alcatel CFF 450 TURBO, ο οποίος φέρει: λυχνίες για τη διαδικασία εκκίνησης (21) (πορτοκαλί: ταχύτητα περιστροφής μικρότερη των 27000rpm) λυχνίες για κανονική λειτουργία (πλήρης ταχύτητα περιστροφής) (21) (πράσινη: ταχύτητα περιστροφής 27000rpm). Πρόβλημα στην τροφοδοσία ή και υπερθέρμανση (22) (κόκκινη: θερμοκρασία αντλίας άνω των 55 βαθμών κελσίου). Διακόπτες για εκκίνηση (23) και παύση λειτουργίας (24) καθώς και μετρητή ωρών λειτουργίας (25)..

Αφού έγινε μελέτη των προδιαγραφών της αποφασίστηκε να τοποθετηθεί στη διάταξη σε επόμενο στάδιο, αφού εν τω μεταξύ έπρεπε να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί κατάλληλο εξάρτημα για τη στήριξη της, να γίνει έλεγχος σωστής λειτουργίας και να εξεταστεί και ο τρόπος ψύξης της. Όπως είναι λογικό με την εγκατάσταση της, θα αυξανόταν η πολυπλοκότητα του συστήματος. Οπότε αποφασίστηκε να εξεταστεί για διαρροές και τυχόν προβλήματα η υπόλοιπη διάταξη και όταν όλα λειτουργούσαν κανονικά να συνδεόταν και η τούρμπο στο κύκλωμα.



Εικόνα 11α

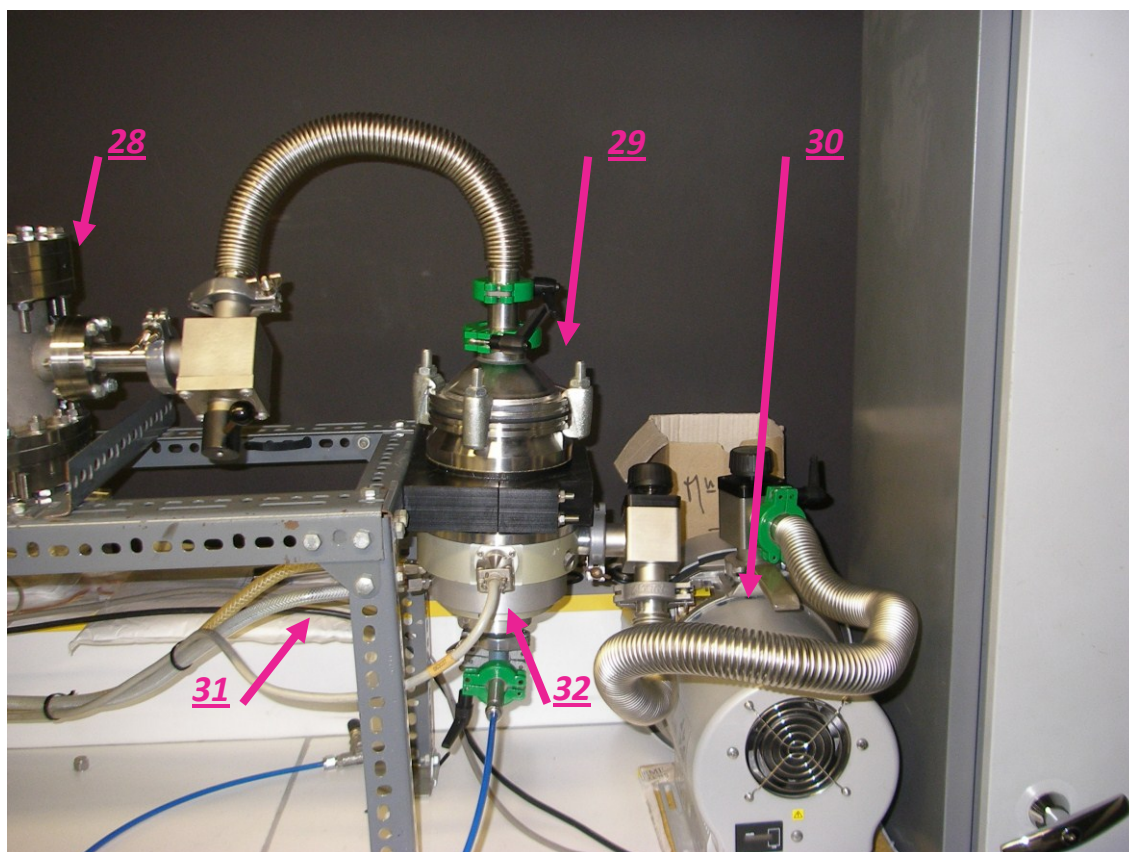
Πτερύγια της φτερωτής στη είσοδο της αντλίας (26). Αυτό το τμήμα θα συνδεθεί με το δοχείο κενού.



Εικόνα 11β

Έξοδος της αντλίας (27). Το σημείο αυτό δεν θα αφεθεί στο περιβάλλον αλλά θα συνδεθεί στη μηχανική αντλία Varian SH-110 (17-εικ.7) αφού στις προδιαγραφές της Alcatel ορίζεται πως στην έξοδο της πρέπει να έχει πίεση μικρότερη των $5 \times 10^{-1} \text{ mbar}$.

Στην εικόνα 12 που ακολουθεί φαίνεται η τελική διάταξη και με τις δύο αντλίες συνδεδεμένες. Η αντλία τούρμπο παρεμβάλλεται μεταξύ του δοχείου και της μηχανικής αντλίας. Πρώτα τίθεται σε λειτουργία η μηχανική αντλία Varian όπου και ελαττώνει την πίεση. Όταν η τιμή της ξεπεράσει τα $5 \times 10^{-1} \text{ mbar}$, ενεργοποιείται και η Alcatel. Θεωρητικά αν και η ευαισθησία του αισθητήρα δεν είναι ικανή να το επιβεβαιώσει, η πίεση μπορεί να αγγίζει τα 10^{-8} mbar . Ο αισθητήρας πίεσης εντοπίζει πιέσεις μέχρι και 10^{-5} mbar και η συσκευή απεικόνισης τον αναγνωρίζει. Αν η πίεση συνεχίσει να πέφτει κι άλλο, οι ενδείξεις δεν είναι ακριβείς αλλά η πτώση γίνεται αντιληπτή. Αυτό που συμβαίνει είναι πως όταν η τιμή ξεπεράσει τα 10^{-5} mbar εμφανίζεται στην οθόνη ένα αρνητικό πρόσημο που σηματοδοτεί ότι πλέον η ένδειξη είναι ανακριβής, και πλέον η τιμή αρχίζει να μετρά αντίστροφα (σαν η πίεση να αυξάνεται). Αν υποτεθεί δηλαδή ότι η πίεση είναι στα 10^{-6} mbar στην ένδειξη θα φαίνεται -10^{-4} mbar και αν είναι 10^{-7} mbar στην ένδειξη θα φαίνεται -10^{-3} mbar .

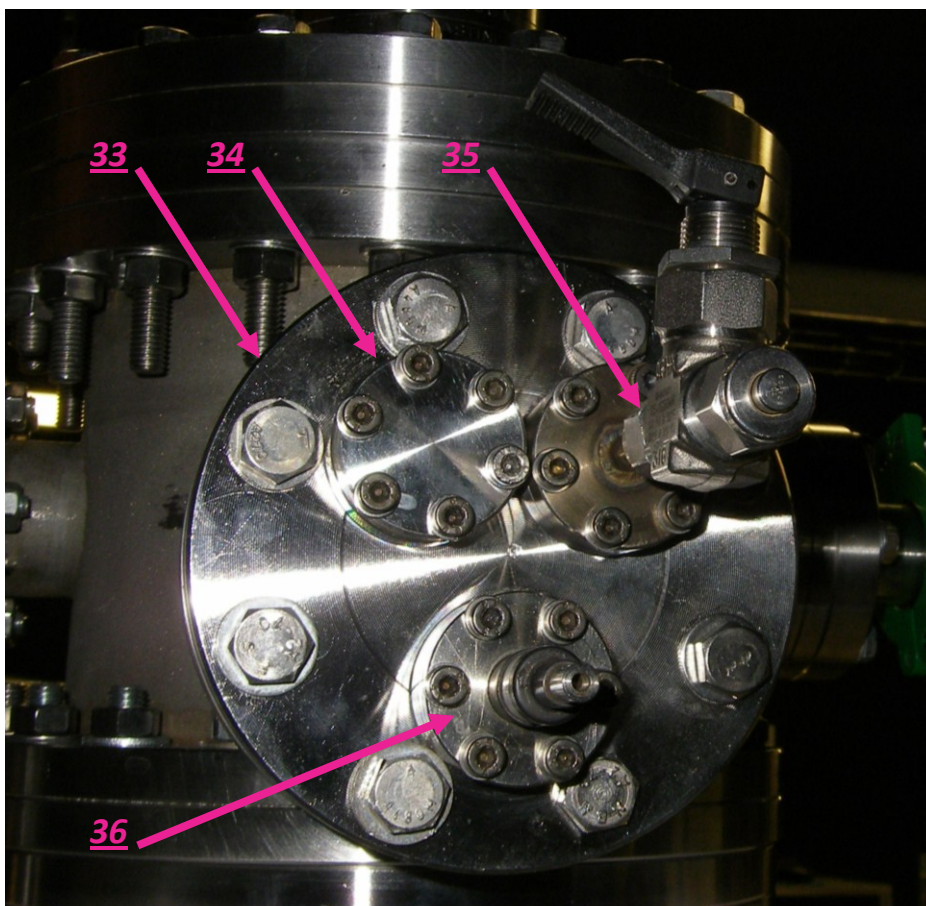


Εικόνα 12

Στα αριστερά είναι ο αντιδραστήρας (28), στο κέντρο η Alcatel (29) και στα δεξιά η Varian (30). Φαίνεται η συνδεσμολογία σε σειρά της Alcatel όπως και οι σωληνώσεις για την ψύξη (31) και το καλώδιο τροφοδοσίας της (32).

2.2.7 Είσοδος αερίου και πέρασμα γείωσης

Στο άνοιγμα που υπήρχε στο πίσω μέρος του δοχείου, συνδέθηκε προσαρμογέας με τρία μικρότερα ανοίγματα (εικ.13). Από αυτά χρησιμοποιήθηκαν τα δυο, ενώ το τρίτο άνοιγμα απομονώθηκε. Στο ένα συνδέθηκε βαλβίδα πλήρωσης για το επιθυμητό αέριο και στο άλλο, πέρασμα του καλωδίου της γείωσης.



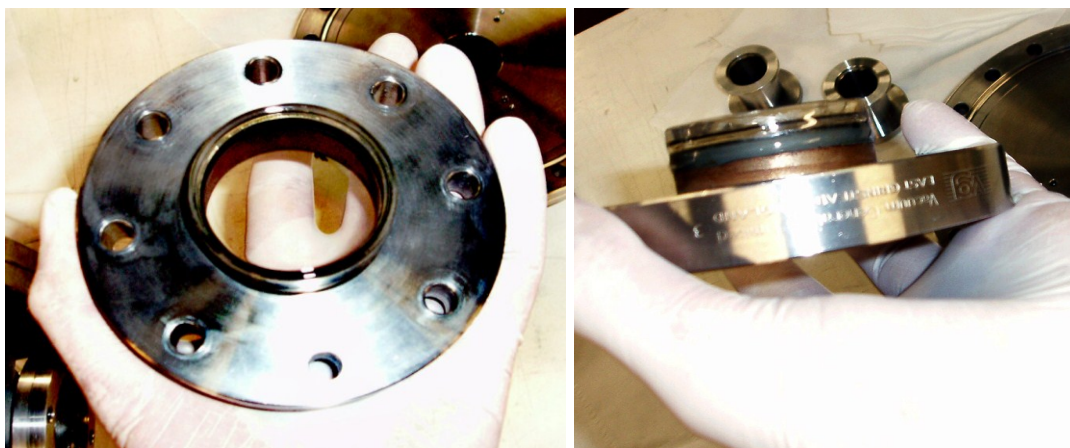
Εικόνα 13

Προσαρμογέας με τρία ανοίγματα (33), το απομονωμένο άνοιγμα (34), η βαλβίδα πλήρωσης με αέριο (35), και το πέρασμα αγωγού γείωσης (36).

Αν και ολόκληρος ο αντιδραστήρας ήταν γειωμένος επιλέχτηκε ξεχωριστό πέρασμα γείωσης μόνο για το ηλεκτρόδιο ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος από τυχόν μικροδιαρροές του κυρίως σώματος.

2.2.8 Εμπρόσθια διόπτρα φασματοσκοπίας

Το εμπρόσθιο άνοιγμα του δοχείου θα χρησιμοποιείται για φασματοσκοπικές μετρήσεις. Για το λόγο αυτό τοποθετήθηκε παράθυρο ώστε να είναι ορατή η εκκένωση με την οπτική ίνα του φασματογράφου. Η επιφάνεια του είναι κατασκευασμένη από κρύσταλλο quartz (εικ.14). Το υλικό αυτό είναι κατάλληλο για φασματοσκοπικές μετρήσεις υπεριώδους ακτινοβολίας, καθώς δεν κόβει φως με μήκη κύματος κάτω των 300nm.



Εικόνα 14

Παράθυρο με κρύσταλλο quartz.

2.2.9 Κάτω επιφάνεια του δοχείου.

Στο κάτω μέρος χρησιμοποιήθηκε το παράθυρο της εικόνας 15 για να είναι δυνατή η οπτική επαφή με το εσωτερικό του.



Εικόνα 15

Παράθυρο από βοριοπυριτικό (borosilicate) γυαλί. Το υλικό αυτό δεν είναι κατάλληλο για φασματοσκοπικές μετρήσεις αφού αποκόπτει μεγάλο φάσμα φωτός.

2.3 Αποσυναρμολόγηση - καθαρισμός

Όλα τα επιμέρους εξαρτήματα που προϋπήρχαν στο εργαστήριο και χρησιμοποιήθηκαν στη διάταξη έχριζαν εκτενούς καθαρισμού. Ήταν αναμενόμενο να φέρουν διαφόρων ειδών ρύπους αφού είχαν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε άλλες πειραματικές διατάξεις και έκτοτε τα περισσότερα ήταν αποθηκευμένα σε ράφια ή ντουλάπες χωρίς την κατάλληλη προστασία. Όλα τα εξαρτήματα αποσυναρμολογήθηκαν πλήρως και με συγκεκριμένες τεχνικές καθαρίστηκαν, ώστε να μην προκληθούν σε αυτά βλάβες. Πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που ο ανοξείδωτος χάλυβας 316L είναι υλικό ανθεκτικό στη διάβρωση, σε ένα εύρος ατμοσφαιρικών συνθηκών και διαβρωτικών μέσων, σε εκτεταμένη έκθεση του σε τέτοιες ουσίες, παρουσιάζει επιφανειακές διαβρώσεις που γίνονται συνήθως ορατές υπό τη μορφή καφέ χρώματος.

Πιο συγκεκριμένα, όλα τα επιπρόσθετα εξαρτήματα αφαιρέθηκαν από το κύριο σώμα, ενώ υπόκεινταν σε διεξοδικό έλεγχο για την ανεύρεση πιθανών διαβρώσεων ή ρωγμών. Εντοπίστηκαν αρκετά οξειδωμένα σημεία με πιθανότατο αίτιο το όζον που είναι προϊόν της διαδικασίας παραγωγής πλάσματος και εξαιρετικά τοξικό. Οι λοιποί ρύποι που εντοπίστηκαν πιθανότατα να οφείλονται σε εσφαλμένη αποθήκευση ή ελλιπή καθαρισμό-συντήρηση μετά το τέλος απερχόμενων πειραμάτων.

Αρχικά, όλα τα μέρη της κατασκευής πλύθηκαν για την απομάκρυνση κοινών ρύπων. Αφέθηκαν να στεγνώσουν και έπειτα καθαρίστηκαν με πανί που εμπεριείχε ασετόν. Η χρήση αιθανόλης που ακολούθησε είχε ως σκοπό αφενός την αδρανοποίηση της χημικά ενεργού ασετόνης και αφετέρου τη πλήρη αφαίρεση πιθανών υπολειμμάτων άλλων σωματιδίων. Εξαρτήματα που συνέχιζαν να έχουν οξειδώσεις, τοποθετήθηκαν σε ειδικό δοχείο και καθαρίστηκαν με νιτρικό οξύ, με ταυτόχρονη χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού προστασίας, λόγω της αυξημένης τοξικότητας του. Τα εξαρτήματα αφέθηκαν έως ότου δράσει το χημικό και μετά τρίφτηκαν με σπόγγο εμβαπτισμένο σε αυτό. Στη συνέχεια ξεπλύθηκαν με νερό, μετά με αιθανόλη και τελικά ψεκάστηκαν με άζωτο.

Μικρότερα εξαρτήματα όπως απολήξεις σωληνώσεων, βίδες, πείροι, παξιμάδια, ροδέλες και ο προσαρμογέας με τη βαλβίδα πλήρωσης, καθαρίστηκαν σε μηχάνημα πλύσης υπερήχων, χρησιμοποιώντας διάλυμα απιονισμένου νερού και αιθανόλης (εικ.16).



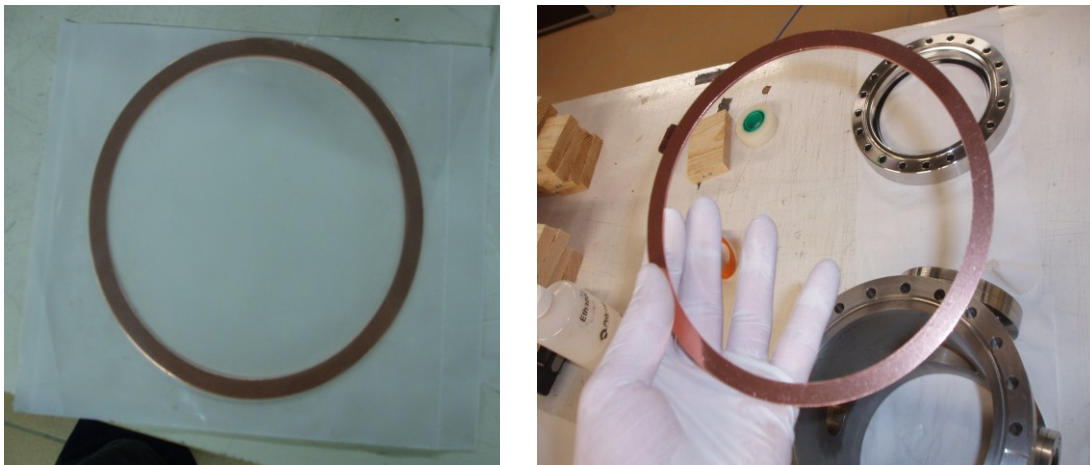
Εικόνα 16
Μηχάνημα πλύσης υπερήχων.

Η εμπρόσθια διόπτρα (εικ.14) από κρύσταλλο χαλαζία (quartz), καθαρίστηκε προσεχτικά στο χέρι προκειμένου να αποφευχθούν φθορές στη στεγανοποίηση της με το μεταλλικό της δακτύλιο.

2.4 Συναρμολόγηση

Όλα τα επιμέρους κομμάτια της διάταξης, προτού αρχίσει η συναρμολόγηση, καθαρίστηκαν από σκόνες και μικροσωματίδια με άζωτο υπό πίεση. Κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης γινόταν χρήση γαντιών latex ώστε να αποφευχθεί η επαφή με το λιπαντικό στοιχείο των χεριών.

Σε κάθε συναρμογή μεταξύ δύο μεταλλικών στοιχείων έπρεπε να γίνει στεγανοποίηση. Η κατασκευάστρια εταιρία του δοχείου χρησιμοποιούσε χάλκινους δακτυλίους.



Εικόνα 17

Χάλκινη φλάντζα στεγανοποίησης των τμημάτων του δοχείου κενού.

Κατά τη συναρμογή τοποθετούνται στις κατάλληλες αυλακώσεις των μεταλλικών κομματιών. Με τη σύσφιξη των περιμετρικών κοχλιών, οι δακτύλιοι συμπιέζονται οπότε και προκαλούν παραμόρφωση στο χαλκό. Παίρνει λοιπόν ακριβώς το σχήμα των μεταλλικών επιφανειών που έρχεται σε επαφή και τις στεγανοποιεί πλήρως. Έγινε επιλογή των κατάλληλου μεγέθους δακτυλίων για κάθε σύνδεση. Περάστηκαν τα κατάλληλα μπουλόνια και από μία ροδέλα σε κάθε πλευρά, πριν ακολουθήσουν τα παξιμάδια. Στα σημεία όπου το περιθώριο στην πλευρά του παξιμαδιού δεν ήταν αρκετό και κατά τη σύσφιξη τα μπουλόνια έρχονταν σε επαφή με το δοχείο, χρειάστηκε να τοποθετηθούν πάνω από μία ροδέλες στο εμπρόσθιο τμήμα του μπουλονιού ώστε να μην υπάρχει προστριβή του οπίσθιου μέρους του, με το περίβλημα. Προκειμένου να αποφευχθεί η στρέβλωση των επιφανειών, οι βίδες συσφίχτηκαν σύμφωνα με το σταυρωτό πρότυπο. Σε κάθε βήμα εφαρμοζόταν ελάχιστα αυξημένη ροπή της προηγούμενης σε αντικριστό μπουλόνι.

Για τη στεγανοποίηση των τμημάτων που δεν απαιτούσαν δακτυλίους χαλκού, χρησιμοποιήθηκαν ειδικά στεγνωτικά κενού (εικ.17α). Αυτά τοποθετήθηκαν στην ένωση των

εύκαμπτων σωλήνων των αντλιών, των διακοπτικών βαλβίδων και στα αισθητήρια πίεσης. Αποτελούνταν από μια μεταλλική βάση και από ένα o-ring που τα πλαισίωνε.

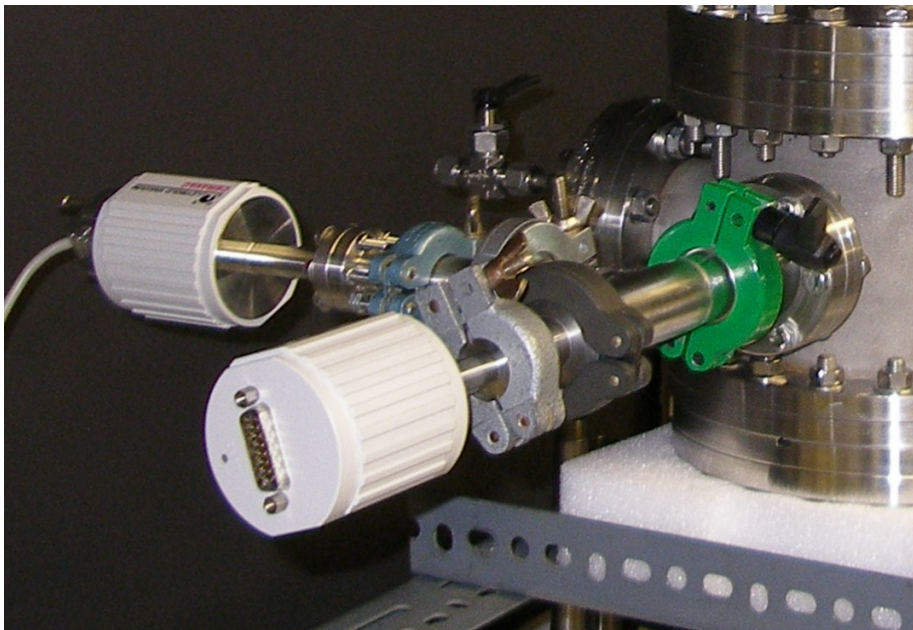


Εικόνα 17α
Στεγνωτικά κενού.



Εικόνα 17β
Απολήξεις για εφαρμογή στεγνωντικών κενού.

Τέλος σταθεροποιούνται με ειδικούς σφικτήρες όπως διακρίνεται στην εικόνα 17γ που ακολουθεί.



Εικόνα 17γ
Διακρίνονται οι σφικτήρες των συνδέσμων στεγνωντικών o-ring.

Η ακολουθία των τμημάτων που συναρμολογήθηκαν στο κύριο μέρος, είναι η εξής:

- 1) Κάτω διόπτρα 20 μπουλόνια M8 με 40 ροδέλες και 20 παξιμάδια
- 2) Άνω προσαρμογέας 20 μπουλόνια M8 με 40 ροδέλες και 20 παξιμάδια
- 3) Απολήξεις πλευρικών σωληνώσεων 6 μπουλόνια M6 με 12 ροδέλες και 6 παξιμάδια για κάθε απόληξη.
- 4) Εμπρόσθια διόπτρα 8 μπουλόνια M8 με 16 ροδέλες και 8 παξιμάδια
- 5) Οπίσθιος προσαρμογέας 8 μπουλόνια M8 με 16 ροδέλες και 8 παξιμάδια
- 6) Καλύπτρα ανοίγματος οπίσθιου προσαρμογέα 6 βίδες Allen Φ3 N3 και 6 ροδέλες
- 7) Πέρασμα γείωσης οπίσθιου προσαρμογέα 6 βίδες Allen Φ3 N3 και 6 ροδέλες
- 8) Βαλβίδα πλήρωσης οπισθίου προσαρμογέα 6 βίδες Allen Φ3 N3 και 6 ροδέλες
- 9) Προσαρμογέας άνω πώματος και τηλεσκοπικού ρυθμιστικού 6 μπουλόνια M6 με 12 ροδέλες και 6 παξιμάδια.
- 10) Τηλεσκοπικό ρυθμιστικό διακένου 6 μπουλόνια M6 με 12 ροδέλες και 6 παξιμάδια

Μετά τη συναρμολόγηση, ο αντιδραστήρας τοποθετήθηκε σε μία χαλύβδινη βάση τύπου DEXION. Στην συνέχεια, συναρμολογήθηκαν σε αυτόν οι αντλίες με τις βαλβίδες τους, οι αισθητήρες πίεσης, η βάση για τα οπτικά του φασματογράφου τα καλώδια τροφοδοσίας και το σύστημα ψύξης της τούρμπο.

2.5 Σύστημα ψύξης αντλίας τούρμπο

Η αντλία διαθέτει κεραμικά ρουλεμάν που λόγω των υψηλών ταχυτήτων περιστροφής της θερμαίνονται. Για αποφυγή φθορών που θα προκαλούσε η αύξηση της θερμοκρασίας, απαιτείται συνεχή ροή υγρού θερμοκρασίας δωματίου στο κύκλωμα που ενσωματώνει. Ο σύνηθες τρόπος ήταν η τροφοδοσία του με νερό βρύσης που κρινόταν επαρκής. Αυτό συνήθως γίνεται για εξοικονόμηση χρόνου, αλλά ένα κλειστού τύπου κύκλωμα ψύξης θα ήταν μία καλύτερη προσπάθεια διασφάλισης της ποιότητας του νερού για προστασία της αντλίας από διαβρώσεις και δημιουργία βακτηριακών πλακών και αλάτων στο εσωτερικό της. Επίσης δεν θα σπαταλούσε το νερό που μετά τη διέλευση του από την αντλία καταλήγει στην αποχέτευση. Το εργαστήριο διέθετε ανεξάρτητο κύκλωμα νερού από γεωθερμία που χρησίμευε στην ψύξη διατάξεων και συστημάτων του κέντρου. Η ποιότητα του νερού δεν ήταν κατάλληλη για την αντλία γιατί περιείχε ιζήματα που θα μπορούσαν να μπλοκάρουν η και να καταστρέψουν τους αγωγούς ψύξης της. Προτάθηκε λοιπόν η κατασκευή ενός απλού κλειστού κυκλώματος υγρού για την αντλία, που αφού θα δέσμευε τα παραγόμενα ποσά θερμότητας της, θα τα απέβαλλε στο κύκλωμα της γεωθερμίας, μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Για την κατασκευή της χρειάζονταν ένα δοχείο αποταμίευσης απιονισμένου νερού με βακτηριοκτόνα πρόσθετα, μια αντλία νερού, ένας εναλλάκτης θερμότητας υγρού-υγρού και οι απαραίτητες σωληνώσεις. Η θερμοκρασία λειτουργίας της αντλίας θα πρέπει να κρατείται κάτω από τους 30° C και η θερμοκρασία του νερού της γεωθερμίας (όπως πληροφορήθηκα από τεχνικό του εργαστηρίου) ήταν στους 15-20°C ανάλογα με την εποχή του χρόνου και το φορτίο.

Θα μπορούσε να γίνει μια απλή μελέτη για να υπολογιστούν τα μεγέθη του εναλλάκτη, της αντλίας, και του δοχείου αποταμίευσης, βάση της παραγόμενης θερμότητας της αντλίας, των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη και των υγρών, καθώς και της θερμοκρασίας λειτουργίας. Δυστυχώς λόγω έλλειψης χρόνου η διαδικασία κρίθηκε από τους ερευνητές δευτερεύουσας σημασίας και δεν προχώρησε.

2.6 Δοκιμές και Αντιμετώπιση Προβλημάτων

2.6.1 Διαρροές

Μόλις ολοκληρώθηκε η σύνδεση των τμημάτων της εγκατάστασης και έγινε διπλός έλεγχος σε όλες τις συνδέσεις και τα εξαρτήματα, η αντλία Varian τέθηκε σε λειτουργία. Σ' αυτή τη φάση ήταν συνδεδεμένος ο πρώτος -χαμηλότερης ευαισθησίας- αισθητήρας (1000 torr), μια διακοπτική βαλβίδα μεταξύ δοχείου και εύκαμπτου σωλήνα και μόνο η μηχανική αντλία. Παρατηρήθηκε ότι η πίεση έπεσε ραγδαία έως τα 8 mbar και ύστερα αυξανόταν έως ότου φτάσει τα 14 mbar όπου και επαναλαμβανόταν το ίδιο φαινόμενο. Οι προδιαγραφές της αντλίας δηλώνουν σαφώς ότι μπορεί να υποστηρίξει πιέσεις έως 10^{-2} mbar, οπότε ήταν εμφανές ότι κάπου υπήρχε διαρροή. Η αντλία σταμάτησε ώστε να επανελεγχτούν οι ενώσεις. Έπειτα, η διάταξη επανατέθηκε σε λειτουργία. Όταν η πίεση έφτασε στα 8 mbar, η διακοπτική βαλβίδα έκλεισε οπότε και διεκόπη η σύνδεση αντλίας δοχείου. Η πίεση εντός του αντιδραστήρα (δεδομένου ότι ο μετρητής είναι συνδεδεμένος στον αντιδραστήρα και άρα μετρά την πίεση στο εσωτερικό του), παρέμεινε σταθερή. Όταν η βαλβίδα άνοιξε, η πίεση ανέβηκε κατευθείαν στα 14 mbar.

Έγινε τότε σαφές ότι η διαρροή εντοπιζόταν στο κομμάτι από τη βαλβίδα του αντιδραστήρα έως και την αντλία. Η διακοπτική βαλβίδα ήταν σχεδόν καινούργια οπότε θεωρήθηκε λειτουργική και έτσι αντικαταστάθηκε η εύκαμπτη σύζευξη. Για την επίτευξη καλύτερου ελέγχου και την δυνατότητα απομόνωσης μόνο της αντλίας, τοποθετήθηκε και μία δεύτερη βαλβίδα τύπου Varian L9480-302 στην είσοδο της αντλίας.

Όταν η αντλία τέθηκε και πάλι σε λειτουργία παρατηρήθηκε το ίδιο πρόβλημα οπότε φθάνοντας την πίεση των 8 mbar, η βαλβίδα της αντλίας έκλεισε αφήνοντας στο κύκλωμα την βαλβίδα του δοχείου και τον εύκαμπτο σωλήνα. Η πίεση παρέμεινε σταθερή έως ότου άνοιξε ξανά η βαλβίδα της αντλίας και η πίεση αυξήθηκε και πάλι. Έγινε εναλλαγή της βαλβίδας που ήταν στο δοχείο (αφού στο προηγούμενο βήμα διαπιστώθηκε η σωστή λειτουργία της) με αυτή της αντλίας, προκειμένου να επιβεβαιωθεί εάν η νέα βαλβίδα που ήταν τοποθετημένη στην αντλία έχει διαρροή όταν ήταν ανοικτή. Στη δοκιμή που ακλούθησε εμφανίστηκε το ίδιο πρόβλημα οπότε συμπερασματικά η αιτία της βλάβης ήταν η αντλία. Η ερμηνεία του φαινομένου ήταν η εξής: αφού η πίεση πέφτει έως ένα σημείο και μετά εκτοξεύεται σε κάποια μεγαλύτερη, κάποιο στεγανωτικό υλικό δεν αντέχει, με αποτέλεσμα τη διαρροή και την εκ νέου αύξηση της πίεσης. Μόλις η πίεση ανέβει το στεγανωτικό λειτουργεί σωστά έως η πίεση να κατέβει πάλι και ούτω καθ' εξής. Αξίζει να σημειωθεί πως η αντλία είχε ελάχιστες ώρες λειτουργίας (98 ώρες).

Η αντλία αντικαταστάθηκε και τέθηκε σε λειτουργία. Η πίεση μειώθηκε γρήγορα και έφτασε στα 7×10^{-1} mbar. Όταν η πίεση έφθασε το 1 mbar ο αισθητήρας πίεσης με αυξημένη ακρίβεια (1torr) συνδέθηκε με την οθόνη. Η διάταξη έμεινε σε λειτουργία κατά τη διάρκεια της νύχτας. Το επόμενο πρωί η ένδειξη ήταν 10^{-4} mbar.

2.6.2 Απόπλυση

Ακολουθήθηκε η διαδικασία καθαρισμού. Μέσω της οπίσθιας βαλβίδας συνδέθηκε στη διάταξη φιάλη με αργό. Πριν τη εισροή του αερίου στον αντιδραστήρα, το κύκλωμα εξαερώθηκε ώστε να μηδενισθεί η ποσότητα του εναπομείναντα αέρα στις σωληνώσεις. Στην συνέχεια ξεκίνησε η πλήρωση του αντιδραστήρα με το αδρανές αέριο έως ότου η πίεση έφτασε στα 1000 mbar. Η αντλία αναρρόφησε πάλι το αέριο και αφέθηκε σε λειτουργία έως να φτάσει τα 5×10^{-2} mbar. Όλη η διαδικασία επαναλήφθηκε 3 φορές. Μετά από αυτό, το εσωτερικό του αντιδραστήρα μπορεί πλέον να θεωρηθεί ότι περιέχει ως επί το πλείστον αργό. Για την απομάκρυνση τυχόν υπολειμμάτων και εναποθέσεων στο εσωτερικό του (λόγο της χρόνιας αποθήκευσης του) η διάταξη αφέθηκε να λειτουργεί κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Την επόμενη ημέρα η ένδειξη της πίεσης στην οθόνη ήταν 0×10^{-5} mbar. Κάτι το οποίο, όπως προαναφέρθηκε, είναι αδύνατο να συμβεί αφού η αντλία δεν υποστηρίζει πιέσεις κάτω των 10^{-2} mbar.

2.6.3 Εσφαλμένη ένδειξη πίεσης

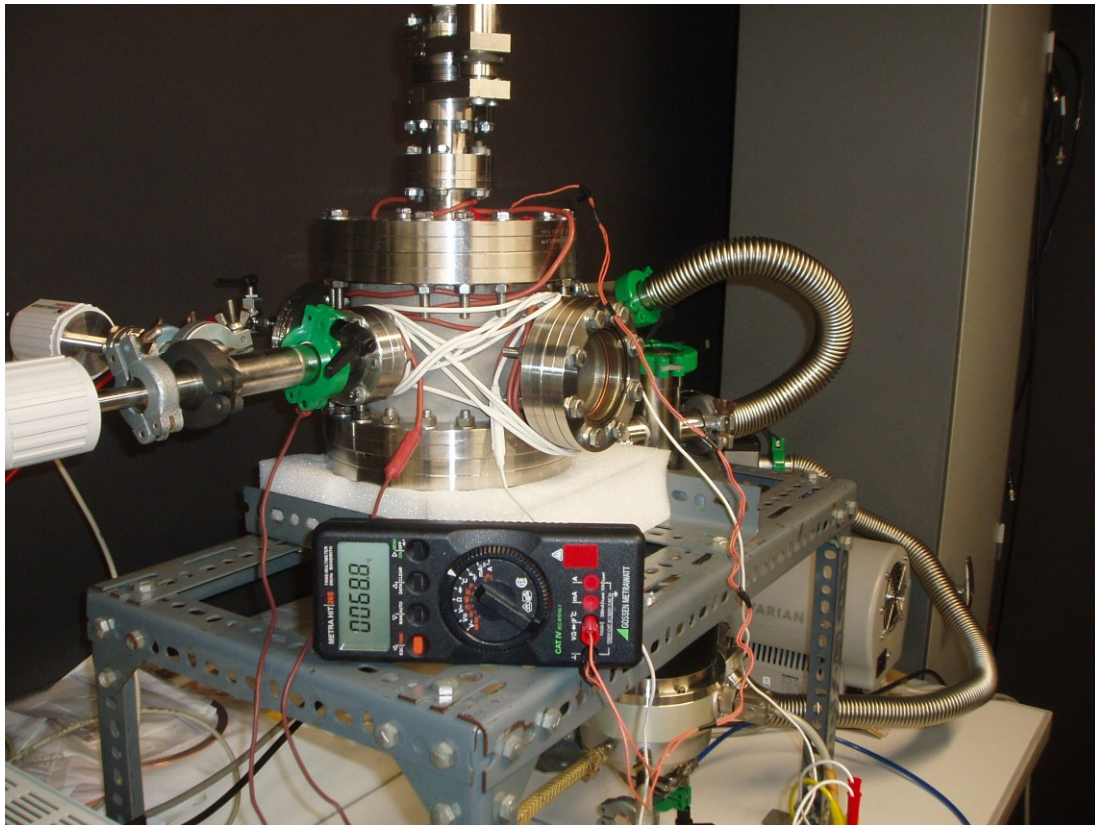
Έγινε μελέτη των χαρακτηριστικών του αισθητήρα πίεσης, και διαπιστώθηκε πως το σφάλμα οφείλεται σε λάθος τοποθέτηση του. Η λειτουργία του βασίζεται στη διαφορά πίεσης ανάμεσα στις δυο πλευρές του κεραμικού διαφράγματος που περιέχει. Στη μια πλευρά του εφαρμόζεται η πίεση προς μέτρηση ενώ η άλλη είναι απομονωμένη. Λόγο διαφοράς πίεσης μεταξύ της απομονωμένης και μετρήσιμης πλευράς, το διάφραγμα παραμορφώνεται μεταβάλλοντας έτσι την ηλεκτρική του αντίσταση. Εφόσον ο αισθητήρας ήταν τοποθετημένος κάθετα, στο διάφραγμα ασκείται και η βαρύτητα που το παραμορφώνει επίσης προς την μετρήσιμη πλευρά (έχει το ίδιο φαινομενικά αποτέλεσμα με το να υπήρχε χαμηλότερη πίεση στο εσωτερικό του δοχείου). Έτσι ο αισθητήρας μετρά εικονικά μικρότερη πίεση στο εσωτερικό της διάταξης και αυτό οφείλεται στο λάθος προσανατολισμό του.

Αποφασίστηκε λοιπόν, πως ο μετρητής θα έπρεπε να τοποθετηθεί οριζόντια. Ο αντιδραστήρας πληρώθηκε με αργό σε πίεση υψηλότερη από αυτή της ατμοσφαιρικής (1300 mbar), με σκοπό να αποφευχθεί η εισροή του αέρα λόγω της διαταραχής που θα προκαλούσε η αλλαγή προσανατολισμού του ταχυ-συνδέσμου. Είναι ευνόητο πως αν στο εσωτερικό υπήρχαν συνθήκες κενού, το στέλεχος θα ήταν αδύνατο να περιστραφεί αφού το ελαστικό στεγνωτικό

του θα ήταν συμπιεσμένο. Ξεβιδώθηκε ο ταχυσύνδεσμος, και εφαρμόζοντας μία ελαφρά οριζόντια δύναμη, στο άνω μέρος της σύνδεσης T, έγινε περιστροφή του μέχρι ο αισθητήρας να έρθει σε πλήρη οριζόντια θέση (χρησιμοποιώντας υδροστάθμη). Η μετατόπιση έγινε ομαλά και ο σφικτήρας ασφαλίστηκε. Παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά στις ενδείξεις που πλέον ήταν σε λογικά επίπεδα (αφού ήταν στα πλαίσια που έθετε η μηχανική αντλία). Μετά από κάποιες μέρες, η πίεση έπεσε στα 9.85×10^{-3} mbar. Θεωρήθηκε πως ο λόγος που η πίεση έπεσε κάτω από την ονομαστική τιμή της αντλίας, μπορεί να οφείλεται σε εσφαλμένη βαθμονόμηση του αισθητήρα. Επίσης μπορεί η αντλία να είχε κατασκευαστικές μικροδιαφορές που την έκαναν να αποδίδει λίγο καλύτερα. Έτσι κι αλλιώς ο κατασκευαστής εγγυάται πως θα μπορεί να φτάνει τουλάχιστον μέχρι 0×10^{-2} mbar οπότε το αν μια αντλία είναι ικανή για λίγο καλύτερα αποτελέσματα αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί σφάλμα. Είναι ακόμα πιθανό το αίτιο να είναι στο αργό αφού η ικανότητα άντλησης είναι συνδεδεμένη με το μέγεθος των ατόμων κάτι που είναι ιδιαίτερα αντιληπτό σε χαμηλότερες πιέσεις όπου και οι κατασκευαστές αντλιών ορίζουν διαφορετικές τιμές ελάχιστης πίεσης για άζωτο και για διοξείδιο του άνθρακα.

2.6.4 Θέρμανση του αντιδραστήρα για αποβολή σωματιδίων.

Ένα τέχνασμα που βοήθησε στην αποβολή των επικαθίσεων από το εσωτερικό του αντιδραστήρα ήταν η θέρμανση του. Χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικά θερμαντικά νήματα τα οποία τυλίχθηκαν γύρω του και ανέβασαν τη θερμοκρασία του στους 68°C . Καθ' όλη τη διαδικασία και ενώ οι μηχανική αντλία Varian ήταν σε λειτουργία, παρατηρήθηκαν αυξομειώσεις της πίεσης. Η θέρμανση του αντιδραστήρα προκάλεσε τη διαστολή του με αποτέλεσμα όλοι οι πόροι, και οι τραχύτητες στην επιφάνεια του να μεγαλώσουν. Έτσι τα ξένα σωματίδια που συγκρατούταν εκεί σε συνδυασμό με τη χαμηλή πίεση μπόρεσαν να αποκολληθούν.



Εικόνα 18

Ο αντιδραστήρας τυλιγμένος με τα θερμαντικά νήματα. Τη μέτρηση της θερμοκρασίας του, αναλαμβάνει το πολύμετρο που δείχνει 68,8° C.

2.6.5 Αντικατάσταση διόπτρας quartz

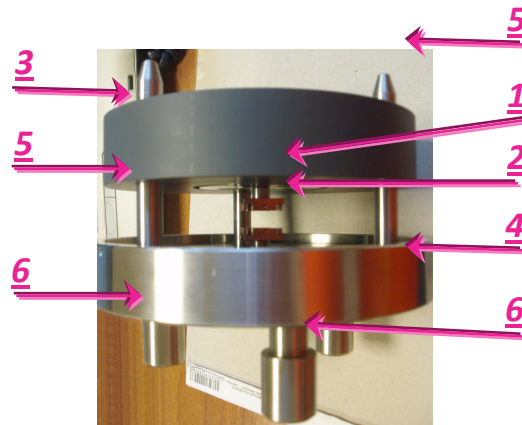
Το δοχείο έπρεπε να ανοιχτεί για να συναρμολογηθεί στο εσωτερικό του ο μηχανισμός συγκράτησης. Με την αντλία σε λειτουργία τα μπουλόνια του άνω τμήματος χαλαρώθηκαν. Λόγω της διαφοράς πίεσης ανάμεσα στις εσωτερικές και εξωτερικές πλευρές των τμημάτων του δοχείου, ασκείται πάνω τους δύναμη που τα συμπιέζει προς το κυρίως σώμα του. Η δύναμη που ασκείται εξωτερικά εξομαλύνει μέρος της δύναμης που ασκείται σε κάθε τμήμα από τον παραμορφωμένο χάλκινο δακτύλιο στεγανοποίησης. Εάν η πίεση στο εσωτερικό εξισωνόταν, η δύναμη αυτή θα μεταφερόταν στα μπουλόνια που θα αντιστέκονταν περισσότερο κατά τη διαδικασία χαλάρωσης.

Στη συνέχεια η λειτουργία της αντλίας διεκόπη η βαλβίδα πλήρωσης άνοιξε και αέρας εισήχθη στο εσωτερικό του δοχείου εξισώνοντας την πίεση με την ατμοσφαιρική. Τα είκοσι μπουλόνια αποσυναρμολογήθηκαν και το πώμα αφαιρέθηκε. Το πρώτο πράγμα που παρατηρήθηκε ήταν μια έντονη οσμή λαδιού και σκουριάς. Αποφασίστηκε να αλλαχτεί η διόπτρα από quartz αφού ο δακτύλιος στερέωσης του κρύσταλλου στο πλαίσιο του, ήταν εμφανώς οξειδωμένος.

Κατά τη συναρμολόγηση έγινε αντικατάσταση των στεγνωντικών δακτυλίων χαλκού στα τμήματα που αποσυναρμολογήθηκαν.

2.7 Σχεδιασμός

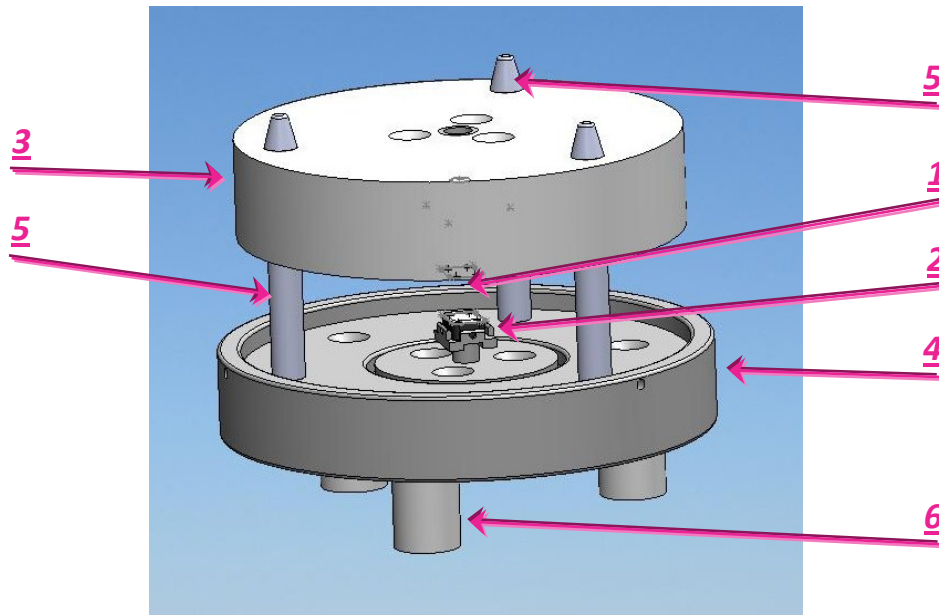
Ακολουθεί η ανάλυση των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής, όπως αποτυπώθηκαν στην εικόνα 3,



Εικόνα 3

Τελικός μηχανισμός για την μελέτη των ηλεκτροδίων.

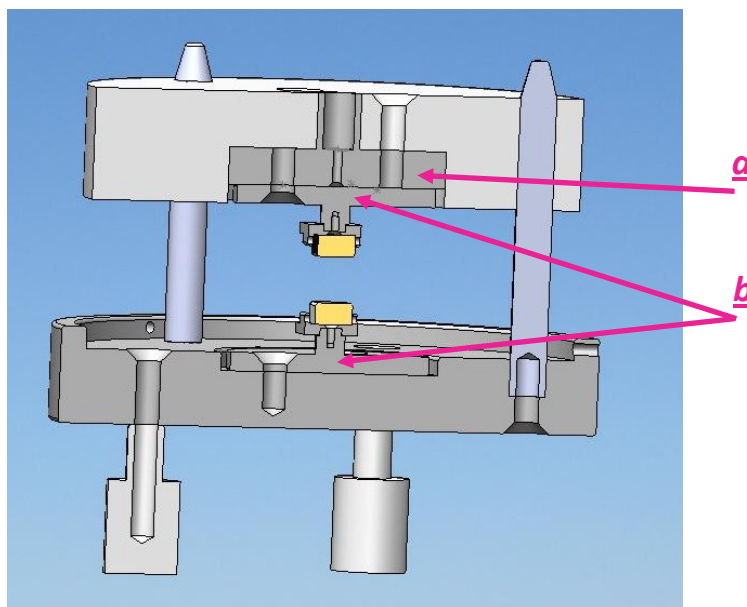
Στην εικόνα 19 παριστάνεται γραφικά το μοντέλο πλήρως συναρμολογημένο. Τα επιμέρους τμήματα είναι αριθμημένα όμοια με την εικόνα 3.



Εικόνα 19

Μηχανισμός συγκράτησης των ηλεκτροδίων, με τους κεντρικούς συγκρατητές ηλεκτροδίων (1) και (2), την κυλινδρική κινητή βάση (3), την κυλινδρική σταθερή βάση (4) τους τηλεσκοπικούς οδηγούς (5) και τις πρόσθετες βάσεις ρύθμισης ύψους του σταθερού τμήματος (6).

Ακολουθεί τομή του μηχανισμού συγκράτησης στην οποία φαίνονται τα υπόλοιπα κομμάτια και η συναρμογή τους (εικ.20).



Εικόνα 20
Κομμάτια “panw Insert” (a) και “insert adaptor” (b).

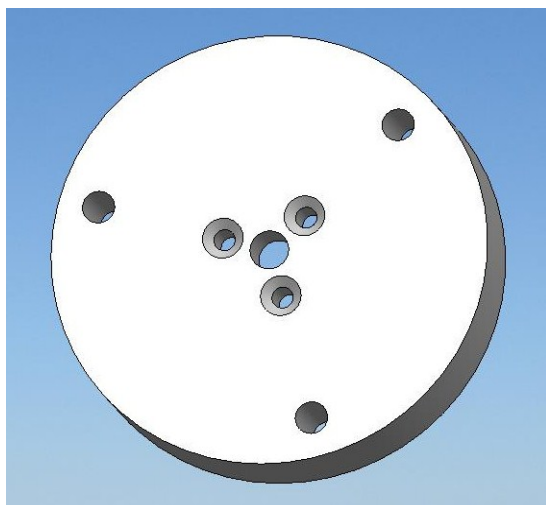
Η κινητή άνω βάση που ακολουθεί (εικ.21), ορίζεται στις (εικ.3) και (εικ.20) με τον αριθμό (3). Είναι το μόνο τμήμα του μηχανισμού συγκράτησης που είναι κατασκευασμένο από πλαστικό ABS ενώ όλα τα υπόλοιπα είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο ατσάλι 316L. Η χρήση πλαστικού ήταν απαραίτητη για την ηλεκτρική μόνωση ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια.

Αποτελεί το κινητό κομμάτι του μηχανισμού που σαν σκοπό του έχει να συμπαρασύρει το άνω ηλεκτρόδιο αυξομειώνοντας με αυτό τον τρόπο το διάκενο του με το κάτω. Διαθέτει τρεις οπές οδηγούς (37) που διαφέρουν μεταξύ τους κατά γωνία 120 μοιρών. Αποφασίστηκε η χρήση τριών οδηγών για να διατηρείται η σχετική γωνία και η ομοκεντρότητα των δυο τμημάτων (3,4) (εικ.3 και εικ.19), κατά τη μεταβολή της απόστασης τους.

Η διάμετρος τους ορίστηκε στα 10mm με ανοχή H7. Συγκεκριμένα σ’ αυτή τη διάσταση είναι 0,02 mm (η αποδέκτη διάμετρος τους είναι από 10-10.02mm) που σε συνδυασμό με το μήκος τους επιβάλουν την παραλληλία των δυο τμημάτων. Για να υπάρχει ομοαξονικότητα στη συναρμογή οπής τρήματος πρέπει το μήκος της οπής να είναι τουλάχιστον διπλάσιο της διαμέτρου της. Εδώ το μήκος ορίστηκε να είναι τριπλάσιο της διαμέτρου (30mm) για τρεις λόγους:

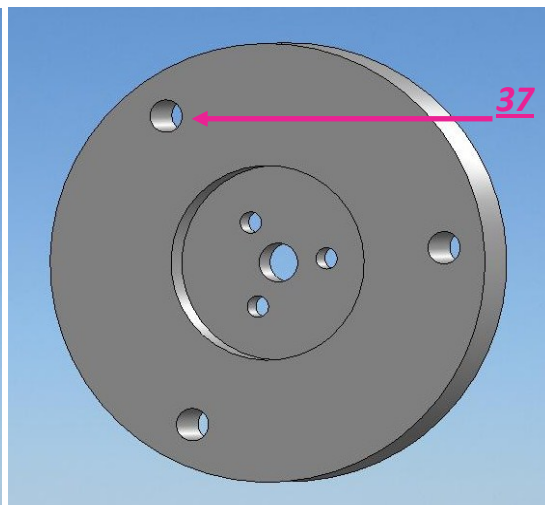
1. Μεγαλύτερος συντελεστής ασφαλείας για την παραλληλία,
2. Καλύτερη μηχανική αντοχή,
3. Δόθηκε με αυτό τον τρόπο περισσότερος χώρος για να προσαρμοστούν τα τμήματα (a) και (b).

Οι τρεις εσωτερικές οπές χρησιμεύουν για τις βίδες συγκράτησης και την ευθυγράμμιση του τμήματος “panw Insert” (α-εικ.20) Έχουν κωνικό πάτημα ώστε οι βίδες να μην προεξέχουν (κάτι που θα αύξανε τοπικά το μαγνητικό πεδίο). Από την κεντρική οπή διέρχεται η ράβδος υψηλής τάσης (8-εικ.4α) για να προσαρμοστεί στο κέντρο του μεταλλικού τμήματος “panw Insert” (εικ.22α)



Εικόνα 21α

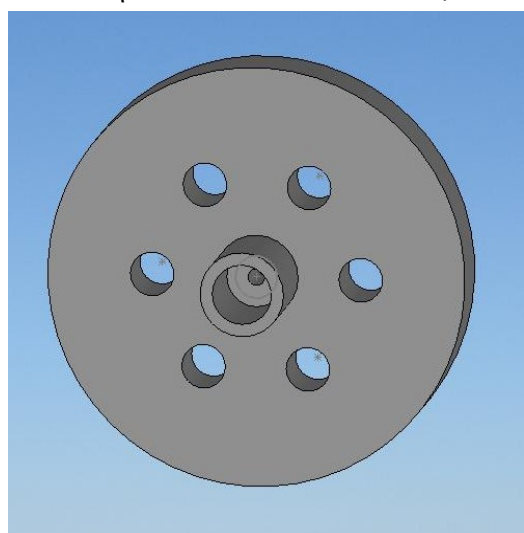
Άνω όψη του κομματιού “panw bash2”.



Εικόνα 21β

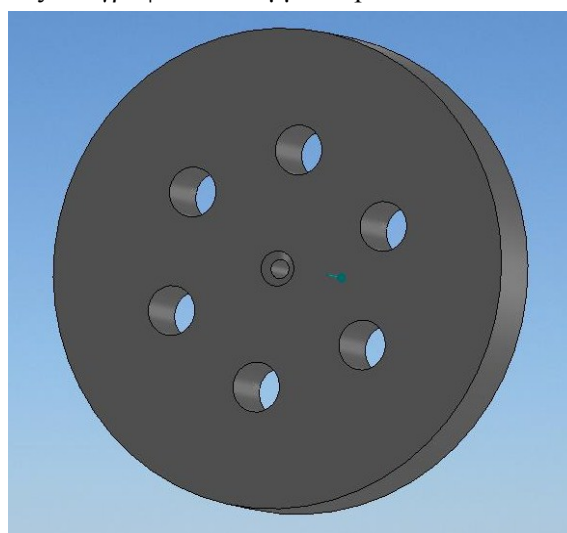
κάτω όψη του κομματιού “panw bash2” .

Στην εικόνα 22 που ακολουθεί, απεικονίζεται γραφικά το κομμάτι “panw Insert”



Εικόνα 22α

Άνω όψη του κομματιού “panw Insert” που προσαρμόζεται στην εσοχή του κομματιού “panw bash2” (εικ.21β)



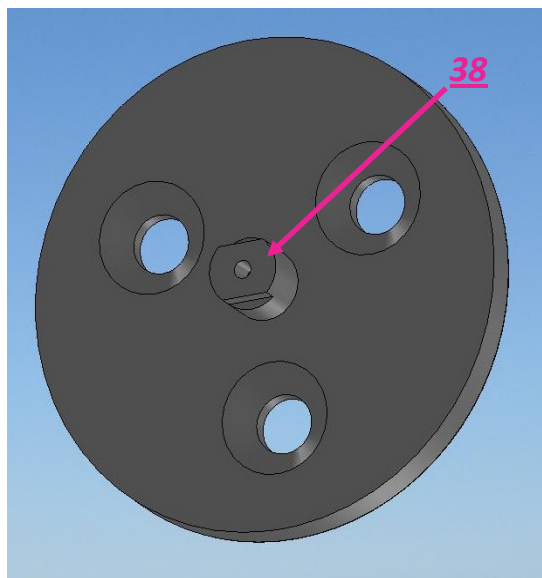
Εικόνα 22β

Κάτω όψη του κομματιού “panw Insert” που προσαρμόζεται στην εσοχή του κομματιού “panw bash2” (εικ.21β).

Προσαρμόζει στην εσοχή του κομματιού “panw bash2” (εικ.21β) και διαθέτει 6 οπές που φέρουν σπείρωμα M6. Οι τρεις χρησιμεύουν για τη σύσφιξη του στο τμήμα “panw bash2” ενώ οι άλλες τρεις για τη σύσφιξη του κομματιού “insert adaptor” (b-εικ.20), (εικ.23).

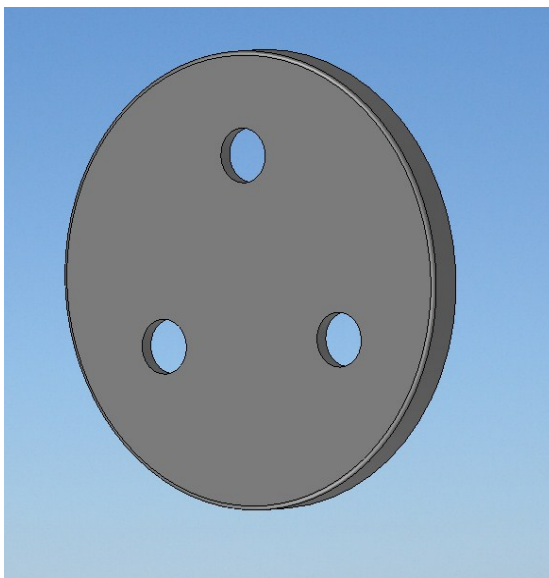
Στο εσωτερικό του κεντρικού κυλινδρικού τρήματος (εικ.22α) προσαρμόζει η ράβδος υψηλής τάσης (8-εικ.4α). Συγκρατείται με μια βίδα με κωνικό κεφάλι που διέρχεται από το κέντρο του (εικ.22β)

Το κομμάτι “insert adaptor” (εικ.23) με τη μια του πλευρά (εικ.23β) προσαρμόζει στις κυλινδρικές βάσεις (1) και (3) ενώ από την άλλη δέχεται το συγκρατητή των ηλεκτροδίων (38).



Εικόνα 23α

Άνω όψη του κομματιού “insert adaptor” που διακρίνεται το τμήμα προσαρμογής του συγκρατητή ηλεκτροδίων (38).



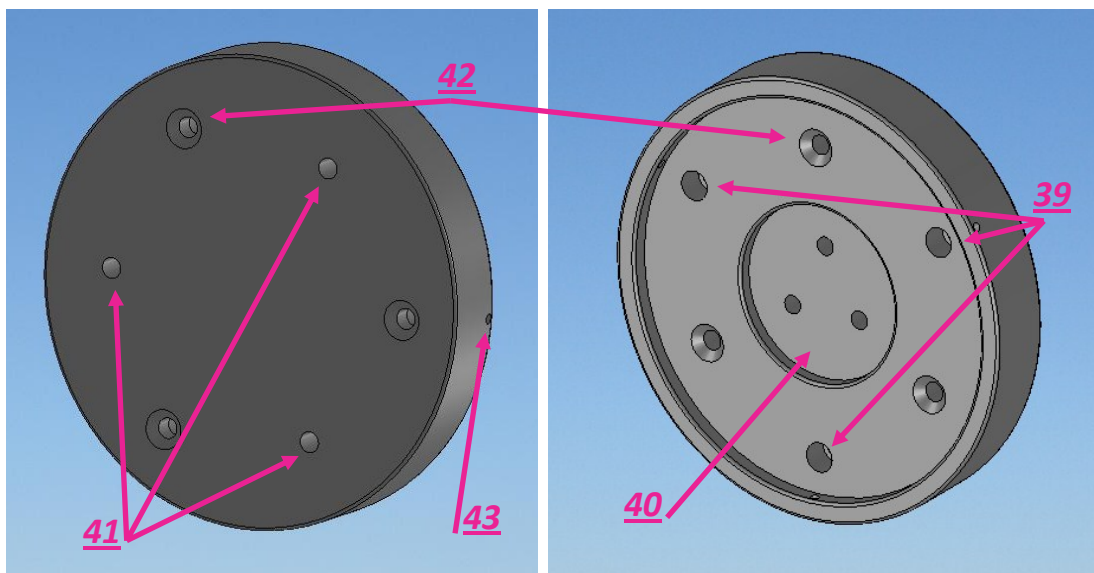
Εικόνα 23β

Κάτω όψη που προσαρμόζεται στο κομμάτι “rapw Insert” (εικ.22α) και στην κυλινδρική σταθερή βάση της εικόνας 24 που ακολουθεί. Επίσης φαίνεται στις (4-εικ.3) και (4-εικ.19)

Ακολουθεί η κυλινδρική σταθερή βάση “katw bash” (εικ.24) που φέρει τους τηλεσκοπικούς οδηγούς (5-εικ.3) και (5-εικ.19) στη θέση (39). Συγκρατεί στην εσοχή του (40) το κομμάτι “insert adaptor” που φέρει το συγκρατητή ηλεκτροδίου. Τέλος στις θέσεις (41) προσαρμόζονται οι πρόσθετες βάσεις ρύθμισης ύψους (6-εικ.3) και (6-εικ.19).

Οι οπές στις οποίες διέρχονται βίδες έχουν κωνικές εσοχές (42) ώστε μην προεξέχουν τα κεφάλια τους και αυξάνει έτσι μαγνητικό πεδίο τοπικά.

Επίσης φέρει σπείρωμα M3 σε τρεις θέσεις (43) περιμετρικά (120 μοίρες διαφορά) ώστε τα μπορεί να πακτωθεί στο εσωτερικό του δοχείου κενού με τη βοήθεια βιδών Allen.



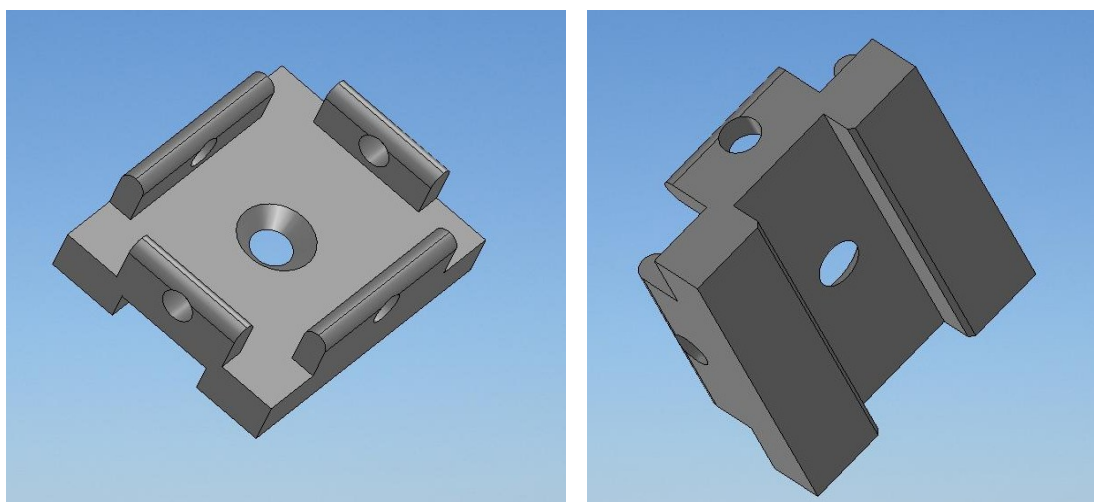
Εικόνα 24α

Κάτω όψη του κομματιού “katw bash”.

Εικόνα 24β

Άνω όψη του κομματιού “katw bash”..

Στην εικόνα 25 που ακολουθεί απεικονίζεται ο συγκρατητής ηλεκτροδίου “bash hlektrodio”. Έχει οπή στο κέντρο του για να προσαρμόζει η βίδα συγκράτησης του και αυλάκωση στο κάτω μέρος του για να ευθυγραμμίζεται με το κομμάτι “insert adaptor” (38-εικ.23α). Περιφερικά φέρει τέσσερις πλευρές με οπές και σπείρωμα M2 για τη συγκράτηση του ηλεκτροδίου με βίδες Allen. Έχουν υποστεί κατεργασία για να έχουν στρογγυλεμένες ακμές ώστε να μην αυξάνεται τοπικά το πεδίο.

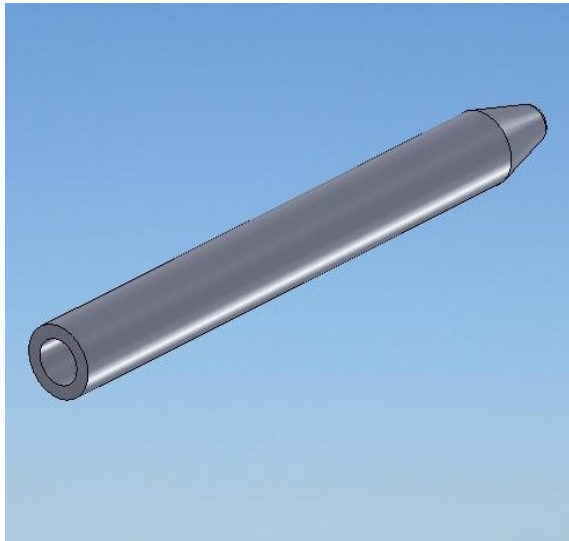


Εικόνα 25α

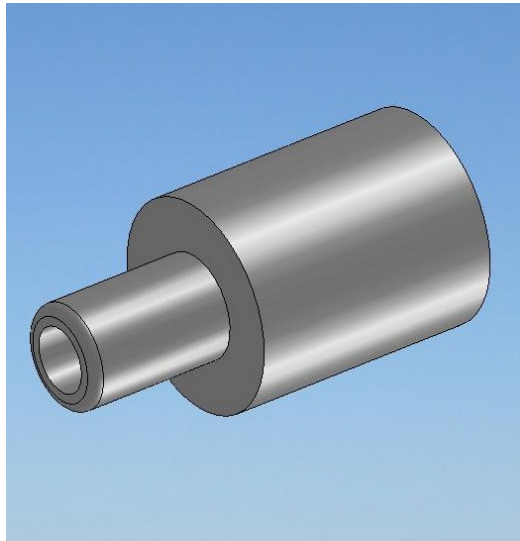
Συγκρατητής ηλεκτροδίου “bash hlektrodio”.

Εικόνα 25β

Ακολουθεί στην εικόνα 26 ο τηλεσκοπικός οδηγός “rod” με διάμετρο 10mm και ανοχή h7 (αποδεκτή διάμετρος 9,98 έως 10mm) ενώ στην εικόνα 27 η πρόσθετη βάση ρύθμισης ύψους “katw adaptor” που σαν σκοπό έχει τη μετατόπιση του σταθερού τρήματος “katw bash” καθ ύψος ώστε να τοποθετεί το ηλεκτρόδιο στο κέντρο της φασματοσκοπικής διόπτρας.

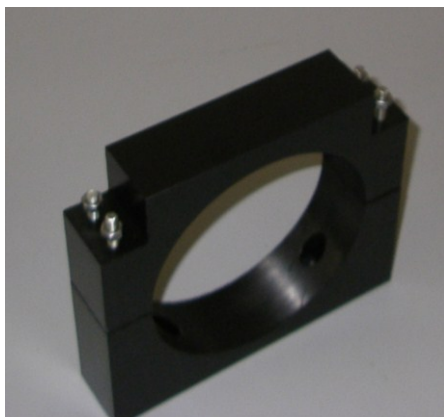


Εικόνα 26
Τηλεσκοπικός οδηγός “rod”.

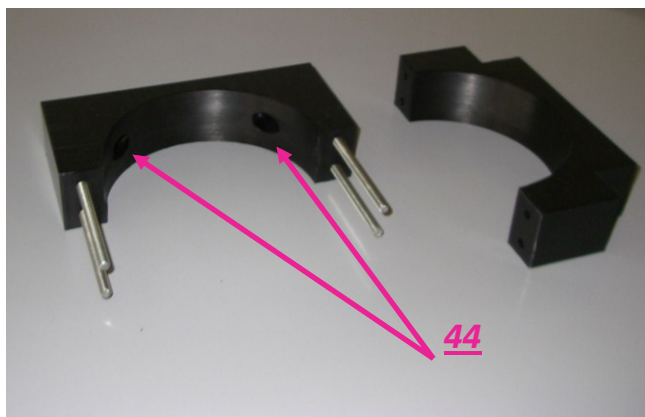


Εικόνα 27
Πρόσθετη βάση ρύθμισης ύψους “katw adaptor”

Στην εικόνα 28 διαφαίνεται η βάση που κατασκευάστηκε για τη στήριξη της αντλίας τούρμπο στη υπόλοιπη διάταξη.



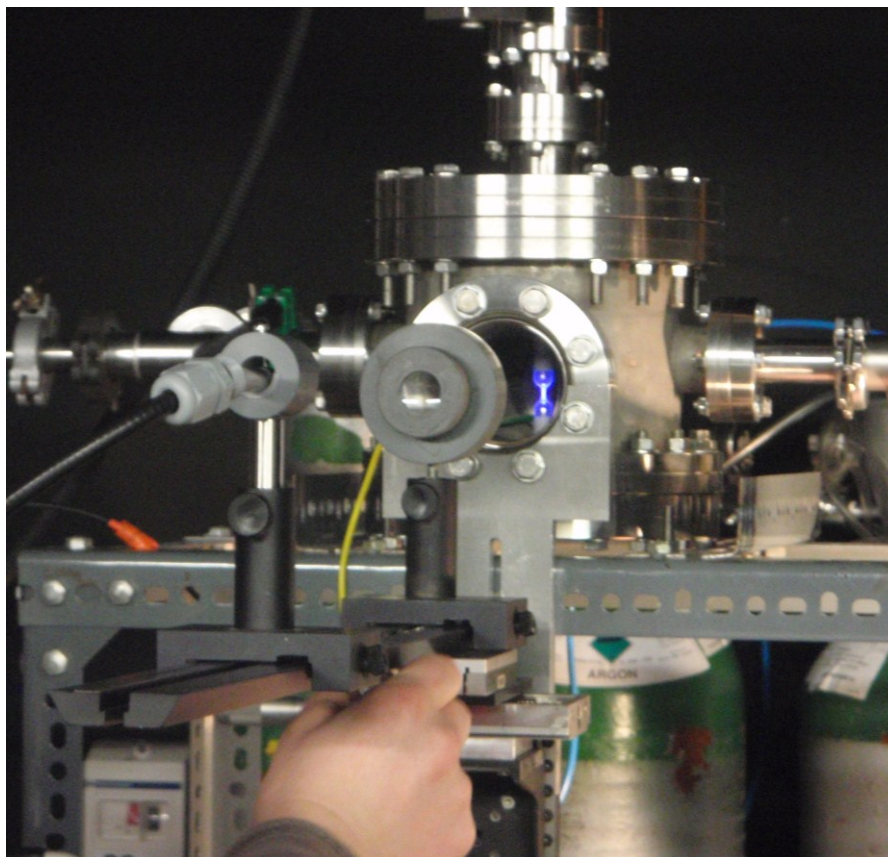
Εικόνα 28α
Βάση αντλίας Alcatel συναρμολογημένη.



Εικόνα 28β
Βάση αντλίας Alcatel αποσυναρμολογημένη. Στο (44) εφαρμόζουν οι βίδες στήριξης με την κεντρική διάταξης.

2.8 Συμπεράσματα

Η κατασκευή του μηχανισμού ήταν επιτυχής και η απροβλημάτιστη λειτουργία του σε συνδυασμό με τις ιδιαιτερότητες της διάταξης, βοήθησε τους ερευνητές στη μελέτη και ανάλυση των μηχανισμών παραγωγής πλάσματος σε μια εκκένωση DBD. Μέσα από τον πειραματισμό με υλικά και γεωμετρίες σε ελεγχόμενες συνθήκες εκκένωσης που η διάταξη προσφέρει, οι ερευνητές πιστεύουν να βρουν ένα συνδυασμό ηλεκτροδίων και επικάλυψης που θα αντέχει υψηλότερη τάση δηλαδή μεγαλύτερη ισχύ με μικρές απώλειες και μεγάλη διάρκεια ζωής



Εικόνα 29

Ο αντιδραστήρας σε πλήρη λειτουργία με το φασματογράφο και τα οπτικά του συνδεδεμένα.

Κεφάλαιο 3

3 Μικρός αντιδραστήρας

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του λόγου και της αναγκαιότητας κατασκευής πρότυπου αντιδραστήρα μικρού μεγέθους καθώς και οι πιθανές εφαρμογές του. Αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του, η διαδικασία σχεδιασμού του και γίνεται περιγραφή των τμημάτων του.

3.1 Ορισμός προβλήματος

Ενημερώθηκα πως στη βιβλιογραφία υπήρχαν αναφορές στην ικανότητα του “afterglow” εκκένωσης DBD να προκαλέσει αιμόσταση σε πληγές. Ο μηχανισμός κατά τον οποίο το πλάσμα επιδρούσε στο αίμα και προκαλούσε την πήξη του δεν ήταν γνωστός, ούτε αν έχει παρενέργειες. Αυτό που είχε παρατηρηθεί όμως ήταν πως το αίμα σταματούσε με τρόπο που θύμιζε ακριβώς το φυσικό, όταν όλες οι μέχρι τότε γνωστές μέθοδοι για να έχουν το ίδιο αποτέλεσμα κατέστρεφαν τα περιφερειακά στην πληγή κύτταρα. Θεωρήθηκε σημαντικό να ελεγχθεί κατά ποσό μπορεί να κατασκευαστεί διάταξη που να μπορεί πρακτικά να χρησιμοποιηθεί σε ένα ιατρείο ή ακόμα και σε χειρουργείο. Κάτι που να μπορεί ο γιατρός εύκολα, άμεσα και με ασφάλεια να χρησιμοποιήσει. Μια τέτοια επιτυχημένη προσέγγιση θα κινούσε το ενδιαφέρον για περαιτέρω μελέτη μιας σημαντικής εφαρμογής σαν κι αυτήν.

Μια άμεση λύση θα ήταν να γίνει χρήση υπάρχοντων διατάξεων για την παραγωγή πλάσματος και η διοχέτευση του ενεργοποιημένου αερίου στην επιθυμητή περιοχή να γίνεται μέσω εύκαμπτης σωλήνωσης. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία θα δημιουργούσε κάποια προβλήματα που δεν θα ήταν εύκολο να ξεπεραστούν. Το πλάσμα είναι ένα έντονα ιονισμένο μέσο που μεταφέρει την ενέργεια του στα σωμάτια με οποία έρχεται σε επαφή. Στην περίπτωση που θα γινόταν χρήση σωλήνα για την κατεύθυνση του πλάσματος, μέρος της θα χανόταν για τη διέγερση αυτών που βρίσκονται στην εσωτερική του επιφάνεια του. Η διαδικασία αυτή θα συνεχιζόταν έως ότου το σύστημα έρθει σε ισορροπία. Άρα θα μεσολαβούσε χρόνος για την προετοιμασία η αλλιώς την “προθέρμανση” της μηχανής. Για μια κατεργασία που ο χρόνος προθέρμανσης δεν αποτελεί προτεραιότητα, η χρήση μιας τέτοιας διάταξης θα ήταν δυνατή, για την περίπτωση όμως που περιγράφεται εδώ είναι απαγορευτική.

Σε αντίστοιχα πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο, θέτοντας τη συσκευή σε λειτουργία, έχοντας δηλαδή ροή ενεργοποιημένου αερίου μέσα σε σωλήνα, μεσολαβούσε εύλογο χρονικό διάστημα έως ότου το εξερχόμενο αέριο του σωλήνα να είναι στην ίδια κατάσταση ενέργειας που ήταν εξερχόμενο του αντιδραστήρα. Μια τέτοια προσέγγιση δε θα μπορούσε πρακτικά να βρει ιατρική εφαρμογή, αφού σε ένα χειρουργείο δεν υπάρχει η

πολυτέλεια του χρόνου άρα και της αναμονής έως ότου προετοιμαστεί το μηχάνημα. Αντί λοιπόν να προσπαθούμε να βρούμε υλικό που να βοηθά το φαινόμενο να γίνει ταχύτερα αποφασίστηκε να εξεταστεί, αν είναι δυνατή η κατασκευή αντιδραστήρα περιορισμένων διαστάσεων και αποδεκτής ισχύος, τον οποίον θα μπορούσε κάποιος να φέρει πολύ κοντά στην επιθυμητή περιοχή κατευθύνοντας τον με το χέρι του ώστε να εφαρμόσει το πλάσμα στην πληγή άμεσα.

Από μόνος του ο τρόπος χειρισμού έθετε παραμέτρους στον σχεδιασμό του.

- Μικρό μέγεθος και βάρος ώστε να είναι δυνατός ο δια χειρός χειρισμός του.
- Το πλάσμα να παράγεται και να εξέρχεται από το εμπρόσθιο τμήμα του.
- Να είναι ηλεκτρικά μονωμένος και ασφαλής για χειριστή και ασθενή.
- Όλες οι απαραίτητες παροχές να συνδέονται στο οπίσθιο τμήμα του με εύκαμπτο σωλήνα

3.2 Περιορισμοί

Αν και εξετάστηκαν διάφορες γεωμετρίες ο τελικός σχεδιασμός βασίστηκε σε ομοαξονικό μοντέλο όπου το κυλινδρικής διατομής υψηλής τάσης ηλεκτρόδιο βρίσκεται στο κέντρο και φέρει την διηλεκτρική επικάλυψη. Μεσολαβεί ένα κενό μέσα από το οποίο διέρχεται το αέριο και το εξωτερικό μεταλλικό περίβλημα είναι το γειωμένο ηλεκτρόδιο.

Το τελικό σχέδιο είχε τα εξής πλεονεκτήματα έναντι τη συμβατικής μορφής αντιδραστήρα με επίπεδα αντικριστά ηλεκτρόδια:

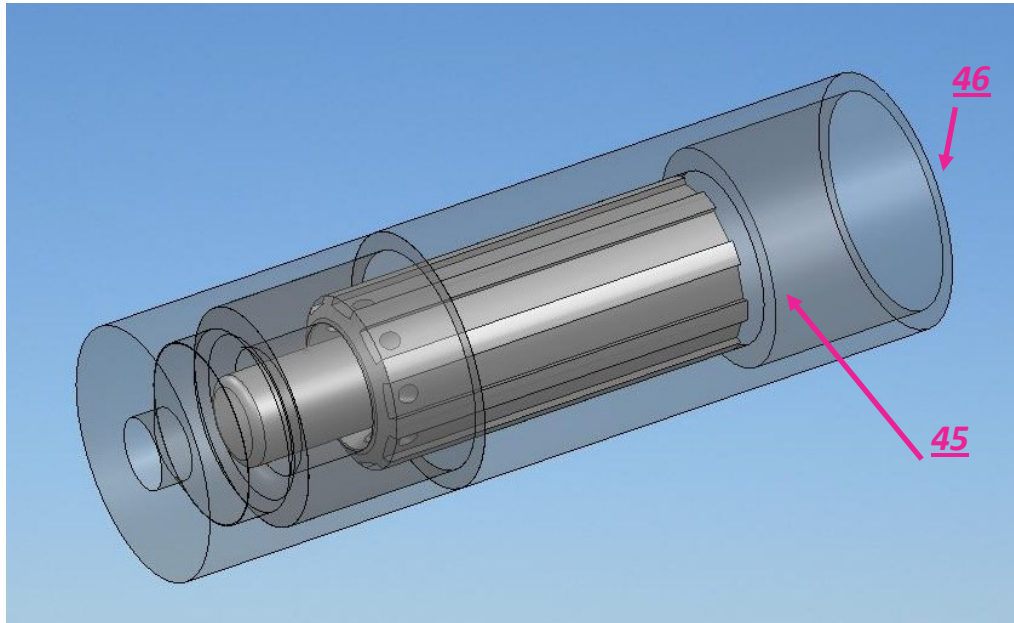
- Συμπαγείς διαστάσεις,
- Κέλυφος αντιδραστήρα ηλεκτρικά μονωμένο,
- Κυλινδρικό ίχνος εξερχόμενων αερίων πλάσμα,
- Μονή παροχή στο οπίσθιο μέρος,
- Μικρό ευέλικτο σχήμα αντιδραστήρα.

3.3 Μοντελοποίηση

Αρχικά έπρεπε να υπολογιστούν τα βασικά μεγέθη της διαμέτρου του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης και του πάχους της επικάλυψης του με δεδομένο τις συνθήκες και την επιθυμητή τάση λειτουργίας. Απ' όσο ήταν γνωστό δεν είχε κατασκευαστεί αντιδραστήρας αντίστοιχου μεγέθους έως τότε, οπότε η διαστασιολόγηση του έπρεπε να μελετηθεί από την αρχή βασιζόμενη σε πειραματικά δεδομένα ηλεκτροδίων, επικαλύψεων και συνθηκών εκκένωσης. Λόγω περιορισμού του κόστους και έλλειψης χρόνου, υλικά ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που θα συνεισέφεραν μεν σε ένα καλύτερο αποτέλεσμα αλλά απαιτούσαν δε ειδικές και χρονοβόρες κατεργασίες, αποκλείστηκαν. Αποφασίστηκε η χρήση συμβατικών υλικών όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας για τα ηλεκτρόδια και το πυρέξ ή το οξείδιο του αργιλίου για τη διηλεκτρική επίστρωση. Στα παραπάνω συνυπολογίστηκαν η μηχανική αντοχή, η αντοχή στην υψηλή τάση καθώς και οι προϋποθέσεις σε μέγεθος και τραχύτητα για σωστή εναπόθεση του διηλεκτρικού. Μέσα από μια διαδικασία επικοινωνίας μεταξύ των ερευνητών του εργαστηρίου, των τεχνικών που θα έκαναν την επίστρωση και των τεχνικών του μηχανουργείου, αποφασίστηκε πως η ελάχιστη διάμετρος του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης είναι τα 4mm ενώ το ελάχιστο πάχος του διηλεκτρικού τα 0,4mm. Το επόμενο μέγεθος που έπρεπε να αποφασιστεί ήταν το διάκενο των ηλεκτροδίων που μετά από τους απαραίτητους υπολογισμούς των ερευνητών, ορίστηκε στο ελάχιστο του ενός χιλιοστού για τάση 6kV, με σκοπό να γίνουν δόκιμες έως τα 9kV.

3.4 Ο αντιδραστήρας

Στη φωτογραφία που ακολουθεί απεικονίζεται γραφικά το τελικό σχέδιο.

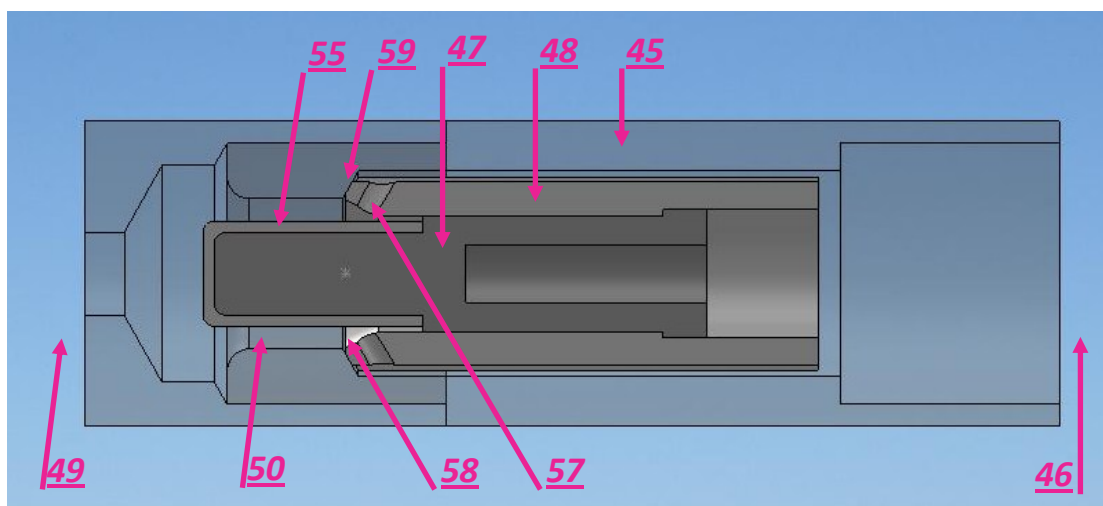


Εικόνα 30

Μικρός αντιδραστήρας στην τελική του μορφή με μήκος 44.5mm και διάμετρο 14mm.

Κατά την εξέταση ιδεών για το σχεδιασμό του αντιδραστήρα, η παραπάνω διάταξη αποτέλεσε μονόδρομο γιατί συγκεντρώνει όλα τα στοιχεία των προδιαγραφών. Το εξωτερικό του σχήμα είναι εργονομικό και μπορεί εύκολα να συγκρατηθεί από το χέρι. Είναι ασφαλές για χειριστή και ασθενή, αφού το κέλυφος του (45) είναι μεταλλικό και γειωμένο, όποτε δεν διατρέχεται κίνδυνος ηλεκτροπληξίας. Η τροφοδοσία με το αέριο και τους αγωγούς υψηλής τάσης γίνεται από το οπίσθιο μέρος του (46) με ένα καλώδιο που συμβάλει στο να είναι η διάταξη απλή, λιτή και να διευκολύνει το χειριστή του κατά τη μετακίνηση και χρήση της.

Ακολουθεί τομή του αντιδραστήρα.



Εικόνα 31

Αντιδραστήρας σε τομή όπου (46) είναι το οπίσθιο τμήμα του, (47) το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης με τη διηλεκτρική του επικάλυψη (55), (48) το ενδιάμεσο μονωτικό τμήμα, (45) το κέλυφος και ηλεκτρόδιο της γείωσης, (49) το εμπρόσθιο τμήμα του αντιδραστήρα και (50) το διάκενο της εκκένωσης. Η κλίση (58) βοηθά στη διασπορά του αερίου στο διάκενο (50) ενώ η πλευρά (59) με την κλίση της, στεγανοποιεί το εμπρόσθιο τμήμα του ενδιάμεσου μονωτικού τμήματος με το κέλυφος ώστε το αέριο να κατευθύνεται μέσα από τις οπές (57)

Στο κέντρο του αντιδραστήρα βρίσκεται το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης (47). Περιβάλλεται από ένα πλαστικό κομμάτι (48) που έχει τρεις ρόλους.

Ο πρώτος και σημαντικότερος είναι να διατηρεί την ομοαξονικότητα των δυο ηλεκτροδίων, του εσωτερικού υψηλής τάσης (47) και του εξωτερικού τμήματος (45) του αντιδραστήρα που είναι και η γείωση. Αυτό επιτυγχάνεται από τον τρόπο αλληλεπίδρασης τους. Η εσωτερική διάμετρος του εξωτερικού μεταλλικού περιβλήματος και ηλεκτροδίου της γείωσης (45) είναι η μισή του μήκους που τα δυο τμήματα εφάπτονται. Κατά τον ίδιο τρόπο εξασφαλίζεται η ομοαξονικότητα του πλαστικού ενδιάμεσου τμήματος (48) με το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης (47), αφού και εκεί το μήκος επικάλυψης είναι διπλάσιο της διαμέτρου του.

Δεύτερον παίζει το ρόλο του διηλεκτρικού, με σκοπό να αποκλείει την δημιουργία εκκένωσης εκτός του εμπρόσθιου επιθυμητού τμήματος του αντιδραστήρα. Το ABS που είναι το υλικό κατασκευής του, έχει διηλεκτρική αντοχή 14,1kV/mm και το πάχος του δεν πέφτει κάτω από το 1mm σε κανένα σημείο του. Οπότε μπορεί να συγκρατεί τάση 14kV ενώ κατά τη λειτουργία του θα του επιβάλλονται τάσεις από 6 μέχρι 9kV.

Και τρίτον είναι η ομαλή ροή του αερίου από το πίσω μέρος του αντιδραστήρα (46) στο εμπρόσθιο (49) όπου και το κατανέμει ομαλά στο διάκενο των ηλεκτροδίων (50).

Η γεωμετρία είναι τέτοια ώστε όλα τα παραπάνω να επιτευχθούν από ένα κομμάτι σχετικά απλό στην κατασκευή του χωρίς να απαιτούνται ειδικά εργαλεία. Το αποτέλεσμα συμβάλει σημαντικά στην ελαχιστοποίηση του ολικού μέγεθος του αντιδραστήρα. Βέβαια οι τελικές διαστάσεις δεν πρέπει να δημιουργούν προβλήματα στην φυσική της εκκένωσης και στη μηχανική συγκράτηση και αντοχή όλης της κατασκευής.

3.5 Σχεδιασμός

Μια βασική παράμετρος για το σχεδιασμό των τμημάτων ήταν να οριστεί η ροή αερίου από τον αντιδραστήρα. Οι ερευνητές αποφάσισαν πως μέγιστη επιθυμητή ροή ήταν τα 30l/min.

Ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας διαστασιολόγησης και της γεωμετρίας των τμημάτων αφού έπρεπε να συνυπολογισθούν οι διηλεκτρικές αντοχές των υλικών, ο τρόπος παροχής του αερίου και η σύνδεση των αγωγών καθώς και η πίεση που θα αναπτυσσόταν στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Καθώς εξελισσόταν ο σχεδιασμός των τμημάτων έγιναν αλλαγές για να αντιμετωπιστούν κυρίως διηλεκτρικά προβλήματα αλλά και κατασκευαστικά, αφού ορισμένες γεωμετρίες δεν ήταν δυνατόν να παραχθούν στο μηχανουργείο του κέντρου.

Για την απλούστευση του προβλήματος και αφού το τελικό σχέδιο δεν ήταν αποφασισμένο ώστε να μπορεί να γίνει ακριβής υπολογισμός των αριθμών Reynolds για κάθε τμήμα που υπάρχει αλλαγή υλικού, γεωμετρίας, θερμοκρασίας ή ταχύτητας έγινε το εξής.

Για την επίτευξη της επιθυμητής ροής, χρησιμοποιούνταν ηλεκτρονικά ροόμετρα. Έγινε χρήση ενός ροόμετρου και μετρήθηκε πως για παροχή αζώτου 80l/min από εύκαμπτο σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 4mm και μήκους 2m στο περιβάλλον (ατμοσφαιρική πίεση), η απόλυτη πίεση στην έξοδο του ροόμετρου ήταν 1,3bar. Η ενεργός διατομή του εύκαμπτου σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 4mm είναι 12.56mm². Βάση αυτής της τιμής καθορίστηκε ο τελικός τρόπος συνδεσμολογίας των παροχών καθώς και το μέγεθος των αυλακώσεων κατεύθυνσης του αερίου.

Η επιθυμητή ροή στον αντιδραστήρα ήταν τα 30l/min και οι τριβές στις σχετικές χαμηλές ταχύτητες στο εσωτερικό του θεωρήθηκαν αμελητέες. Εάν η ολική ενεργός διατομή των περασμάτων του αερίου ήταν ίδια με αυτή του σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 4mm, τότε η ροή θα ήταν στα επιθυμητά επίπεδα, χωρίς αύξηση της πίεσης που θα μπορούσε να καταστρέψει τμήματα του αντιδραστήρα.

Κατά τη διαδικασία εύρεσης βέλτιστης συνδεσμολογίας των παροχών, που επίσης θα καθόριζαν τη γεωμετρία και αφού αποφασίστηκε ότι η ενεργός διατομή των 12.56mm² κρίνεται αρκετή υλοποιήθηκε η παρακάτω ιδέα.

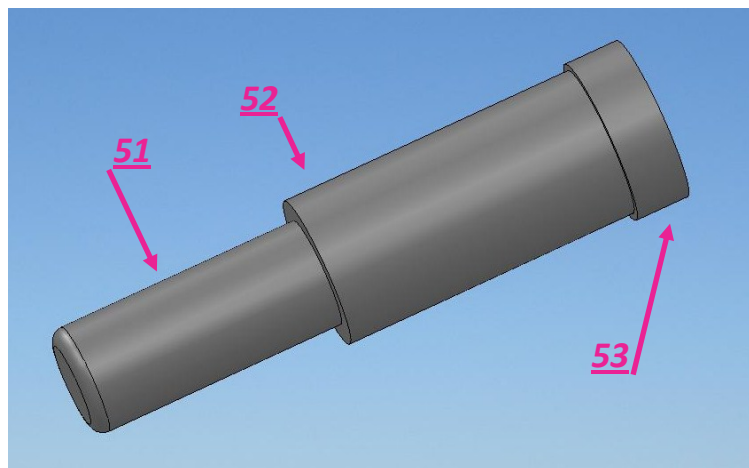
3.5.1 Παροχή τάσης και αερίου

Η παροχή θα ήταν ομοαξονικής διάταξης, έχοντας στο κέντρο αγωγό υψηλής τάσης, διάκενο για παροχή του αερίου και εξωτερικά ελαστική σωλήνωση. Ο αγωγός υψηλής τάσης θα μετέφερε έως 9kV, οπότε επιλέχθηκε εύκαμπτος αγωγός εξωτερικής διαμέτρου 6mm πιστοποιημένος για τάσεις έως 25kV. Η κατασκευή του ήταν επίσης ομοαξονική έχοντας αγωγό υψηλής τάσης στο κέντρο του, που περιβαλλόταν με ένα στρώμα μονωτικού, στη συνέχεια είχε ένα πλέγμα που προοριζόταν για την γη και τέλος το εξωτερικό μονωτικό στρώμα. Ο αγωγός αυτός θα τοποθετούνταν μέσα σε εύκαμπτο σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 8mm. Στο τμήμα μεταξύ της εσωτερικής διαμέτρου 8mm του εξωτερικού σωλήνα και της εξωτερικής διαμέτρου 6mm του εσωτερικού αγωγού υψηλής τάσης, θα έρεε το αέριο. Η ενεργός διατομή του είναι $\pi \times 4^2 - \pi \times 3^2 = 21,99\text{mm}^2$ που είναι παραπάνω από την απαιτούμενη αλλά κρίνεται απαραίτητη καθώς λόγω παραμόρφωσης του εύκαμπτου σωλήνα θα είναι ακόμα μικρότερη στα σημεία καμπής του.

Στη συνέχεια για την περαιτέρω βελτίωση των χαρακτηριστικών της διάταξης αποφασίστηκε για τη γείωση να γίνει χρήση ξεχωριστού εξωτερικού αγωγού και όχι του πλέγματος του αγωγού υψηλής τάσης όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή του. Ο λόγος ήταν η αύξηση της απόστασης των αγωγών υψηλής τάσης και γης για να μειωθεί το μεταξύ τους πεδίο και άρα η χωρητική αντίσταση που εισάγεται στο ηλεκτρικό κύκλωμα τροφοδοσίας. Το πλέγμα του αγωγού υψηλής δεν συνδέεται πουθενά και λειτουργεί σαν κλωβός Faraday που περιορίζει το πεδίο. Αντί απλού ελαστικού εξωτερικού σωλήνα θα γίνει χρήση σωλήνωσης υψηλής πίεσης και η εξωτερική μεταλλική της ενίσχυση θα παίζει το ρόλο του αγωγού για τη γη.

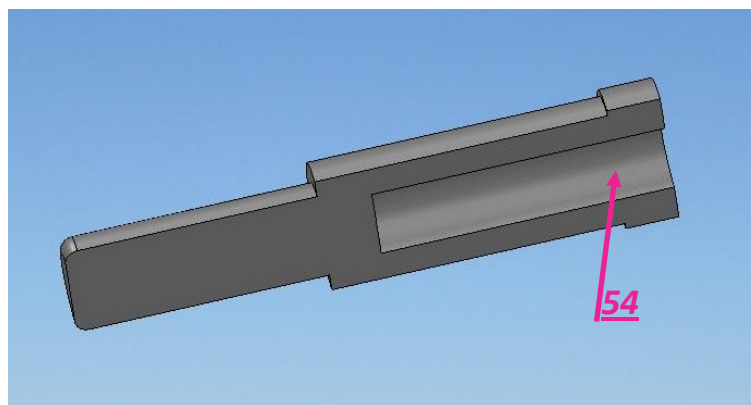
3.5.2 Ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης

Το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης (47) τοποθετείται στο κέντρο του αντιδραστήρα είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα και έχει τρεις διαφορετικές διαμέτρους. Στο τμήμα με τη μικρότερη διάμετρο 4mm (51) γίνεται η επικάλυψη με το διηλεκτρικό της εκκένωσης (55-εικ.31). Το ενδιάμεσο τμήμα (52) διαμέτρου 5.5mm χρησιμεύει για την ευθυγράμμιση του, ενώ το τελικό τμήμα (53) με τη μεγαλύτερη διάμετρο 6mm, περιορίζει την θέση συναρμογής του με το πλαστικό ενδιάμεσο τμήμα του αντιδραστήρα.



Εικόνα 32

Ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης με (51) να το εμπρόσθιο τμήμα όπου γίνεται η επικάλυψη του διηλεκτρικού, (52) το ενδιάμεσο τμήμα για την ευθυγράμμιση του με το ηλεκτρόδιο της γης και (53) διάμετρος που το περιορίζει και το τοποθετεί στη σωστή θέση εσωτερικά του ενδιάμεσου μονωτικού τμήματος του αντιδραστήρα.



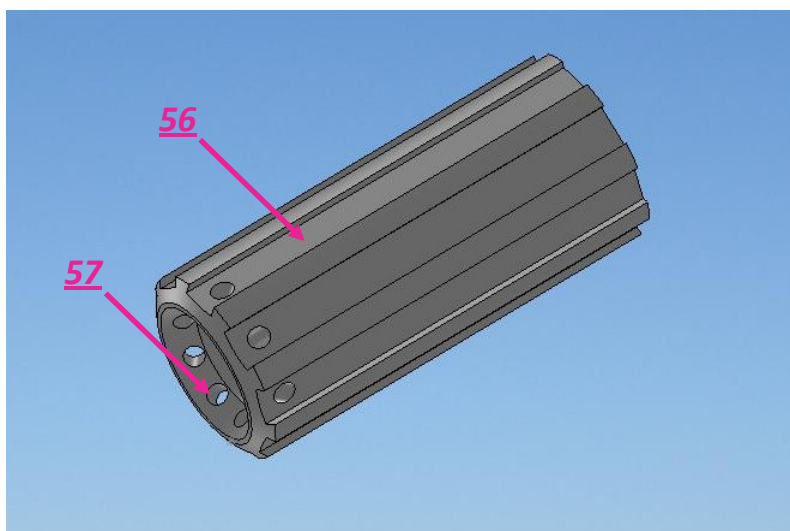
Εικόνα 33

Το ηλεκτρόδιο σε τομή, με την οπή σύνδεσης του αγωγού (54)

Η οπή που φέρει στο οπίσθιο τμήμα του με διάμετρο 3mm, χρησιμεύει για τη σύνδεση του αγωγού υψηλής τάσης μέσω κονέκτορα τύπου μπανάνα.

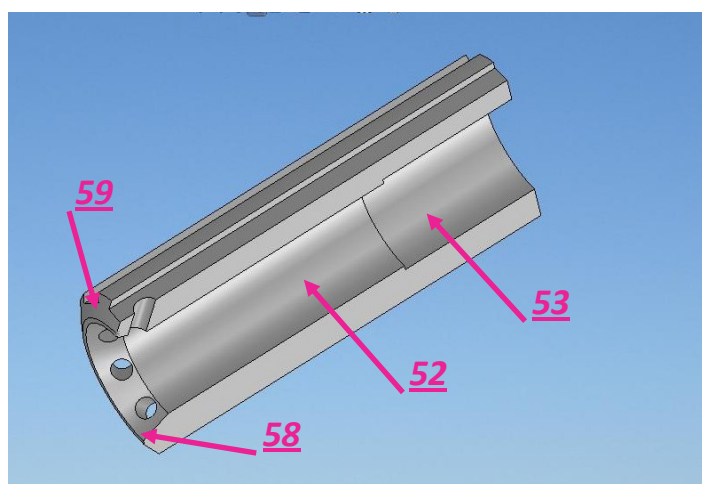
3.5.3 Ενδιάμεσο μονωτικό τμήμα

Το ενδιάμεσο πλαστικό τμήμα αποτυπώνεται στην εικόνα 34 και η τομή του στην εικόνα 35



Εικόνα 34

Ενδιάμεσο μονωτικό τμήμα ηλεκτροδίων. Οι αυλακώσεις (56) κατευθύνουν το αέριο από την οπίσθια (46-εικ.31) στην εμπρόσθια πλευρά (49-εικ.31) του αντιδραστήρα. Οι οπές (57) στη συνέχεια το διανέμουν από την εξωτερική περιμετρική πλευρά του στην εσωτερική και μετά στο διάκενο (50-εικ.31).



Εικόνα 35

Τομή του ενδιάμεσου μονωτικού τμήματος των ηλεκτροδίων. Διακρίνεται η πορεία που διανύει το αέριο στις αυλακώσεις για να μεταβεί στο διάκενο μέσω των οπών (57-εικ.34), επίσης διακρίνεται στο εσωτερικό του το σκαλοπάτι από τη διάμετρο τοποθέτησης (53) στη διάμετρο ευθυγράμμισης (52). Η γωνία (58) ομογενοποιεί τη ροή του αερίου.

Όπως προαναφέρθηκε σκοπός του είναι η διοχέτευση του αερίου, από το οπίσθιο (46-εικ.31) στο εμπρόσθιο τμήμα (49-εικ.31) του αντιδραστήρα, ενώ ταυτόχρονα ευθυγραμμίζει τα δυο ηλεκτρόδια. Η ροή του αερίου από την παροχή κατευθύνεται μέσα από τις εννέα περιμετρικές κατά μήκος αυλακώσεις του (56-εικ.34). Στη συνέχεια και αφού περιορίζεται από

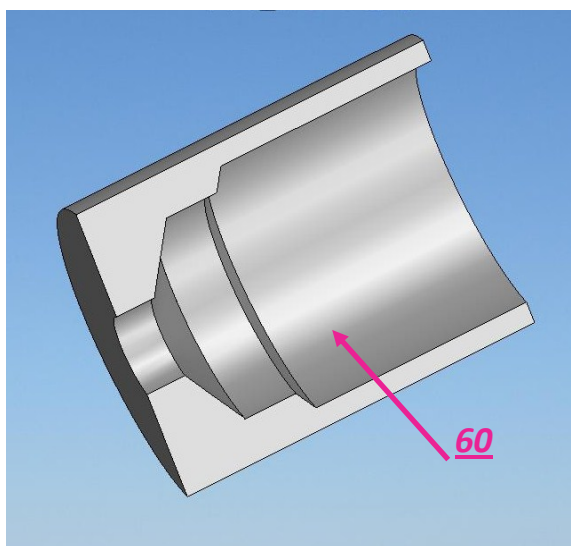
την επαφή του εμπρόσθιου τμήματος (59-εικ.35) με το κέλυφος του αντιδραστήρα, ωθείται μέσω των 9 οπών (57-εικ.34) στο διάκενο της εκκένωσης (50-εικ.31). Πριν όμως φτάσει εκεί ομογενοποιείται λόγω της γωνίας και της γεωμετρίας που δημιουργείται κατά τη συναρμογή του αντιδραστήρα στο εσωτερικό εμπρόσθιο τμήμα του, όπως διαφαίνεται στις (58-εικ.35) (58-εικ.312).

Η ολική ενεργός διατομή των αυλακώσεων (56-εικ.34) είναι 12mm^2 το ίδιο και των οπών (57-εικ.34), ενώ το τελικό τμήμα του διακένου της εκκένωσης (50-εικ.31) έχει $11,3\text{mm}^2$. Το ακροφύσιο στο εμπρόσθιο τμήμα του αντιδραστήρα έχει ενεργό διατομή $18,8\text{mm}^2$. Όπως παρατηρείται, η ενεργός διατομή μειώνεται σταδιακά έως ότου γίνει ελάχιστη στο διάκενο της εκκένωσης και μετά αυξάνεται ξανά. Αυτό συμβαίνει ώστε η ταχύτητα να αυξάνεται σταδιακά και να γίνεται μέγιστη στο διάκενο της εκκένωσης. Με το τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερη ψύξη των ηλεκτροδίων που βοηθά στη διάρκεια ζωής της διηλεκτρικής επικάλυψης.

3.5.4 Ακροφύσιο

Το ακροφύσιο είναι το εμπρόσθιο τμήμα του αντιδραστήρα απ' όπου εξέρχεται το πλάσμα. Φέρει ειδικό σπείρωμα χαμηλής αυλάκωσης για περιορισμό του πάχους του (M 12x1), στο εσωτερικό οπίσθιο τμήμα του (60) για να εφαρμόζει στο κυρίως σώμα. Σχεδιάστηκε ώστε να είναι αποσπώμενο για δυο λόγους:

1. Μπορεί να αντικατασταθεί από άλλο τμήμα το οποίο θα προσδίδει διαφορετική γεωμετρία στο εξερχόμενο αέριο πλάσμα. Έτσι ανάλογα με το σχήμα και το μέγεθος της επιφάνειας που θα κατεργαστεί προσαρμόζεται το αντίστοιχο ακροφύσιο.
2. Διευκολύνει πολύ την κατασκευή του αντιδραστήρα γιατί βοηθά τη διαδικασία κατεργασίας για την επίτευξη της εσωτερικής γεωμετρίας από το τμήμα μετά το διάκενο της εκκένωσης, έως το σημείο εξόδου του πλάσματος στο εμπρόσθιο τμήμα του (εικ.31). Εάν ήταν ενσωματωμένο στο κυρίως σώμα, η κατεργασία θα γινόταν πολύπλοκη και θα απαιτούσε ειδικά εργαλεία.

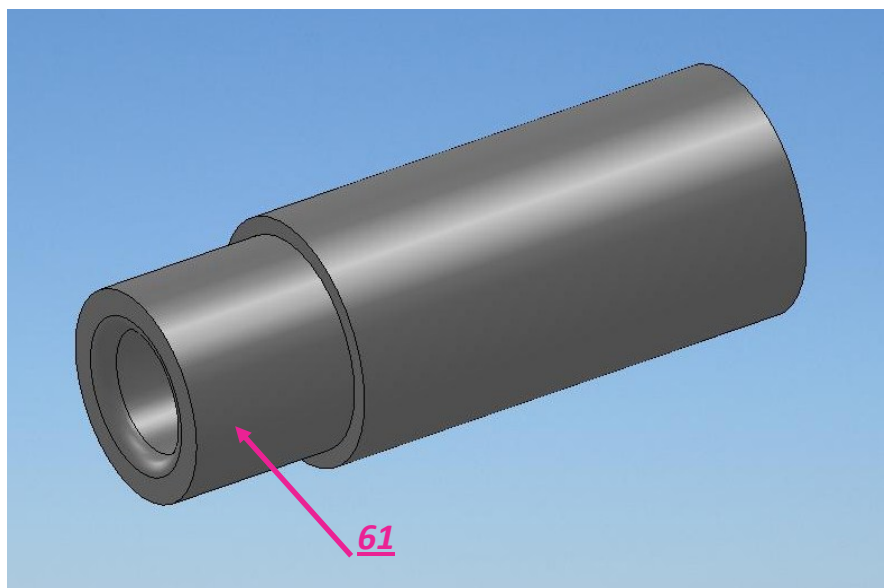


Εικόνα 36

Τομή του ακροφυσίου με το 60 να υποδεικνύει το σπείρωμα για τη στερέωση του στον αντιδραστήρα.

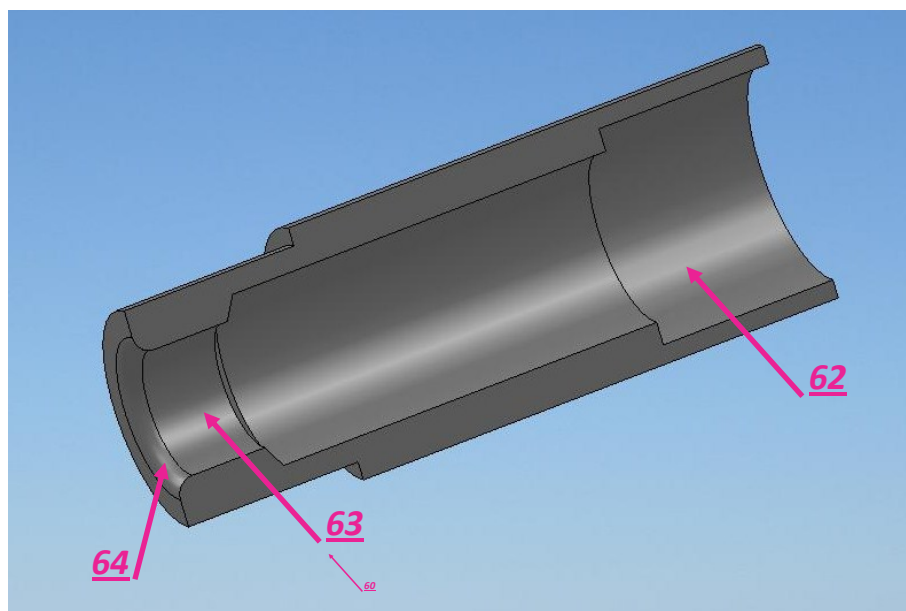
3.5.5 Κυρίως σώμα

Στο κύριο μέλος του αντιδραστήρα συναρμολογούνται τα υπόλοιπα τμήματα. Έχει δυο σπειρώματα ένα εξωτερικό στο εμπρόσθιο τμήμα του (61-εικ.37) για το ακροφύσιο, και ένα εσωτερικό στο οπίσθιο τμήμα του (62-εικ.38) για τη σωλήνωση υψηλής πίεσης.



Εικόνα 37

Ηλεκτρόδιο γείωσης και κέλυφος του αντιδραστήρα, με το (61) να υποδεικνύει το σπείρωμα συναρμογής του ακροφυσίου.



Εικόνα 38

Ο αντιδραστήρας σε τομή, με το (62) να είναι το εσωτερικό σπείρωμα για τη συγκράτηση του συστήματος παροχής και (63) το τμήμα που θα λαμβάνει χώρα η εκκένωση. Η κοίλη γεωμετρία (64) και η απουσία γωνίας, βοηθά στην ομοιομορφία της εκκένωσης στο τμήμα (63). Το αντίθετο θα οδηγούσε σε αύξηση του πεδίου τοπικά με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση της εκκένωσης σε εκείνο το σημείο αντί ολόκληρης της περιοχής (63) που προορίζεται.

3.6 Συναρμολόγηση

Βασική προϋπόθεση είναι να έχει επιτευχθεί ομοιογενής επικάλυψη διηλεκτρικού στο εμπρόσθιο τμήμα του ηλεκτροδίου (51-εικ.32) με πάχος που δεν ξεπερνά τα 0.4mm. Στην οπή (54-εικ.33) του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης (εικ.52) τοποθετείται ο κονέκτορας μπανάνα του αγωγού υψηλής τάσης. Στη συνέχεια το ηλεκτρόδιο εισέρχεται στο εσωτερικό του ενδιάμεσου μονωτικού τμήματος ευθυγράμμισης (εικ.34) από το οπίσθιο άκρο του (53-εικ.35), έως ότου ακουμπήσει στο σκαλοπάτι που δημιουργείται λόγω εναλλαγής της διαμέτρου (από 53 σε 52 εικ.35).

Το ενδιάμεσο μονωτικό τμήμα ευθυγράμμισης, τοποθετείται στο εσωτερικό του κελύφους από το οπίσθιο τμήμα του (62-εικ.38) έως ότου σταματήσει. Ακολούθως το ελεύθερο άκρο του αγωγού υψηλής τάσης τοποθετείται στο εσωτερικό της σωλήνωσης υψηλής πίεσης. Το άκρο του σωλήνα συσφίγγεται στο σπείρωμα (62-εικ.38) του κελύφους. Η γεωμετρία είναι υπολογισμένη ώστε η εμπρόσθια πλευρά του να εφάπτεται στο τελικό τμήμα του μονωτικού και να το περιορίζει.

Τέλος γίνεται η σύνδεση του ακροφυσίου και των παροχών.

3.7 Συμπεράσματα

Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε αντιδραστήρας πλάσμα που πληρεί τις προδιαγραφές που τέθηκαν και έχει διαστάσεις παραπλήσιες ενός αναπτήρα. Προγραμματισμένα πειράματα που θα λάμβαναν χώρα μετά το πέρας της διπλωματικής εργασίας θα αποδείκνυαν τη λειτουργικότητα και την αντοχή του.

Τα πολλά, για την εφαρμογή, υποσχόμενα αποτελέσματα, μαζί με το συγκεκριμένο αντιδραστήρα παρουσιάστηκαν σε συνέδριο ιατρικής-πλάσμα [17] στο Τέξας της Αμερικής.

Για την περαιτέρω βελτίωση του προτείνονται:

1. Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του ακροφυσίου για τη ροή και το επιθυμητό εξερχόμενο σχήμα πλάσμα.
2. Η χρήση στελλίτη στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης για μεγαλύτερη αντοχή της διηλεκτρικής επικάλυψης του.
3. Η χρήση πολυμερούς με μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή και καλύτερες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες για το ενδιάμεσο μονωτικό τμήμα, που θα βοηθούσε σημαντικά στην αξιοπιστία του αντιδραστήρα.

Αξίζει να σημειωθεί πως οποιαδήποτε κατεργασία επιτάσσει τη χρήση αντιδραστήρα περιορισμένων διαστάσεων μπορεί να επωφεληθεί από τη συγκεκριμένη διάταξη

Κεφάλαιο 4

4 Εφαρμογή κατεργασίας Ξύλου

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται ο μηχανισμός που αναπτύχθηκε για την πειραματική μελέτη μιας υβριδικής κατεργασίας ψυχρού πλάσματος και χημικών ουσιών καθώς και οι εναλλακτικές μέθοδοι που εξετάστηκαν.

4.1 Εισαγωγή

Χημικά το ξύλο άσχετα από το είδος του, αποτελείται από 40-50% κυτταρίνη (Cellulose). Μόρια γλυκόζης ενώνονται μεταξύ τους, με την εξάλειψη ενός μορίου νερού από κάθε χημική σύνδεση. Η κυτταρίνη είναι ένας σύνθετος υδατάνθρακας που παίρνει τη μορφή βιο-πολυμερούς αλυσίδας με βαθμό πολυμερισμού που μπορεί να φτάσει μέχρι και 10000 [18,19].

Ο μύκητας “*Aureobasidium Pullulans*” που αναπτύσσεται κυρίως σε επιφάνειες ξύλου, προβληματίζει όσους το χρησιμοποιούν σαν πρώτη υλη και ιδιαίτερα τη βιομηχανία κατασκευής παλετών, αφού η ανάπτυξή του τις καθιστά ανθυγιεινές. Μελέτες [20*] έδειξαν πως η κατεργασία με πλάσμα των σπόρων “*A. Pullulans*”, μπορεί να επιφέρει έως και 100% αναστολή στην εκκόλαψη τους.

Είναι γνωστό πως η κατεργασία με πλάσμα μπορεί να μεταβάλει ή να προσδώσει ιδιότητες σε στοιχεία (λ.χ. να τα κάνει υδρόφιλα). Ανάλογα με τις συνθήκες κατεργασίας (πίεση, θερμοκρασία, αέριο μέσο και χρόνος κατεργασίας) επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα (π.χ. ποσοστό υδροφιλίας), ή ακόμα και αντίθετα αποτελέσματα (π.χ. αντί για υδρόφιλα γίνονται υδρόφοβα). Ανάλογα με το υλικό, τις αρχικές και τελικές ιδιότητες του και τις συνθήκες που επικρατούν μετά την κατεργασία, έχουν συγκεκριμένη διάρκεια ζωής.

4.2 Ορισμός προβλήματος

Ένα πειραματικό πρόγραμμα του ερευνητικού κέντρου αφορούσε μια βιομηχανία κατασκευής παλετών. Σκοπός του ήταν η εύρεση εναλλακτικού τρόπου κατεργασίας του ξύλου προς αποφυγή ανάπτυξης μυκήτων. Η μέχρι τότε διαδικασία ήταν η εμφάνιση των έτοιμων παλετών σε χημικές μπανιέρες. Λόγω αντιρρυπαντικής νομοθεσίας έπρεπε να μειωθεί η ποσότητα των τοξικών χημικών στις παλέτες.

Σκοπός της συγκεκριμένης διάταξης ήταν η κατεργασία ξύλου με το παράγωγο της εκκένωσης DBD και χημικού και η μελέτη των αποτελεσμάτων με σκοπό την εύρεση των συνθηκών κατεργασίας που θα επιφέρει τα αντίστοιχα αποτελέσματα με την εμφάνιση κάνοντας ελάχιστη χρήση χημικής ουσίας. Έπρεπε λοιπόν να βρεθεί ένας τρόπος κατεργασίας της πρώτης ύλης (των μορφοποιημένων κομματιών ξυλείας δηλαδή), που να τα θωρακίζει ενάντια στους μύκητες προτού συναρμολογηθούν σε παλέτες.

Ο μηχανισμός με τις κατάλληλες προσαρμογές θα χρησιμοποιούταν μελλοντικά στη γραμμή παραγωγής του εργοστασίου. Για το λόγο αυτό όλες οι κατασκευαστικές λύσεις έπρεπε να χρησιμοποιούν το πλάσμα που παράγει αντιδραστήρας DBD του εμπορίου και μπορεί να υποστηριχτεί επίσημα από τον κατασκευαστή του. Το εργαστήριο είχε εξοπλιστεί με αντιδραστήρα DBD όπου το εξερχόμενο πλάσμα είχε το σχήμα κουρτίνας.

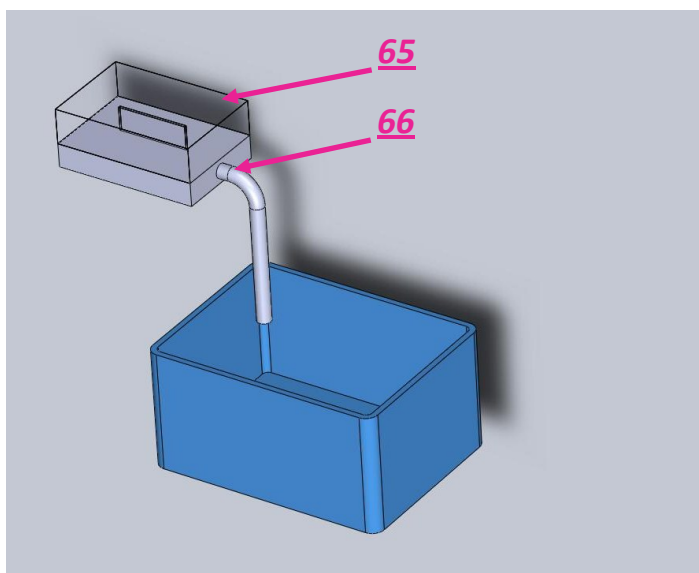
4.3 Αρχική προσέγγιση του προβλήματος

Αρχικά αυτό που ζητήθηκε από τους ερευνητές του εργαστηρίου ήταν η κατασκευή μιας διάταξης εμπλουτισμού του χημικού με το αέριο παράγωγο της εκκένωσης. Οι λύσεις που δόθηκαν βασίστηκαν σε δύο ιδέες.

- Στη πρώτη το afterglow διοχετεύεται από τον αντιδραστήρα σε ένα δοχείο που εμπεριέχει τη χημική ουσία. Στη συνέχεια η ουσία εφαρμόζεται στο ξύλο,
- ενώ στη δεύτερη αναμιγνύεται με το χημικό στην έξοδο του αντιδραστήρα και στη συνέχεια έρχεται σε επαφή με το ξύλο.

Σε όλες τις περιπτώσεις αφού η απαιτούμενη συγκέντρωση του χημικού δεν ήταν γνωστή θα έπρεπε να είναι δυνατή η χρήση είτε αυτούσιου είτε σε μορφή διαλύματος.

Στην εικόνα 39 απεικονίζεται μια διάταξη βασισμένη στην ιδέα διοχέτευσης του πλάσματος στο εσωτερικό δοχείου με χημικό.

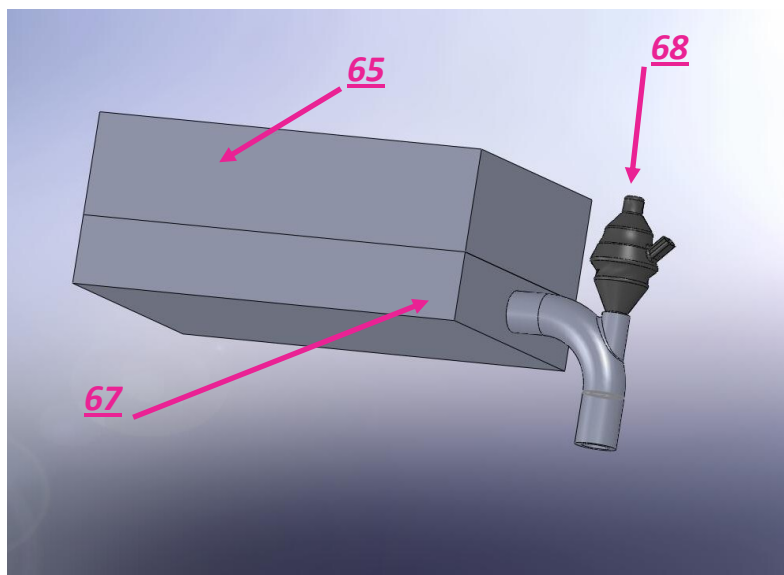


Εικόνα 39

Παράδειγμα διάταξης που το πλάσμα τροφοδοτείται σε δοχείο που περιέχει το χημικό. Ο αντιδραστήρας DBD (65) είναι συνδεδεμένος σε τμήμα (66) που κατευθύνει το πλάσμα μέσα στο δοχείο.

Οι εικόνες 40 και 41 απεικονίζουν δυο διατάξεις βασισμένες στην ιδέα ανάμιξης χημικού με πλάσμα κατά την έξοδο του από τον αντιδραστήρα.

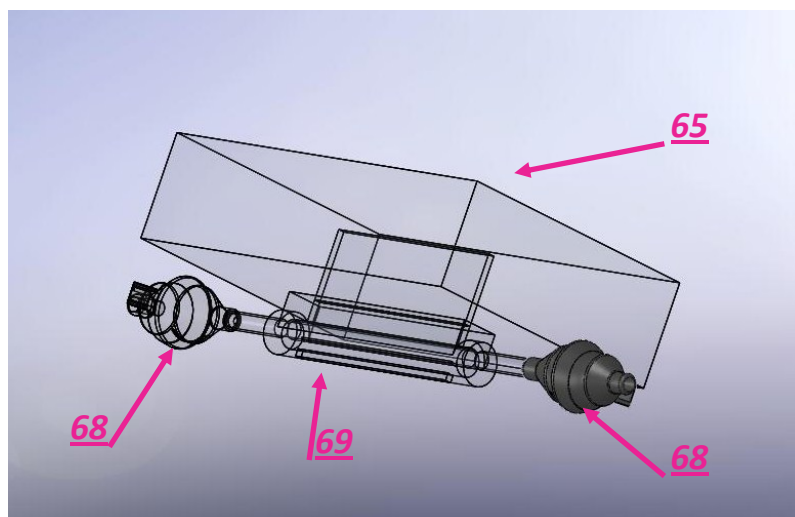
Στην εικόνα 40 το πλάσμα τροφοδοτείται σε καμπτόμενο αγωγό κυκλικής διατομής που κατευθύνει την έξοδο του, στην προς κατεργασία επιφάνεια. Στο σημείο καμπής είναι τοποθετημένο το ακροφύσιο που ψεκάζει το χημικό.



Εικόνα 40

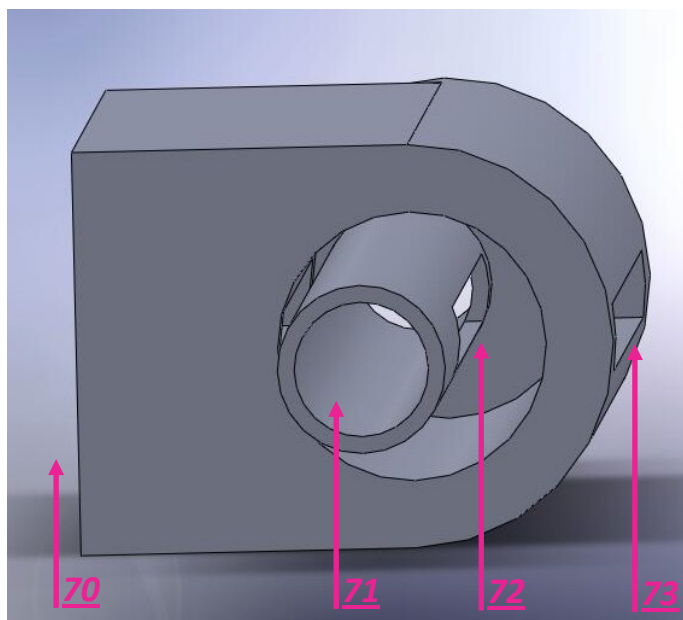
Ο αντιδραστήρας DBD (65), τμήμα τροφοδοσίας του πλάσματος (67) και ακροφύσιο ψεκασμού του χημικού (68).

Μια εναλλακτική της ιδέας αυτής απεικονίζεται στην εικόνα 41 όπου το χημικό ψεκάζεται από τα πλαϊνά του αντιδραστήρα και αναμιγνύεται με το πλάσμα λόγω της γεωμετρίας της σωλήνωσης που απεικονίζεται στις εικόνες 42 και 43.



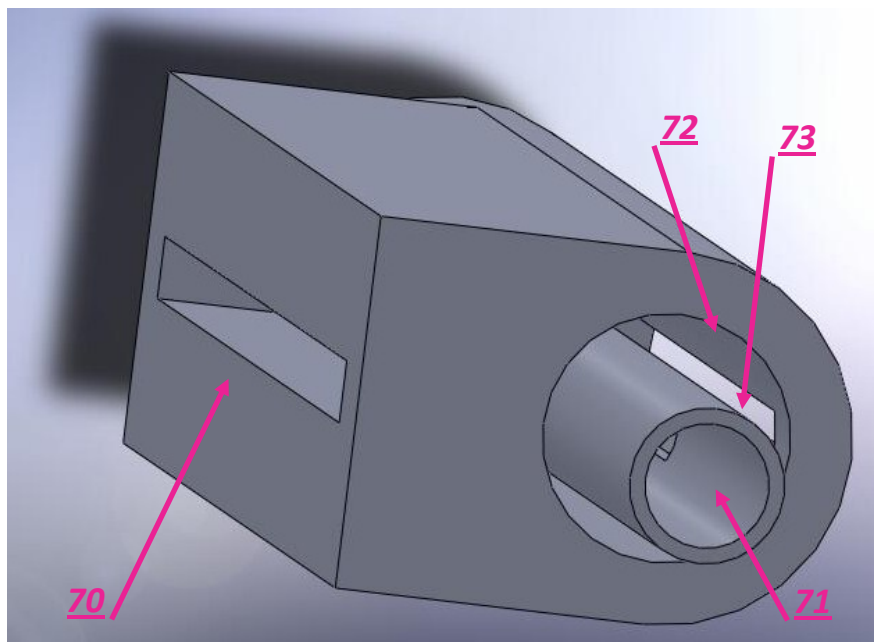
Εικόνα 41

Ο αντιδραστήρας (65) με τα ακροφύσια ψεκασμού του χημικού (68) και το σύστημα ανάμειξης (69).



Εικόνα 42

Ο αντιδραστήρας DBD προσαρμόζει στο άκρο (70) ενώ στο σωλήνα (71) εγχέεται το χημικό. Λόγω της χαμηλής πίεσης που δημιουργείται στο τμήμα (72) από την αποκόλληση της ροής του πλάσμα λόγω του σωλήνα (71) γίνεται ανάμειξη και το μείγμα εξέρχεται από το άκρο (73).



Εικόνα 43

Όμοια με την 42, ο αντιδραστήρας DBD προσαρμόζει στο άκρο (70) ενώ στο (71) εγχέεται το χημικό. Λόγω της χαμηλής πίεσης που δημιουργείται στο τμήμα (72) από την αποκόλληση της ροής του πλάσμα λόγω του σωλήνα (71) γίνεται ανάμειξη και το μείγμα εξέρχεται από το (73).

Να σημειωθεί πως στις εικόνες 42 και 43 ο σωλήνας (71) συγκρατείται από τμήμα που δεν φαίνεται για να είναι ορατό το εσωτερικό του μηχανισμού. Άρα η μόνη έξοδος του πλάσματος είναι από το εμπρόσθιο τμήμα (72).

Προσπαθώντας να γίνει κατανοητή η χημική διαδικασία και μετά από επαφές και συζητήσεις με τη διδακτορικό που εργαζόταν ήδη στο πρόγραμμα, επικεντρώθηκαν σε μια πληροφορία που πηρά για το αποτέλεσμα της επιφανειακής κατεργασίας του ξύλου με πλάσμα εκκένωσης DBD αζώτου. Το ενεργοποιημένο αέριο, όταν προσέκρουε στην επιφάνεια του, δέσμευε ένα υδροξύλιο από κάθε μονομερές της αλυσίδας της κυτταρίνης. Ο δεσμός που ελευθερωνόταν ήταν πιθανό να μπορούσε να δεχτεί το μόριο του χημικού. Εάν αυτό ήταν δυνατό, δεν θα χρειαζόταν πλέον να εισχωρήσει σε μεγάλες ποσότητες στο εσωτερικό του ξύλου προκειμένου να το θωρακίσει από τους μύκητες.

Η διδακτορικός διεξήγαγε νέα πειράματα και διαπίστωσε πως η κατεργασία του ξύλου πρωτίστως με το afterglow και μετά με τη χημική ουσία, επέφερε τα ίδια αποτελέσματα στην ανάπτυξη μυκήτων χρησιμοποιώντας μόνο το ένα χιλιοστό της αρχικής χημικής ποσότητας. Δεν ήταν ακόμα γνωστό όμως το αν θα έπρεπε να κατεργαστεί και το χημικό (ίσως για να ελευθερωθεί κάποιος δεσμός και σε αυτό), για πόση ώρα και υπό ποιές συνθήκες.

Οι χημικές ενώσεις που δοκιμάστηκαν ήταν οι:

- γλυκιδυλαιθέρας τριμεθυλαμμωνίου (Glycidyl Trimethyl Ammonium Chloride),
- χλωριούχο βενζαλκόνιο (Benzalkonium Chloride),
- δωδέκυλο γλυκιδυλαιθέρας διμεθυλεστέρας χλωριούχου αμμωνίου (Glycidyl Dimethyl Docecyl Ammonium Chloride).

Η τελική διάταξη έφερε ψεκαστήρα που μπορούσε να προσανατολιστεί προς όλες τις κατευθύνσεις αφού ο μηχανισμός συγκράτησης του είχε 6 βαθμούς ελευθερίας. Με αυτό τον τρόπο θα γινόντουσαν πειράματα για διαφορετικές αποστάσεις και γωνίες πρόσπτωσης του χημικού στο ξύλο. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, τμήματα ξυλείας μετακινούνταν στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα πάνω σε ταινιόδρομο, οπότε η κατεργασία γινόταν αδιάκοπα υπό τη συνεχή ροή χημικού και πλάσματος.

Η διδακτορικός βασίζομενη στους αρχικούς υπολογισμούς της για την ταχύτητα μεταφοράς του ξύλου στον ταινιόδρομο και της ροής του εξερχόμενου από τον αντιδραστήρα πλάσματος, θεώρησε πως η απαιτούμενη ποσότητα χημικού ήταν 100ml/s. Έγινε διερεύνηση για ακροφύσιο ψεκαστήρα του εμπορίου που θα μπορούσε να αποδώσει αυτή την ποσότητα ομοιόμορφα στο χρόνο. Βρεθήκαν κάποιες λύσεις που απεικονίζονται παρακάτω στην εικόνα 44.



Εικόνα 44

Στην εικόνα 44 απεικονίζονται τα ακροφύσια ψεκασμού για ποσότητες έως τα 100ml/s.

Στη συνέχεια διαπιστώθηκε πως οι υπολογισμοί της ήταν εσφαλμένοι και αποφάσισε πως η αναγκαία ποσότητα ήταν το 1ml/s. Μια τέτοια “μικρή” ποσότητα για να αποδοθεί ομοιόμορφα στο χρόνο απαιτεί μηχανισμό υψηλής ακριβείας. Η πρόταση που έγινε από πλευράς μου ήταν να αγοραστεί ένας εξατμιστήρας ICPMS αφού αυτές οι συσκευές είναι μελετημένες να αποδίδουν ομοιόμορφα μέχρι και 0,1ml/s. Κάτι τέτοιο δεν ήταν δυνατό λόγω του υψηλού του κόστους.

Η αμέσως καλύτερη λύση μετά από το ICPMS, ήταν ένα ακροφύσιο της εταιρίας BETE με κωδικό SF150 που χρησιμοποιεί αέριο σαν προωθητικό μέσο (στη συγκεκριμένη εφαρμογή θα ήταν άζωτο). Επιτυγχάνει την ομοιόμορφη απόδοση υγρών στο χρόνο σε ποσότητες από 0,47ml/s έως 1,41ml/s συναρτήσει της πίεσης τροφοδοσίας του αερίου αζώτου και του υγρού χημικού. Αν και το άζωτο θα επηρεάσει λίγο την αποτελεσματικότητα του πλάσματος στην κατεργασία δεν υπάρχει κάτι άλλο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε αυτό το κόστος και να προσφέρει τόσο ομοιόμορφο ψεκασμό σταγονιδίων.

Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται η αποδιδόμενη ποσότητα ψεκασμού του ακροφυσίου βάση της πίεσης τροφοδοσίας του προωθητικού αερίου και του χημικού.

Spray Set-Up Number	Fluid Cap and Air Cap Numbers	ATOMIZING AIR		Liquid Capacity in l/h (Liters Per Hour)								Spray Dimensions at 200 mm Siphon Height				
		Air (bar)	Air Capacity (Nm ³ /h)	Gravity Head				Siphon Height				Air (bar)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (m)
				450 mm	300 mm	150 mm	100 mm	200 mm	300 mm	600 mm	900 mm					
SF150	Fluid Cap FC2 & Air Cap AC1103	1.5	4.08	5.1	4.8	4.5	3.8	3.7	3.5	3.0	2.4	1.5	190	230	270	3.4
		2.0	4.68	4.9	4.7	4.4	3.6	3.4	3.2	2.9	2.3	2.0	200	250	280	3.4
		3.0	6.18	3.4	3.2	3.0	2.2	2.0	1.7			3.0	220	270	300	3.0
		3.5	7.02	2.2	2.0	1.7										

Πίνακας 2

Ακολουθεί ο ψεκαστήρας SF150 της BETE στην εικόνα 45.



Εικόνα 45

Ακροφύσιο ψεκασμού SF150 της BETE για ποσότητες από 0,47ml/s έως τα 1,41ml/s. Αριστερά διακρίνεται η είσοδος του αερίου ενώ δεξιά η είσοδος του υγρού.

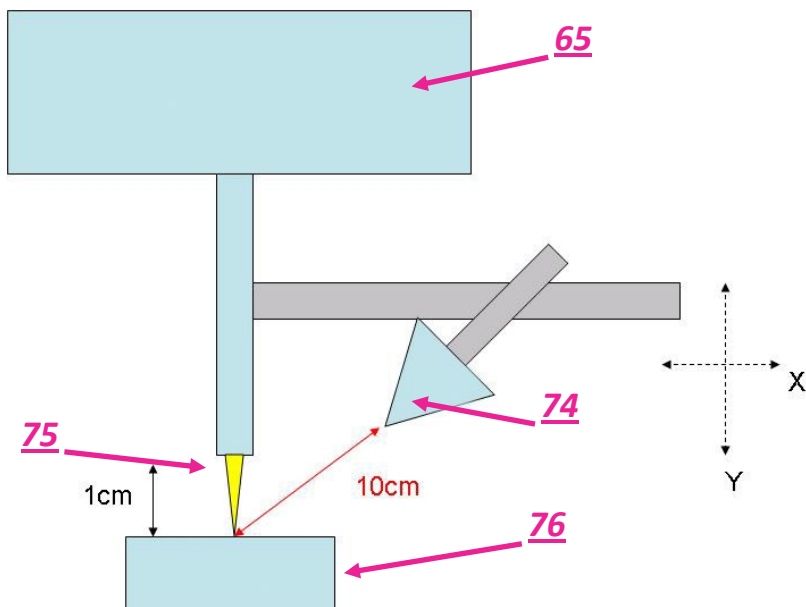
Στην εικόνα 46 φαίνεται το στόμιο του ψεκαστήρα.



Εικόνα 46

Στόμιο ψεκασμού

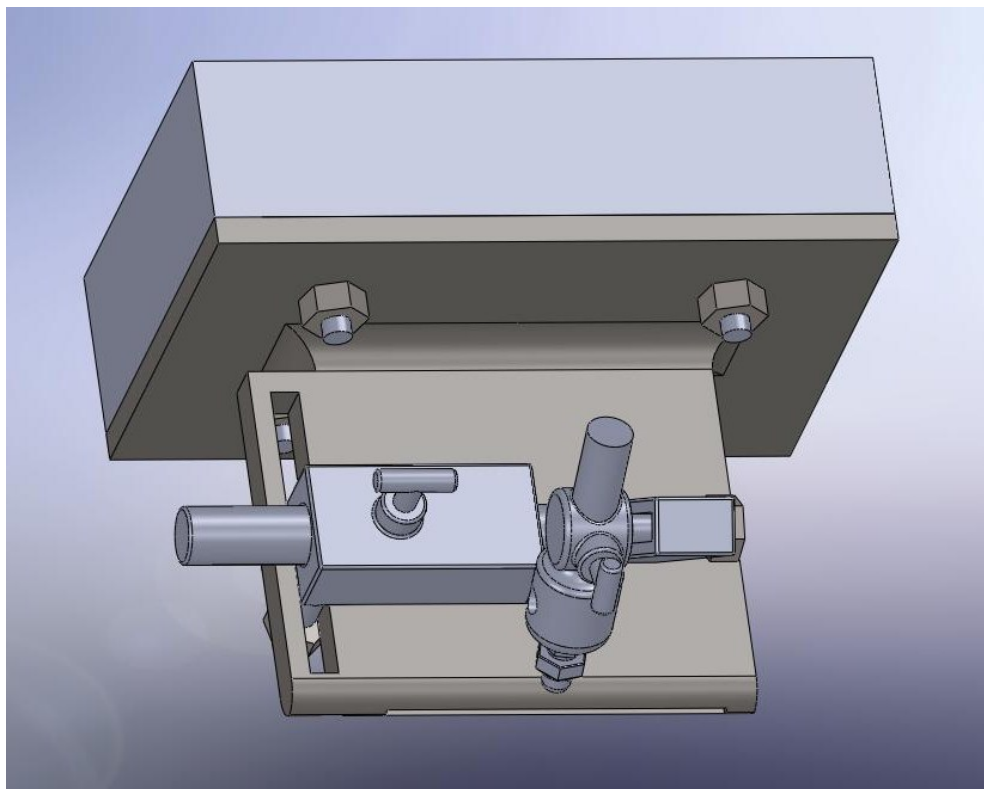
Ακολουθεί σχεδιάγραμμα της διάταξης στην εικόνα 47



Εικόνα 47

Η διάταξη με τον αντιδραστήρα DBD (65) και τον ψεκαστήρα (74). Η κατασκευή που τον συγκρατεί και κατευθύνει το πλάσμα στη θέση (75) (έξοδος). Ενώ το ξύλο (76) περνά από κάτω τοποθετημένο πάνω σε ταινιόδρομο.

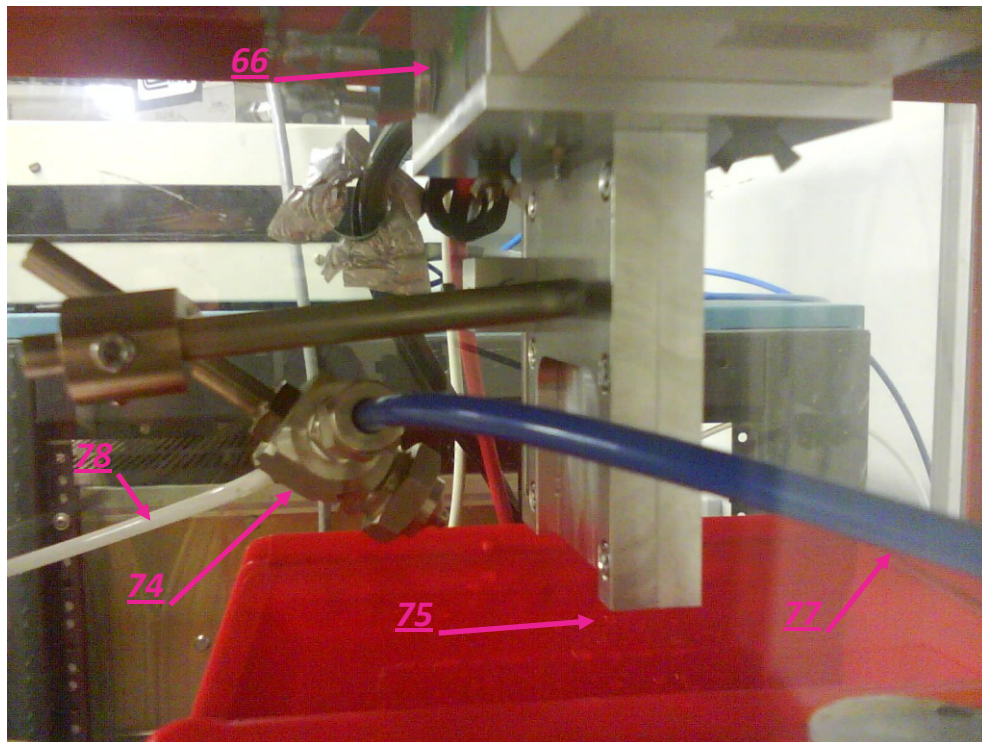
Ακολουθεί στην εικόνα 48 το μοντέλο CAD που σχεδιάστηκε στο SolidWorks



Εικόνα 48

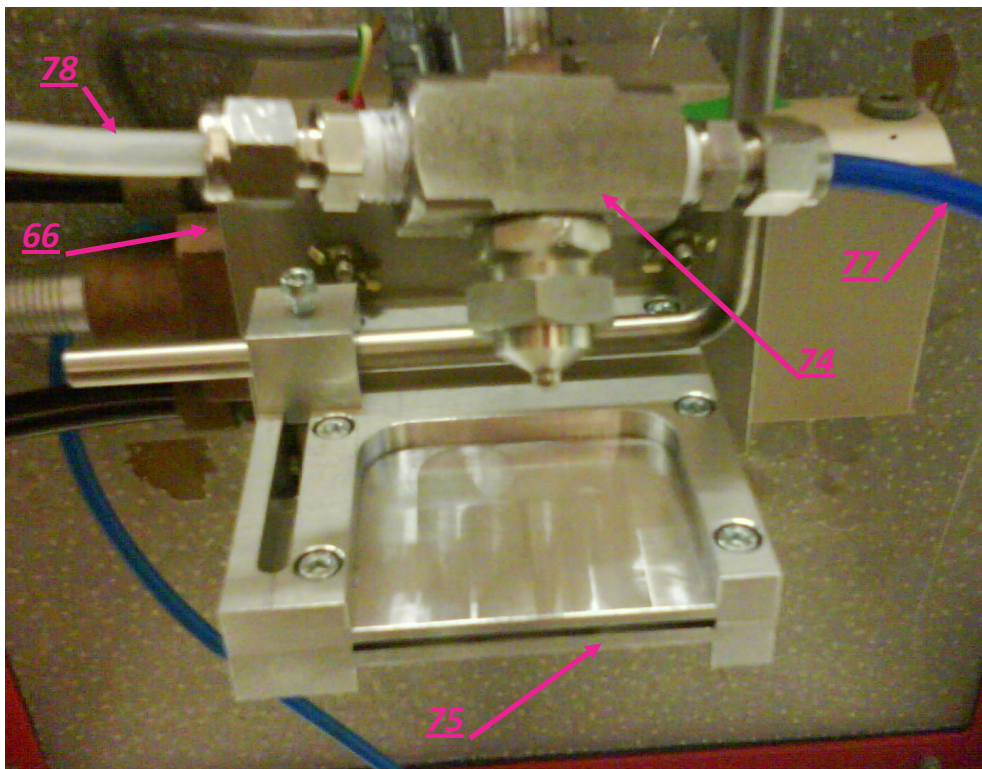
Η διάταξη όπως σχεδιάστηκε στο SolidWorks.

Ακολουθούν οι εικόνες 49, 50 και 51 με την διάταξη συναρμολογημένη



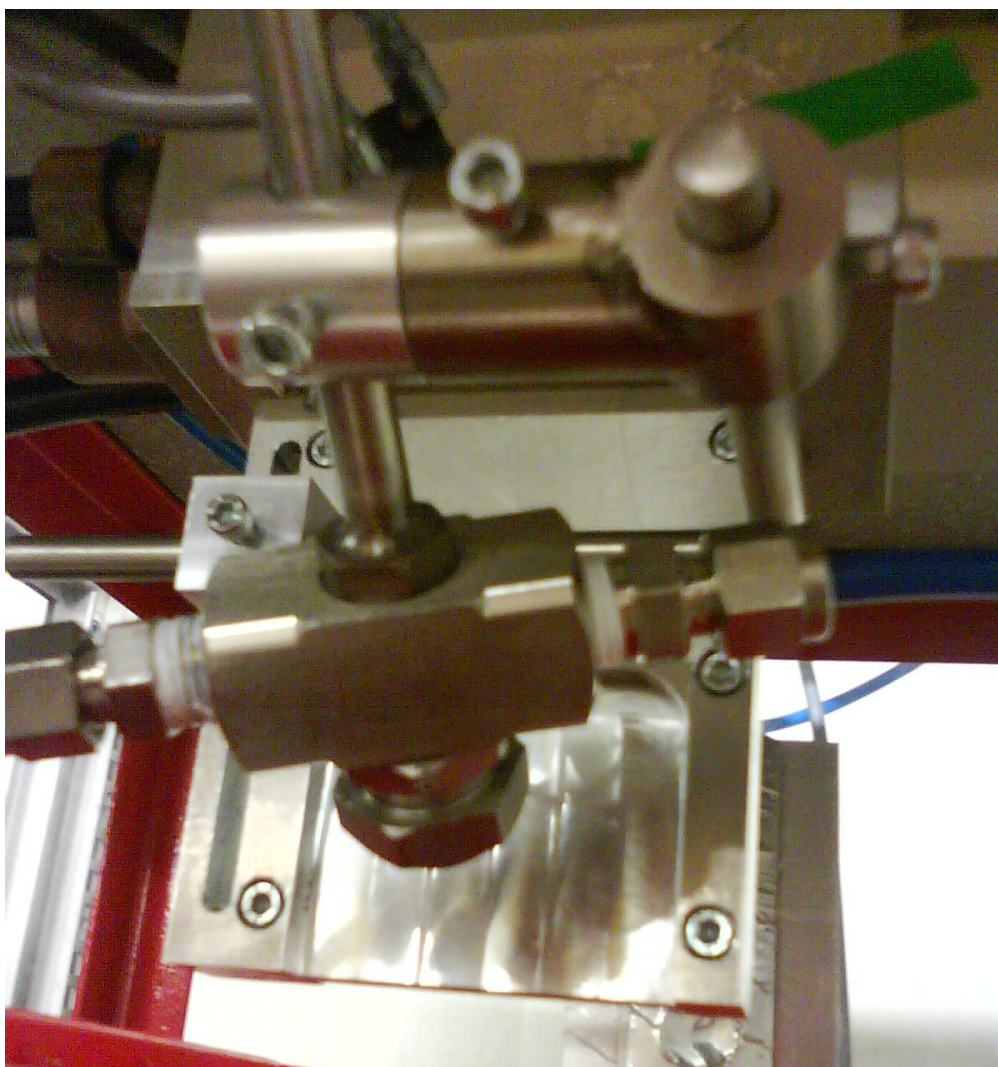
Εικόνα 49

Συναρμολογημένη συσκευή με αρίθμηση όμοια της εικόνας 47. Παροχή αζώτου (77) και χημικού (78).



Εικόνα 50

Διαφορετική γωνία απεικόνισης με αρίθμηση όμοια της εικόνας 49.



Εικόνα 50

Η διάταξη όπως διαφαίνεται από το σημείο συγκράτησης του ψεκαστήρα.

4.4 Συμπεράσματα

Η διάταξη λειτούργησε επιτυχώς και βοήθησε τους ερευνητές να πειραματιστούν με τις συνθήκες της κατεργασίας. Σκοπός ήταν η εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού ταχύτητας του ταινιόδρομου μεταφοράς του ξύλου άρα και του χρόνου έκθεσης του στο πλάσμα, σε συνδυασμό με την ποσότητα της χημικής βαφής και της γωνίας πρόσπτωσης.

Εάν τα αποτελέσματα κρίνονταν ικανοποιητικά ώστε οι κατεργασμένες επιφάνειες να έχουν την επιθυμητή αντοχή στην ανάπτυξη μυκήτων, η διάταξη θα μπορούσε να προσαρμοστεί στη γραμμή παραγωγής του εργοστασίου. Ο μηχανισμός συγκράτησης του ψεκαστήρα με τους έξι βαθμούς ελευθερίας, θα αντικαθιστούταν από ένα σταθερό τμήμα που θα τον τοποθετούσε στην επιθυμητή θέση, βάση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Για να γίνει η ταυτόχρονη κατεργασία της απαραίτητης ποσότητας ξυλείας στη γραμμή παραγωγής του εργοστασίου, θα γινόταν ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών διατάξεων σε σειρά.

5 Γενικά συμπεράσματα

Οι κατεργασίες πλάσμα έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών, κάποιες από τις οποίες παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στη παρούσα εργασία. Συνοψίζοντας παρατίθενται τα συμπεράσματα που αποκομίσθηκαν κατά τη διαδικασία της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας

Η κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης ακόμα και στην περίπτωση που θεωρητικά είναι απλή, στην πράξη μπορεί να αποδειχτεί ιδιαίτερα πολύπλοκη, αφού πρέπει να αντιμετωπιστούν πολλά κατασκευαστικά προβλήματα.

Κάθε πειραματική διάταξη πρέπει να είναι ιδιαίτερα ακριβής, να έχει μεγάλο εύρος λειτουργίας, να είναι ασφαλής και να απομονώνει όσων το δυνατόν περισσότερους εξωγενείς παράγοντες από τις μετρήσεις. Σε αντίθετη περίπτωση βάζει σε κίνδυνο τους ερευνητές και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Η κατασκευή αντιδραστήρα πλάσμα περιορισμένου όγκου όπως αυτός που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3 είναι ουσιαστική για τις κατεργασίες πλάσμα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε εφαρμογή είναι αναγκαία η χρήση ενός ευέλικτου αντιδραστήρα μικρών διαστάσεων. Με το σχεδιασμό και την κατασκευή κατάλληλου κυκλώματος τροφοδοσίας, μπορεί να αποκτήσει εξαιρετική φορητότητα για τοπικές εφαρμογές σε οποιοδήποτε χώρο.

Η κατασκευή διάταξης με σκοπό τη μετέπειτα χρήση της σε γραμμή παραγωγής εισάγει νέα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού. Πρέπει να συμπεριληφθούν παράγοντες όπως δυνατότητα διεύρυνσης σε μεγάλη κλίμακα (Upscaling), τρόποι τροφοδοσίας υλικών, κόστος κατασκευής και κατεργασίας, αξιοπιστία, εκτεταμένη λειτουργία, ελάχιστη δυνατή συντήρηση και ικανοποιητική αντοχή σε καταπονήσεις (ανάλογα με το χώρο λειτουργίας μπορεί να είναι μηχανικές, τοξικές, θερμικές κ.ο.κ.). Ακόμα πρέπει να γίνει γενικότερη οικονομοτεχνική μελέτη για τον τρόπο προσαρμογής της διάταξης στον υπάρχον εξοπλισμό.

6 Βιβλιογραφία

- 1 SolidWorks Tutorials Official SolidWorks website www.solidworks.com
- 2 SolidWorks Tutorials YouTube videos
- 3 Goodstein, David L, States of Matter. Courier Dover Publications 2002
- 4 Shultis J, Kenneth F, Richard E, Fundamentals of Nuclear Science and Engineering, 2002
- 5 Siegfried R, From Elements to Atoms “A History of Chemical Composition” 2002
- 6 Daintith J, Biographical Encyclopedia of Scientists, 943, 1994
- 7 Britannica Encyclopedia, 2009
- 8 <http://scitation.aip.org/jvsta/> Journal of Vacuum Science and Technology A
- 9 www.avv.org American Vacuum Society
- 10 Tonks L, Amer.J.Phys. 35, 857-858, 1967
- 11 Rogoff G L, IEEE Trans on Plasma Science 19, 989, 1991
- 12 Brown S C, “Gaseous Electronics”, 1, 1-18, 1978
- 13 Mott-Smith H M, Nature 233, 219, 1971
- 14 Langmuir I, Proc. Nat. Acad. Sci. 14, 628, 1971
- 15 Kogelschatz U, “Chapter 2.1: History of Non-Equilibrium Air-Plasmas – Introduction” in “Non-equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure” ed.IOP Bristol UK, 2004
- 16 Kogelschatz U and Salge J, “Chapter 13: High Pressure Plasmas: dielectric barrier and corona discharges-properties and technical applications” in “Low Temperature Plasma Physics: Fundamental Aspects and Applications” ed.Wiley-VCH 2001
- 17 F Clément, N Merbahi, L Marlin, M Mangin, E Panousis, A Garyfallos, A Ricard, M Yousfi and B Held: “Electrical and Optical Studies of two Dielectric Barrier Discharge Atmospheric Pressure Reactors in bipolar and monopolar pulsed conditions for biomedical applications” in “2nd International Conference on Plasma Medicine (ICPM-2)”,San Antonio, Texas, USA
- 18 Sjostrom E, Wood Chemistry. Fundamentals and Applications SE, Acad. Pr. 292, 1993

- 19 Klemm D, Haublein B, Fink H, Bohn A. Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angew Chem, Int Ed.*44, 3358-3393, 2005
- 20 E Lecoq, C Leclaire, F Clément, G Orial, E Panousis and A Ricard, “Parametric study of afterglows issued from dielectric Barrier Discharges in nitrogen and air and applied on *Aureobasidium fungi*”, IOP, *Journal of Physics- Conference Series* 2009

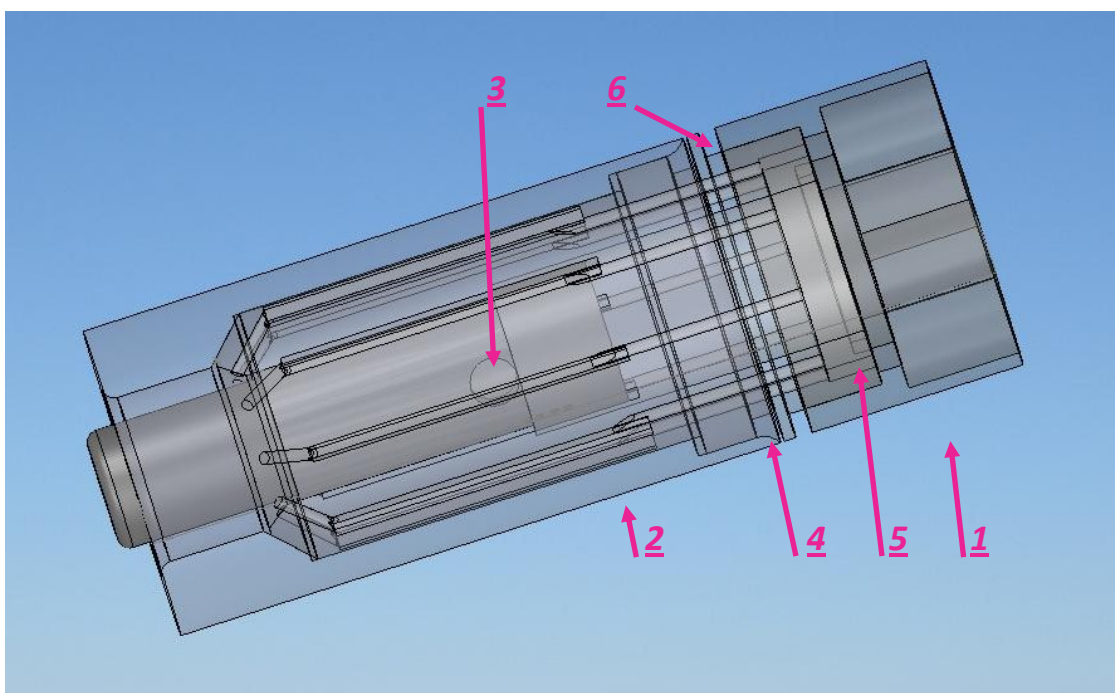
Παραρτήματα

7 Παράρτημα Ι: Προσχέδια μικρού αντιδραστήρα 3^{ου} κεφαλαίου

Στις εικόνες που ακολουθούν διαφαίνονται τα ενδιάμεσα στάδια σχεδιασμού έως ότου ο αντιδραστήρας πάρει τη τελική του μορφή. Όλες οι περιπτώσεις ακολουθούν την ιδέα της ομοαξονικής διάταξης με τη σχέση μήκους αλληλεπίδρασης-διαμέτρου 2:1 για τη σωστή ευθυγράμμιση τους. Οι κύριες αλλαγές εντοπίζονται στο ενδιάμεσο μονωτικό τμήμα των ηλεκτροδίων, όπου κατά την πορεία του σχεδιασμού, έγινε προσπάθεια περιορισμού των διαστάσεων του και απλοποίησης των κατεργασιών παραγωγής του.

7.1 Πρώτη έκδοση

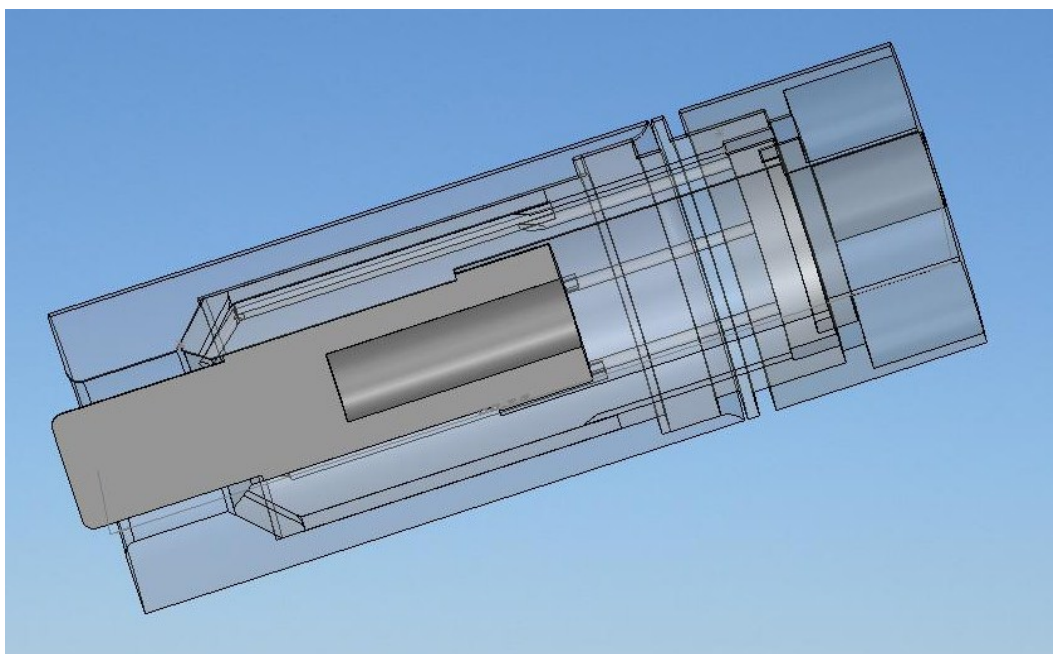
Η πρώτη ολοκληρωμένη έκδοση διαφαίνεται στις εικόνες 1 έως και 5.



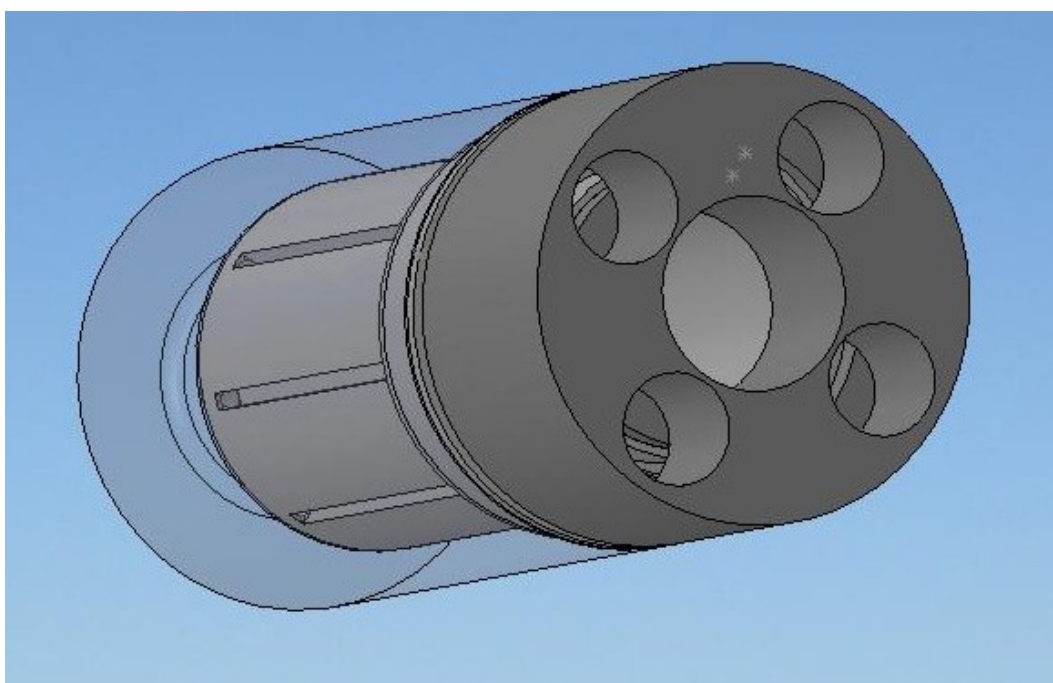
Εικόνα 1

Στην πρώτη περίπτωση το (1) είναι το οπίσθιο τμήμα, ενώ (2) το εμπρόσθιο. Η σύνδεση των δυο γίνεται στο (6) μέσω σπειρώματος. Οι θέσεις (4) και (5) είναι για τους δακτυλίους στεγανοποίησης (O-ring). Η οπή στη θέση (3) είναι για τη σύσφιξη του αγωγού στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης μέσω βίδας Allen.

Το κυρίως σώμα (3) έχει αρσενικό σπείρωμα για να προσαρμόζει με το οπίσθιο τμήμα (1) στη θέση (6). Η σύνδεση του αερίου γίνεται από τέσσερις σωλήνες στο πίσω τμήμα του (εικ.3).

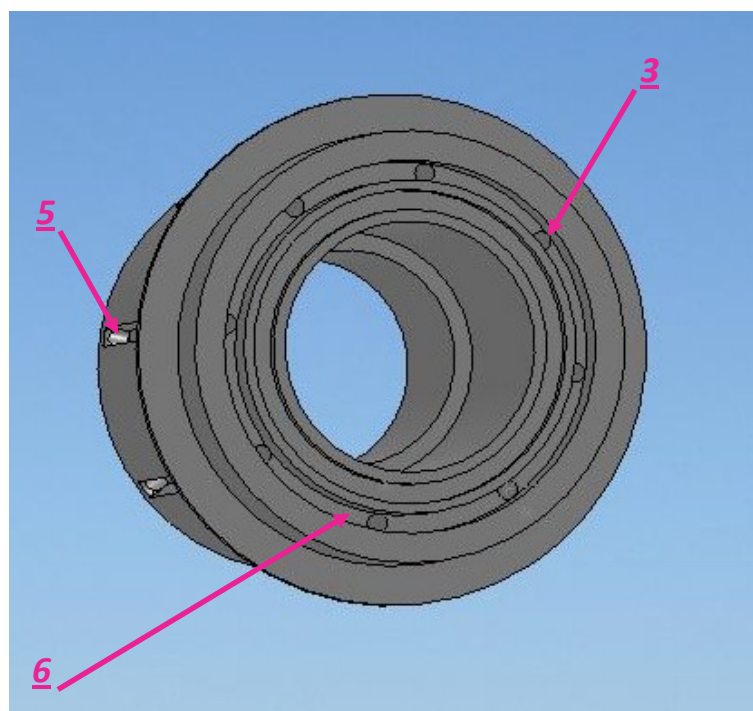


Εικόνα 2
Τομή του αντιδραστήρα.



Εικόνα 3
Οι τέσσερις οπές σύνδεσης του αερίου στο πίσω τμήμα του αντιδραστήρα.

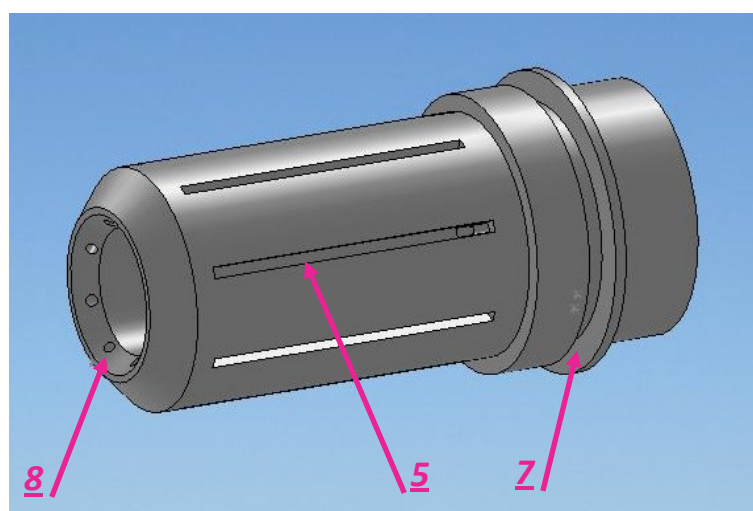
Στην εικόνα 4 και 5 διακρίνεται το ενδιάμεσο μονωτικό τμήμα. Οι οπές (3) που κατευθύνουν το αέριο στις περιμετρικές αυλακώσεις (5) και στη συνέχεια στις εμπρόσθιες οπές (8-εικ.5).



Εικόνα 4

Εσωτερικό στεγνωτικό o-ring (6), οπές κατεύθυνσης της ροής (3), περιμετρικές αυλακώσεις (5)

Η αυλάκωση (6) συγκρατεί τον εξωτερικό στεγνωτικό δακτύλιο O-ring.

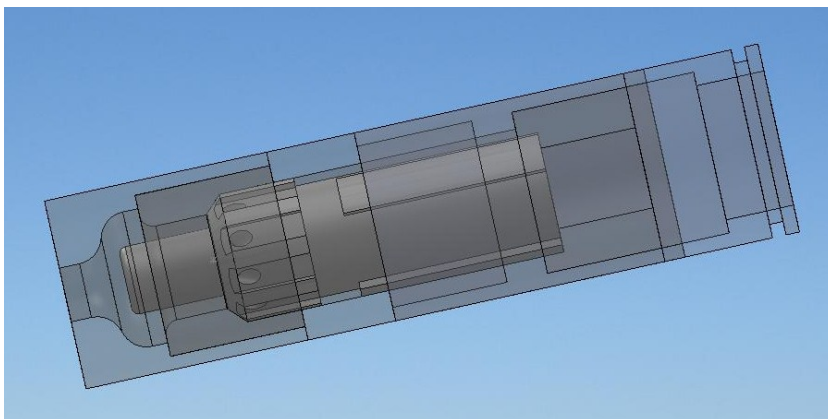


Εικόνα 5

Περιμετρικές αυλακώσεις κατεύθυνσης της ροής (5), αυλάκωση εξωτερικού δακτυλίου στεγανοποίησης (7) και οπές κατεύθυνσης της ροής στο διάκενο (8)

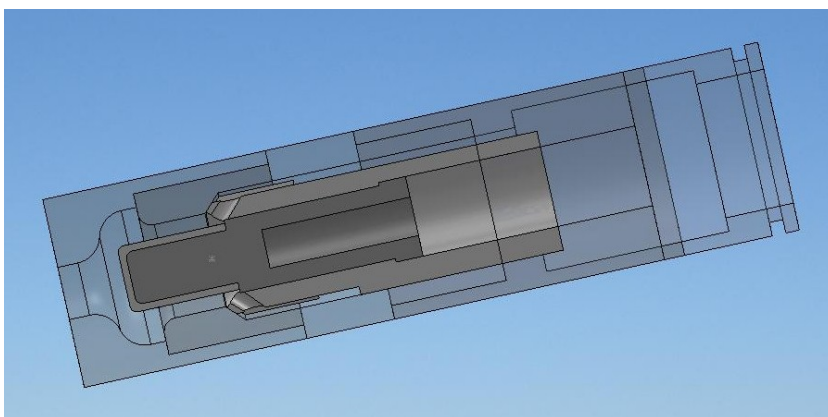
7.2 Δεύτερη έκδοση

Στη δεύτερη περίπτωση το ενδιάμεσο μονωτικό τμήμα άλλαξε ολοκληρωτικά. Η γεωμετρία του είναι απλούστερη και έχει μικρότερες διαστάσεις. Έχουν γίνει οι αρχικοί υπολογισμοί για την ενεργό διατομή της ροής, ενώ οι περιμετρικές αυλακώσεις είναι πλέον σε δυο στάδια. Το πρώτο στο οπίσθιο τμήμα έχει το ρόλο του ενδιάμεσου όγκου για καλύτερη ομογενοποίηση ενώ το δεύτερο διαχωρίζει τη ροή στις αντίστοιχες οπές.



Εικόνα 6
Δεύτερη έκδοση

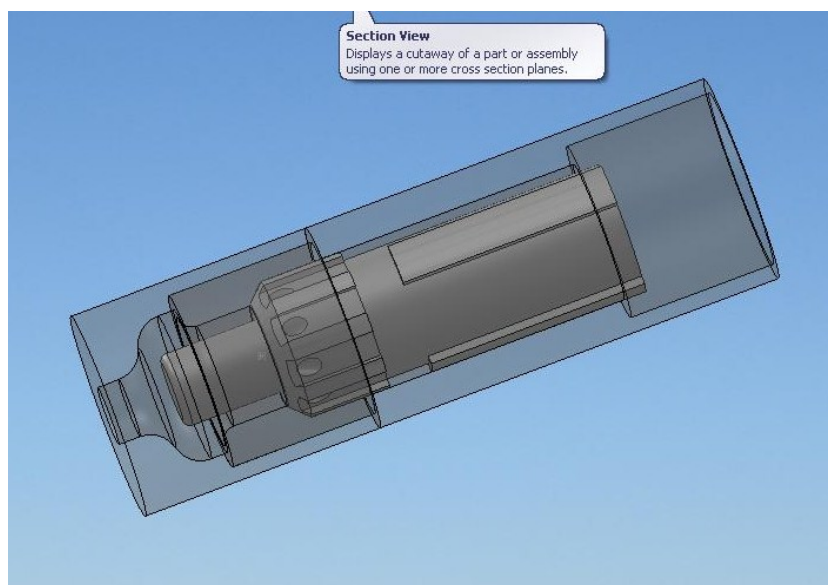
Ήταν αποφασισμένο πλέον, η τροφοδοσία να γίνεται από ομοαξονική διάταξη και στην εικόνα 9 διακρίνεται ο ταχυσύνδεσμος για τη σωλήνωση αερίου. Η γεωμετρία και ο τρόπος συναρμογής των τμημάτων παραμένει σύνθετος αν και έχει διαφοροποιηθεί από την πρώτη έκδοχή. Για την ευθυγράμμιση και τη συγκράτηση του ενδιάμεσου μονωτικού, απαιτούνται 3 τμήματα. Ενώ πρέπει να προστεθούν ακόμα, το ακροφύσιο και ο ταχυσύνδεσμος αερίου.



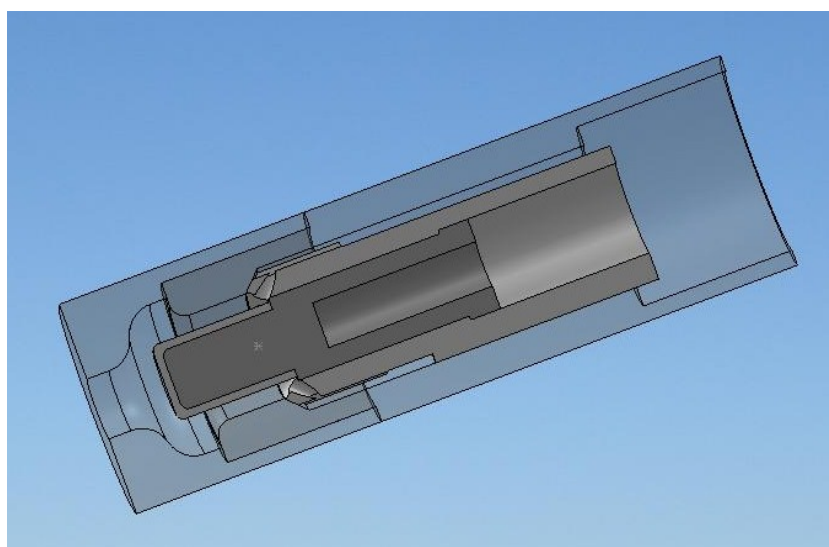
Εικόνα 7
Τομή δεύτερης έκδοσης

7.3 Τρίτη έκδοση

Στην τρίτη περίπτωση αλλάζει το σχήμα του κυρίως σώματος και γίνεται κατά πολύ απλούστερο. Το μήκος του γίνεται κατά πολύ μικρότερο αφού απουσιάζουν οι ενδιάμεσες συνδέσεις. Ο ταχυσύνδεσμος της σωλήνωσης αερίου δεν χρησιμοποιείται πλέον. Η συγκράτηση του ενδιάμεσου μονωτικού επιτυγχάνεται από το άκρο σύνδεσης της σωλήνωσης υψηλής πίεσης.



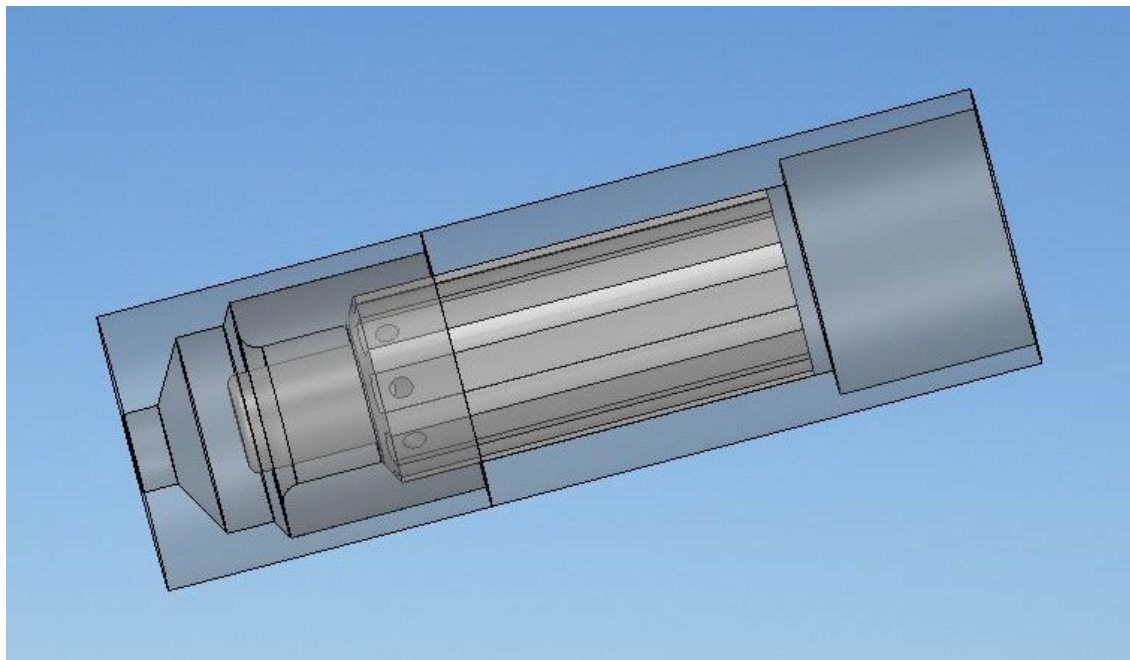
Εικόνα 8
Τρίτη έκδοση



Εικόνα 9
Τομή τρίτης έκδοσης

7.4 Τελική μορφή

Στη τελική έκδοση αλλάζουν οι διαστάσεις αφού γίνεται περαιτέρω μελέτη των διηλεκτρικών αντοχών κάθε τμήματος. Το ενδιάμεσο μονωτικό γίνεται ακόμα μικρότερο και απλούστερο. Είναι πλέον ομοιόμορφο αφού λόγω αλλαγών στη σωλήνωση παροχής αερίου, δεν είναι απαραίτητος ο ενδιάμεσος όγκος ομογενοποίησης. Το ηλεκτρόδιο αποκτά οπή για κονέκτορα τύπου μπανάνα και το σχήμα του ακροφυσίου αλλάζει για να γίνει απλούστερο κατασκευαστικά και να έχει καλύτερα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 10
Τελικός αντιδραστήρας.