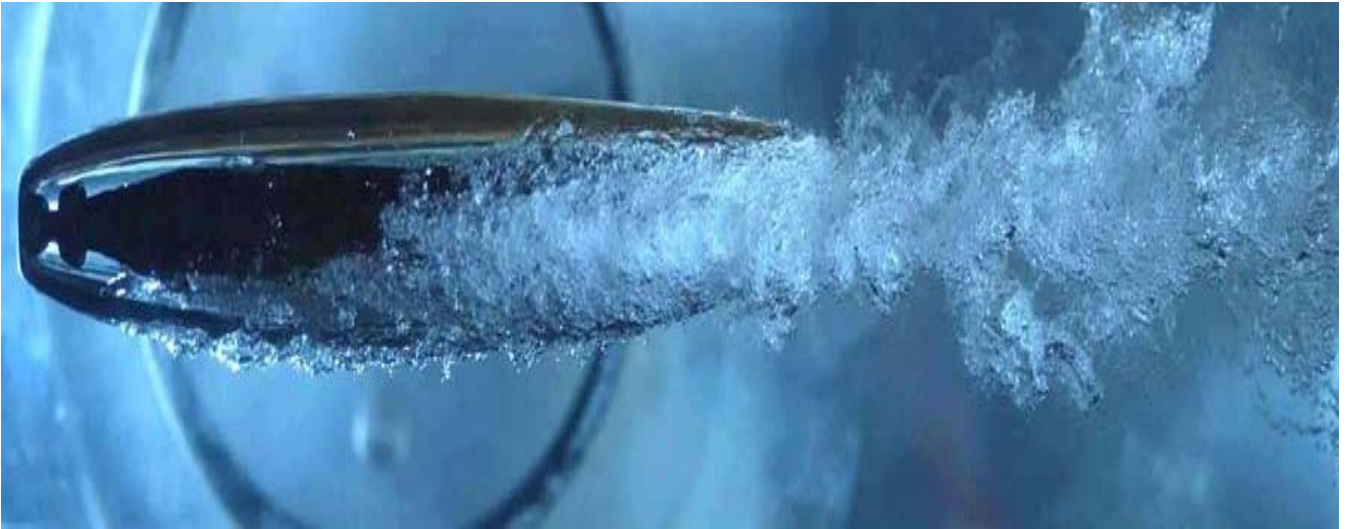


**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΠΕΡΣΠΗΛΛΙΩΣΗΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΓΡΙΒΟΓΙΑΝΝΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΔΙΒΙΝΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ

2014

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ : ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΠΕΡΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΓΡΙΒΟΓΙΑΝΝΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ

ΑΜ : 4685

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ :

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

Περίληψη

Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να ερευνήσουμε βιβλιογραφικά το φαινόμενο της υπερσπηλαίωσης. Υπερσπηλαίωση συμβαίνει όταν μικρές φυσαλίδες υδρατμών που έχουν δημιουργηθεί κατά τη σπηλαίωση, διογκώνονται και συνενώνονται σχηματίζοντας μια μεγάλη, σταθερή και με προβλέψιμη συμπεριφορά φυσαλίδα γύρω από το κινούμενο αντικείμενο. Η φυσαλίδα είναι μεγαλύτερη από το αντικείμενο, με αποτέλεσμα μόνον η εμπρόσθια όψη του να έρχεται σε επαφή με το νερό. Το υπόλοιπο μέρος του αντικειμένου περιβάλλεται από υδρατμούς χαμηλής πίεσης με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της υδροδυναμικής αντίστασης.

Η έρευνα για την εφαρμογή του φαινομένου της υπερσπηλαίωσης προσανατολίζεται στις εξής κατηγορίες:

1. Πλοία τεχνολογίας υπερσπηλαίωσης.
2. Κατευθυνόμενες τορπίλες υψηλής ταχύτητας.
3. Υπερηχητικά υποβρύχια σκάφη, η ανάπτυξη των οποίων θα επέφερε ριζικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο διεξάγεται σήμερα ο ναυτικός πόλεμος.
4. Βλήματα ή βολίδες υπερηχητικών ταχυτήτων που μπορούν να βληθούν από πολυβόλα ή πυροβόλα τοποθετημένα σε ελικόπτερα ή υποβρύχια ατρακτίδια.

Abstract

The aim of the present work is to understand the phenomenon of supercavitation and its applications. Supercavitation occurs when small vapor bubbles made during cavitation process, are becoming bigger thus forming a bubble bigger than the object. This results that only the front part of the object is in contact with the water. The rest of the object is surrounded by low pressure vapor resulting to drastic reduction of hydrodynamic drag.

Applied research in supercavitation is focused in the following areas

1. Supercavitation technology ships.
2. High-speed guided torpedoes.
3. The development of supersonic submarines that could bring radical changes, about the way that navy war is conducted today.
4. Supersonic velocity missiles or plummeters that they could be fired by machine guns and cannons. Those machines could be setting on helicopters or small underwater fuselages.

Πρόλογος

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη (θεωρητική) του φαινομένου της υπερσπηλαίωσης. Ενός φαινομένου που σχετίζεται άμεσα με το φαινόμενο της σπηλαίωσης έχοντας όμως διαφορετικές εφαρμογές (κυρίως στρατιωτικής φύσης).

Στο 1^ο κεφάλαιο αναφέρονται βασικές έννοιες που σχετίζονται με το φαινόμενο της Μηχανικής των ρευστών και ειδικότερα με το φαινόμενο της σπηλαίωσης.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Επιπροσθέτως αναλύονται οι κύριες μορφές του φαινομένου (παροδικές μεμονωμένες φυσαλίδες, προσκολλημένες κοιλότητες και η σπηλαίωση λόγω δημιουργίας δινών καθώς και οι πρακτικές εφαρμογές του φαινομένου).

Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της υπερσπηλαίωσης. Επίσης αναλύεται η εφαρμογή του φαινομένου σε τρεις κατηγορίες όπλων (κατευθυνόμενες τορπίλες υψηλής ταχύτητας, βολίδες υπερηχητικών ταχυτήτων και τα υπερταχεία υποβρύχια σκάφη) καθώς και τα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω των υψηλών ταχυτήτων, αλλά και στην τεχνολογία πλοίων υπερσπηλαίωσης. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήσαμε.

Κεφάλαιο 1

Βασικές έννοιες

1.1 Η σημασία των ρευστών

Η σημασία των ρευστών για τον τομέα της ναυτιλίας είναι τεράστια. Εκτός από τα ζητήματα που σχετίζονται με την άνωση, την πλεύση και την κίνηση του πλοίου στη θάλασσα, το ίδιο το πλοίο αποτελεί μία σχετικά αυτόνομη παραγωγική μονάδα, στην οποία συναντάμε πολλά είδη ρευστών (νερό διαφόρων χρήσεων, καύσιμα, λάδια, υδρατμό, αέρα). Οι σωληνώσεις και τα μηχανήματα διακινήσεως αυτών των ρευστών δεν περιορίζονται μόνο στο μηχανοστάσιο, αλλά εκτείνονται σε όλο το πλοίο. Η μελέτη και η κατανόηση επομένως της συμπεριφοράς των ρευστών, είναι σημαντική για τον Μηχανικό.

Πριν περάσουμε στην εξέταση των ρευστών, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε με συντομία σε βασικές έννοιες και νόμους της Φυσικής και της Θερμοδυναμικής που σχετίζονται με τις φυσικές ιδιότητες των σωμάτων, τις κινήσεις, τα αίτια που τις μεταβάλλουν, τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας. Πριν ξεκινήσουμε την περιγραφή μας για τα ρευστά θα δώσουμε τον ορισμό του για να δείξουμε την διαφορά του σε σχέση με τα άλλα σώματα και μορφές της ύλης. Ρευστό ορίζεται κάθε σώμα, το οποίο υπό διατμητική τάση, οσοδήποτε μικρή, δεν μπορεί να παραμείνει σε κατάσταση στατικής ισορροπίας.

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που μερικά ρευστά έχουν τόσο υψηλό ιξώδες σε συνηθισμένες θερμοκρασίες, που συμπεριφέρονται περισσότερο σαν στερεά αλλά και πολλά στερεά σώματα που όταν τους εφαρμόσουμε διατμητική τάση παρουσιάζουν ιδιότητες ρευστού. Τα ρευστά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα συμπιεστά και στα ασυμπίεστα.

Ασυμπίεστα: ονομάζονται τα ρευστά των οποίων η πυκνότητα τους παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την εφαρμοζόμενη πίεση. Βέβαια αυτός ο ορισμός είναι θεωρητικός αφού κανένα πραγματικό ρευστό δεν διατηρεί την πυκνότητα του απόλυτα σταθερή εν τούτης σε πολλές περιπτώσεις η μεταβολή της πυκνότητας είναι τόσο μικρή ώστε το ρευστό μπορεί να ληφθεί σαν ασυμπίεστο. Επίσης και τα αέρια μπορούν να ληφθούν σαν ασυμπίεστα σε περίπτωση που η μεταβολή της καταστάσεως λαμβάνει χώρα, κατά προσέγγιση, κάτω από σταθερή θερμοκρασία και χωρίς εναλλαγή θερμότητας. Σε συνηθισμένες μεταβολές καταστάσεων ρευστών παρατηρείται το φαινόμενο ότι ενώ η πυκνότητα παραμένει ανεξάρτητη από την πίεση, εν τούτοις μεταβάλλεται σημαντικά μαζί με την θερμοκρασία. Η μελέτη ασυμπίεστων ρευστών κάτω από συνθήκες στατικής ισορροπίας ονομάζεται υδροστατική.

Όπου η πυκνότητα ενός ρευστού δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερή όπως στην περίπτωση των αερίων, το ρευστό καλείται συμπιεστό. Τέλος μπορούμε να πούμε ότι τόσο τα υγρά όσο και τα αέρια, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις συμπεριφέρονται σαν ασυμπίεστα ρευστά. Ουσιαστικά η παράμετρος που διαχωρίζει τα συμπιεστά από τα ασυμπίεστα είναι ο αριθμός Mach. Έτσι όλες οι ροές αερίων που παρουσιάζουν αριθμό $M < 0,4$ συγκαταλέγονται στις ασυμπίεστες ροές, ενώ εκείνες που παρουσιάζουν αριθμό $M > 0,4$ συγκαταλέγονται στις συμπιεστές ροές.

1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

1.2.1 Θερμοκρασία

Όπως γνωρίζουμε από τη φυσική, η θερμοκρασία εξαρτάται από τη μέση ταχύτητα των μορίων του σώματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η μέση ταχύτητα, τόσο μεγαλύτερη και η θερμοκρασία του. Σε συνδυασμό με την πίεση, καθορίζει τη φυσική κατάσταση του σώματος. Άρα από τη θερμοκρασία εξαρτάται αν ένα σώμα βρίσκεται σε κατάσταση ρευστού.

Η αλλαγή της φυσικής καταστάσεως των σωμάτων:

Σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, τα μόρια του σώματος κινούνται ελάχιστα. Πιο συγκεκριμένα, ταλαντώνονται γύρω από ένα κέντρο ισορροπίας. Δεν απομακρύνονται από τη θέση τους λόγω των ισχυρών διαμοριακών δυνάμεων. Το σώμα βρίσκεται σε στερεά κατάσταση. Προσδίδοντας στο σώμα ενέργεια, αυξάνεται η μέση ταχύτητα των μορίων του, άρα αυξάνεται η θερμοκρασία του. Υπάρχει μια θερμοκρασία, χαρακτηριστική για κάθε σώμα, στην οποία το σώμα περνά από τη στερεά στην υγρή κατάσταση (σημείο τήξεως). Αν ακολουθήσουμε το αντίστροφο (αφαίρεση ενέργειας από το υγρό) στην ίδια ακριβώς θερμοκρασία το σώμα θα στερεοποιηθεί (σημείο πήξεως).

Σε ένα υγρό, τα μόρια δεν έχουν συγκεκριμένη θέση, αλλά κινούνται ελεύθερα σε χώρο περιορισμένο από τα τοιχώματα του δοχείου και την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Η κινητική ενέργεια των μορίων του υγρού είναι πολύ μεγαλύτερη από την κινητική ενέργεια που είχαν, όταν το σώμα βρισκόταν σε στερεά κατάσταση. Λόγω της αυξημένης κινητικής ενέργειας, οι διαμοριακές δυνάμεις δεν δύνανται να συγκρατήσουν τα μόρια σε συγκεκριμένες θέσεις, όπως συμβαίνει στο στερεό σώμα. Ο ρόλος των διαμοριακών δυνάμεων έχει μειωθεί.

Συνεχίζοντας να προσδίδουμε ενέργεια στο υγρό, η μέση ταχύτητα των μορίων του αυξάνεται και άλλο, επομένως αυξάνεται η θερμοκρασία του σώματος. Για ορισμένη τιμή πίεσεως, υπάρχει μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, χαρακτηριστική για κάθε σώμα, στην οποία το υγρό μετατρέπεται σε αέριο (ατμό) προσλαμβάνοντας ενέργεια (σημείο ζέσεως ή βρασμού). Κατά την αντίστροφη πορεία, ο ατμός υγροποιείται αποβάλλοντας ενέργεια (σημείο υγροποιήσεως). Το σημείο ζέσεως ενός σώματος είναι αρκετά υψηλότερο από το σημείο τήξεως. Στην αέρια κατάσταση δεν υπάρχει περατωτική επιφάνεια. Τα μόρια του σώματος κινούνται ελεύθερα σε όλο

το διαθέσιμο χώρο. Η κινητική τους ενέργεια είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της υγρής καταστάσεως. Καθώς η μέση απόσταση των μορίων είναι πολύ μεγάλη, οι διαμοριακές δυνάμεις είναι πολύ μικρές και στις περισσότερες περιπτώσεις θεωρούνται αμελητέες.

1.2.2 Πίεση

Η πίεση του ρευστού σε κάποιο σημείο, είναι η δύναμη ανά μονάδα επιφανείας που το ρευστό ασκεί σε σώμα που βρέθηκε στο σημείο αυτό. Παρατηρούμε πως η πίεση που ασκεί το ρευστό εξαρτάται από τη μέση ταχύτητα των μορίων και το ρυθμό των κρούσεων. Σύμφωνα με τη θερμοδυναμική, η πίεση του ιδανικού αερίου είναι ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας και ανάλογη της πυκνότητας.

Να σημειώσουμε ότι τα αέρια έχουν πολύ μεγαλύτερες μέσες ταχύτητες από τα υγρά. Αλλά τα υγρά έχουν πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση μορίων, άρα έχουν και μεγαλύτερο ρυθμό κρούσεων. Η πίεση λοιπόν των ρευστών είναι αποτέλεσμα μοριακών κρούσεων. Κατά συνέπεια είναι αδύνατο να λάβει αρνητικές τιμές. Παράλληλα δεν πρέπει να μας διαφεύγει το γεγονός πως η δύναμη πίεσεως που ασκείται από το ρευστό σε μια επιφάνεια, σύμφωνα με την αρχή δράσεως-αντιδράσεως προϋποθέτει την ύπαρξη ίσης και αντίθετης δυνάμεως που ασκεί η επιφάνεια στο ρευστό.

1.2.3 Πυκνότητα

Η πυκνότητα ενός σώματος καλείται η μάζα του ανά μονάδα όγκου. Η πυκνότητα είναι αντίστροφη του ειδικού όγκου: $d = m/V$. Ειδικό βάρος αντίστοιχα καλείται το βάρος ανά μονάδα όγκου: $Y = B/V$. Οι δύο ιδιότητες δεν είναι ανεξάρτητες.

Γνωρίζοντας την πυκνότητα ενός σώματος, μπορούμε να υπολογίσουμε και το ειδικό βάρος. Τα ρευστά είναι ομογενή σώματα, δηλαδή σε συγκεκριμένες συνθήκες πίεσεως και θερμοκρασίας έχουν την ίδια πυκνότητα σε όλα τα σημεία τους.

Η πυκνότητα των υγρών είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με την πυκνότητα των αερίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μόρια των υγρών βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, σε σχέση με τα μόρια των αερίων. Από τον ορισμό της πυκνότητας, παρατηρούμε πως η πυκνότητα ενός σώματος σταθερής μάζας, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με τον όγκο. Παράμετροι που επηρεάζουν τον όγκο είναι η θερμοκρασία και η πίεση. Άρα η πυκνότητα των σωμάτων επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και την πίεση. Τον όγκο των υγρών τον επηρεάζουν και οι διαλυμένες σε αυτά ουσίες. Υπάρχουν περιπτώσεις διεργασιών σε αέρια, στις οποίες ο όγκος του συστήματος παραμένει σταθερός, αλλά η μάζα μεταβάλλεται.

1.2.4 Τάση ατμών

Όταν ένα υγρό βρίσκεται σε δοχείο, τα μόρια του κινούνται στο χώρο που ορίζουν τα στερεά τοιχώματα και η ελεύθερη επιφάνεια του. Τα μόρια του υγρού που προσπίπτουν σε αυτήν ανακλώνται λόγω του δυναμικού της. Παρόλα αυτά, ορισμένα μόρια κινούμενα με ταχύτητες μεγαλύτερες από τη μέση ταχύτητα και προσπίπτοντας στην ελεύθερη επιφάνεια με κατάλληλη γωνία, τη διαπερνούν και εξέρχονται πάνω από αυτή σαν ατμοί. Ατμοί του ρευστού βρίσκονται πάντοτε πάνω από το υγρό. Αν το δοχείο είναι κλειστό και η θερμοκρασία σταθερή, επέρχεται δυναμική ισορροπία μεταξύ των ατμών και του υγρού. Δηλαδή, όσα μόρια υγρού διαπερνούν την ελεύθερη επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου, ακριβώς τόσα εισέρχονται στην υγρή μάζα. Τάση ατμών του υγρού καλείται η μερική πίεση των ατμών του που βρίσκονται πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του. Τα υγρά τα οποία για ορισμένη θερμοκρασία έχουν μεγάλη τάση ατμών καλούνται πτητικά. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται η μέση ταχύτητα των μορίων, άρα αυξάνεται και η ποσότητα των ατμών. Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της τάσεως των ατμών. Όταν η τάση ατμών γίνει ίση με την πίεση που επικρατεί πάνω από το υγρό, αρχίζει ο βρασμός, δηλαδή η ατμοποίηση του υγρού σε όλη τη μάζα του. Αυτό εξηγεί την εξάρτηση του σημείου βρασμού από την πίεση.

Η τάση ατμών μειώνεται όταν στο υγρό διαλυθεί στερεά ουσία. Άρα το σημείο ζέσεως του διαλύματος αυξάνει σε σχέση με αυτό του διαλύτη στην ίδια πίεση. Αν το δοχείο είναι ανοικτό, τα μόρια που εγκαταλείπουν το υγρό απομακρύνονται από την επιφάνεια και δεν επέρχεται ισορροπία. Η μάζα του υγρού σταδιακά μειώνεται.

1.2.5 Ιξώδες ή συνεκτικότητα

Ιξώδες ονομάζεται η εσωτερική τριβή του ρευστού, δηλαδή η αντίσταση του ρευστού στην κίνηση του. Όσο πιο χαμηλό είναι το ιξώδες τόσο πιο λεπτόρευστο είναι το ρευστό, αντιθέτως όσο πιο υψηλό είναι το ιξώδες τόσο πιο παχύρευστο είναι το ρευστό.

Επίδραση της θερμοκρασίας στο ιξώδες:

Η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά το ιξώδες των ρευστών. Πιο συγκεκριμένα το ιξώδες των υγρών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει επειδή με την άνοδο της θερμοκρασίας, αυξάνεται η μέση απόσταση των μορίων, άρα μειώνονται οι δυνάμεις συνοχής. Αντίθετα από τα υγρά, το ιξώδες των αερίων αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει επειδή καθοριστικό ρόλο στο ιξώδες των αερίων, δεν παίζουν οι δυνάμεις συνοχής αλλά η ανταλλαγή μορίων και οι μοριακές συγκρούσεις μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων του αερίου. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυτές αυξάνονται, με αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής τριβής, δηλαδή του ιξώδους.

1.2.6 Συντελεστής ιξώδους

Ο συντελεστής ιξώδους εκφράζει τις μοριακές επιδράσεις στην κίνηση του ρευστού. Επειδή οι μοριακές διαταραχές είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, είναι φανερό ότι και ο συντελεστής του ιξώδους μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Για τα υγρά ελαττώνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία ενώ αυξάνει με την θερμοκρασία για την περίπτωση των αερίων.

Κεφάλαιο 2

Φαινόμενο σπηλαίωσης

2.1 Ορισμός σπηλαίωσης

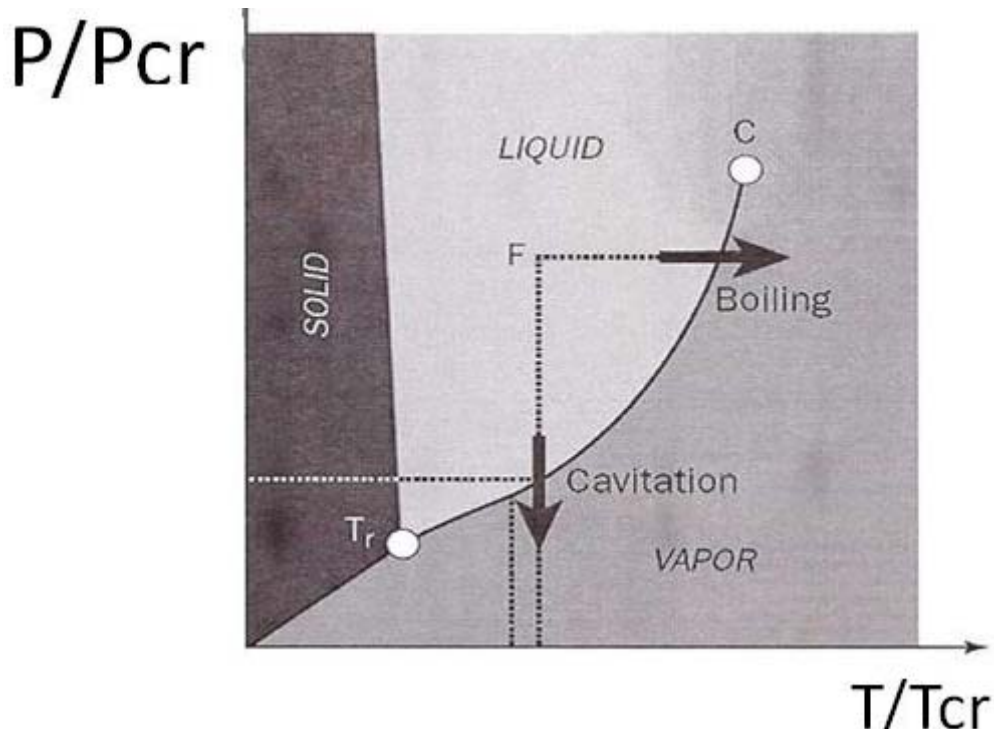
Η σπηλαίωση ορίζεται ως η ατμοποίηση ενός υγρού υπό συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας, λόγω μείωσης της πίεσης κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο που ονομάζεται πίεση ατμοποίησης. Η σπηλαίωση ξεκινάει με σχηματισμό κοιλοτήτων ατμού (vapor cavities) εντός ενός αρχικά ομοιογενούς υγρού. Αναλόγως με τη διαμόρφωση της ροής και τις φυσικές ιδιότητες του υγρού, η σπηλαίωση μπορεί να παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά.

2.2 Πίεση ατμοποίησης

Η έννοια της πίεσης ατμοποίησης γίνεται περισσότερο κατανοητή μέσω της κλασσικής θερμοδυναμικής. Για παράδειγμα, στο διάγραμμα φάσης του νερού (Εικόνα 1) η καμπύλη από το τριπλό σημείο Tr μέχρι το κρίσιμο σημείο C διαχωρίζει τις περιοχές του υγρού και του ατμού. Το πέρασμα αυτής της καμπύλης αντιπροσωπεύει μια αντιστρεπτή μεταβολή υπό σταθερές συνθήκες (για παράδειγμα εξάτμιση ή συμπύκνωση του υγρού) σε πίεση $P_v(T)$ η οποία ονομάζεται πίεση ατμοποίησης (vapor pressure) και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.

Η σπηλαίωση σε ένα υγρό μπορεί να συμβεί μειώνοντας την πίεση και ταυτόχρονα διατηρώντας τη θερμοκρασία κατά προσέγγιση σταθερή. Έτσι, η σπηλαίωση προκύπτει σαν ένα παρόμοιο φαινόμενο με τον βρασμό με τη διαφορά ότι ο κινητήριο μηχανισμός δεν είναι μία αλλαγή στη θερμοκρασία αλλά μία αλλαγή στην πίεση, η οποία εξαρτάται από τη δυναμική της ροής. Στις περισσότερες περιπτώσεις (ειδικά για το νερό σε χαμηλή θερμοκρασία), απαιτείται μόνο ένα μικρό ποσό θερμότητας για το σχηματισμό ενός μεγάλου όγκου ατμού. Μετρήσεις στο περιβάλλον νερό, το οποίο λειτουργεί ως πηγή θερμότητας για την ατμοποίηση, δείχνουν πολύ μικρή αλλαγή στη θερμοκρασία του. Η μεταβολή αυτή στο διάγραμμα φάσης μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ισόθερμη.

Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις η μεταφορά θερμότητας που απαιτείται για την ατμοποίηση μπορεί να προκαλέσει αλλαγή φάσης σε μία θερμοκρασία T' χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος υγρού. Η διαφορά θερμοκρασίας $T - T'$ ονομάζεται θερμική καθυστέρηση (thermal delay). Η διαφορά είναι μεγαλύτερη όταν η περιβάλλουσα θερμοκρασία είναι κοντά στην κρίσιμη θερμοκρασία του ρευστού.



Εικόνα 1: Διάγραμμα φάσης του νερού. Με T_r συμβολίζεται το τριπλό σημείο ενώ με C το κρίσιμο σημείο του νερού. Η καμπύλη που ενώνει τα δύο σημεία χωρίζει την υγρή φάση από τη φάση του ατμού. Με $P_v(T)$ συμβολίζεται η πίεση ατμοποίησης του νερού, η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας

Πρέπει να σημειωθεί ότι η καμπύλη $P_v(T)$ δεν είναι ένα απόλυτο όριο μεταξύ των φάσεων υγρού και ατμού. Μπορεί να υπάρχουν αποκλίσεις από αυτή την καμπύλη στην περίπτωση πολύ γρήγορης αλλαγής φάσης. Ακόμα και σε σχεδόν στατικές συνθήκες μπορεί να συμβεί αλλαγή φάσης σε πίεση κατώτερη από την πίεση ατμοποίησης P_v . Έτσι αν η τοπική απόλυτη πίεση είναι ίση με την πίεση ατμοποίησης, αυτό δεν συνεπάγεται απαραίτητα ότι έχει ξεκινήσει το φαινόμενο της σπηλαιώσης.

2.3 Κύριες μορφές σπηλαιώσης

Η σπηλαιώση μπορεί να παρουσιαστεί σε διάφορες μορφές, εξαρτώμενη κυρίως από τη βασική δομή της ροής. Ωστόσο, καθώς το φαινόμενο εξελίσσεται, η δομή του ατμού επηρεάζει και τροποποιεί τη ροή. Διακρίνονται τρεις κύριοι τύποι σπηλαιώσης:

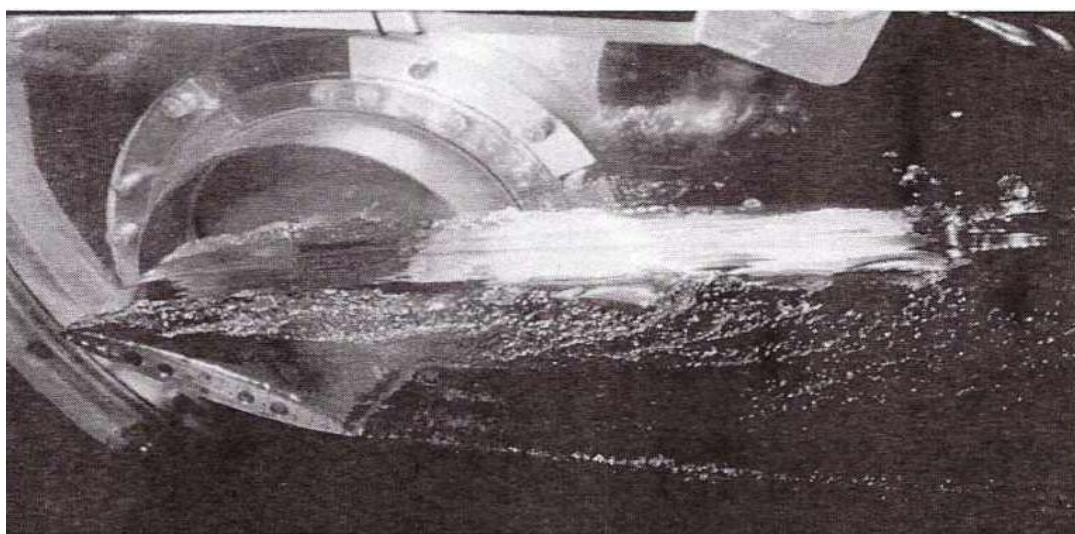
-Παροδικές μεμονωμένες φυσαλίδες (transient isolated bubbles). Εμφανίζονται στην περιοχή χαμηλής πίεσης, ως αποτέλεσμα της ταχείας αύξησης πολύ μικρών περιοχών αερίου που εμπεριέχονται στο υγρό. Μεταφέρονται με τη ροή και σταδιακά εξαφανίζονται καθώς εισέρχονται σε περιοχές υψηλής πίεσης.

-Προσκολλημένες κοιλότητες (attached cavities). Σε αυτό το είδος σπηλαιώσης, κοιλότητες ατμού προσκολλώνται πάνω σε στερεές επιφάνειες. Εδώ, μπορεί να γίνει μια επιπλέον διάκριση μεταξύ της μερικής σπηλαιώσης (partial cavities) που παρατηρείται κοντά στα τοιχώματα και η οποία έχει

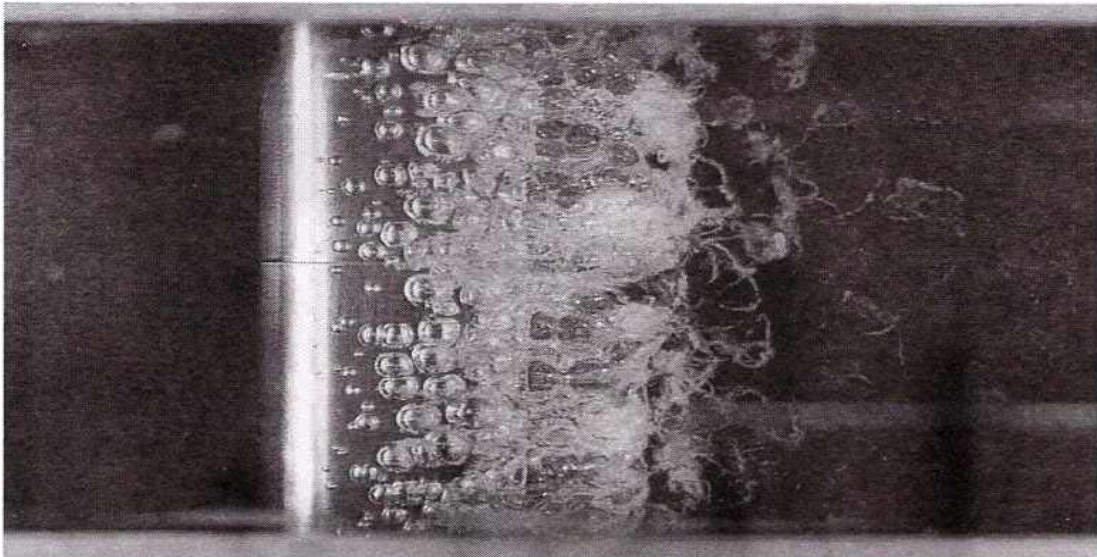
σταθερό μήκος σπηλαίωσης και της υπερσπηλαίωσης (super-cavities) όπου το μήκος της περιοχής της σπηλαίωσης επεκτείνεται πέρα από κάποιο όριο, για παράδειγμα την έξοδο του αγωγού της ροής.

-Σπηλαίωση λόγω δημιουργίας δινών (cavitating vortices). Εδώ η σπηλαίωση μπορεί να εμφανιστεί στο κέντρο μιας δίνης το οποίο χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλή πίεση, και η οποία μεταφέρεται με τη ροή.

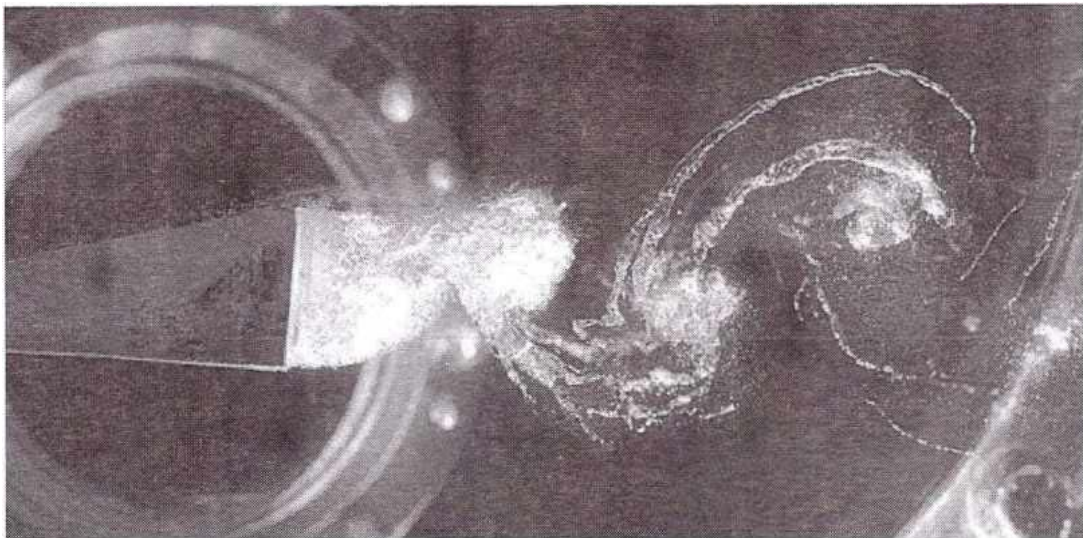
Υπάρχουν και άλλα είδη σπηλαίωσης που δεν συμπίπτουν με κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες, όπως η σπηλαίωση σε σχήμα σύννεφου (cloud cavitation). Σε αυτήν την περίπτωση σπηλαίωσης, εμφανίζονται λόγω ασταθειών μεγάλες μάζες ατμού σε μορφή σύννεφου. Επιπλέον, υπάρχουν και περιπτώσεις σπηλαίωσης που μπορεί να εμφανίζουν συνδυασμένα χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων σπηλαίωσης. Κύριο παράδειγμα είναι η σπηλαίωση που εμφανίζεται αρχικά με τη μορφή προσκολλημένων κοιλοτήτων, αλλά στη συνέχεια μεταφέρονται με τη ροή (travelling bubble cavitation). Στην περίπτωση αυτή, σχηματίζονται φυσαλίδες στα τοιχώματα της διάταξης, αλλά αφού αυτές αυξηθούν σε μέγεθος μεταφέρονται προς την κατεύθυνση της ροής, μέχρι να εξαφανιστούν λόγω εισόδου τους σε περιοχές υψηλότερης πίεσης. Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες με τα διάφορα είδη της σπηλαίωσης.



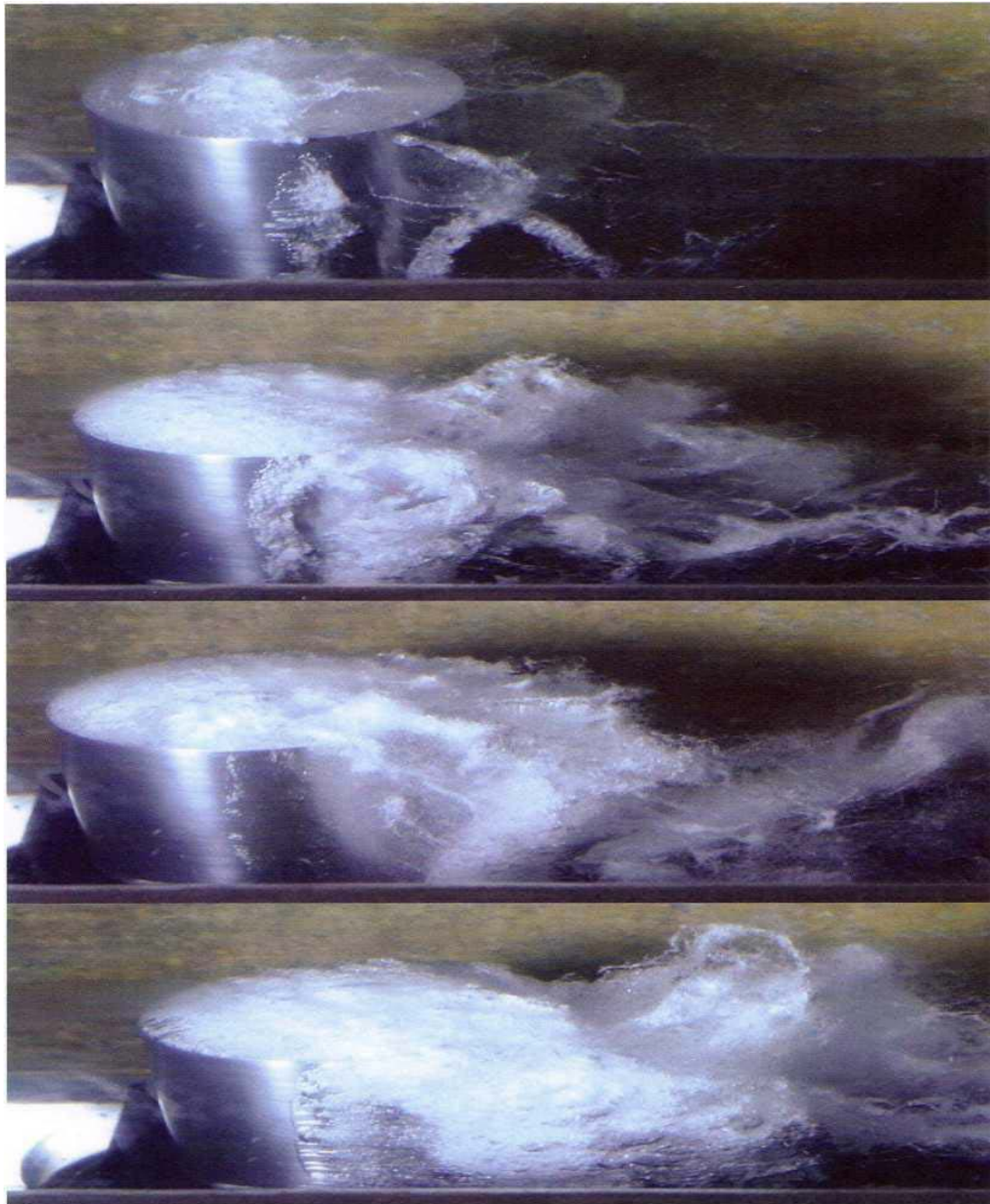
Εικόνα 2: Εμφάνιση υπερσπηλαίωσης (supercavitation) πίσω από υδροτομή. Το μήκος της σπηλαίωσης καλύπτει όλη την επιφάνεια και επεκτείνεται για αρκετό διάστημα κατά την κατεύθυνση της ροής.



Εικόνα 3: (Travelling bubble cavitation). Σπηλαιώση που εμφανίζεται με τη μορφή προσκολλημένων κοιλοτήτων. Αφού οι σχηματισμένες φυσαλίδες αυξηθούν σε μέγεθος, μεταφέρονται κατά κατεύθυνση της ροής (από αριστερά προς τα δεξιά), και μετά από λίγο εξαφανίζονται.



Εικόνα 4: Η σπηλαιώση δημιουργείται στον πυρήνα των δινών και έπειτα μεταφέρεται μαζί με τη ροή (cavitating vortices) σχηματίζοντας δύο διαδοχικές δίνες αντίστροφης στροβιλότητας.



Εικόνα 5: Εμφάνιση σπηλαιώσης πίσω από κυλινδρικό αγωγό ο οποίος βρίσκεται εντός σήραγγας ροής νερού υψηλής ταχύτητας. Εδώ, η σπηλαιώση εμφανίζεται σε μορφή δινών που μεταφέρονται με τη ροή (cavitating vortices). Η ταχύτητα της ροής αυξάνεται και ο αριθμός σπηλαιώσης μειώνεται αντίστοιχα με σειρά από πάνω προς τα κάτω.

2.4 ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ ΣΕ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.4.1 Στάδια σπηλαίωσης

Για πρακτικούς λόγους, στην ανάπτυξη της σπηλαίωσης διακρίνονται δύο μόνο στάδια:

- Έναρξη της σπηλαίωσης. Χαρακτηρίζεται από τη μικρή περιοχή όπου πρωτοεμφανίζεται η σπηλαίωση, της οποίας τα όρια διαχωρίζουν τη ροή με την σπηλαίωση από την υπόλοιπη ροή.
- Αναπτυγμένη σπηλαίωση. Χαρακτηρίζεται από μονιμότητα ή διεύρυνση της περιοχής της σπηλαίωσης, και σημαντική μείωση της απόδοσης των μηχανών.

Η διάκριση αυτή είναι σημαντική στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Όσον αφορά στη μη αναπτυγμένη σπηλαίωση, πρέπει να γίνει εστίαση στην περιοχή έναρξης του φαινομένου, ενώ για την αναπτυγμένη σπηλαίωση πρέπει να εξεταστούν οι επιπτώσεις της σπηλαίωσης στη λειτουργία της διάταξης.

2.4.2 Ευνοϊκές συνθήκες για την εμφάνιση σπηλαίωσης

- Η γεωμετρία των τοιχωμάτων μπορεί να προκαλέσει σε αρχικά σταθερή ροή έντονες τοπικές αυξήσεις της ταχύτητας, οι οποίες συνοδεύονται από πτώση της πίεσης. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση απότομης μείωσης της διατομής, όπως για παράδειγμα όταν η ροή περάσει μέσα από το ακροφύσιο, καθώς επίσης και λόγω της καμπυλότητας που μπορεί να επιβληθεί στη ροή από την τοπική γεωμετρία (για παράδειγμα, γωνίες σε σωληνώσεις ή καμπυλότητα υδροτομών).
- Σπηλαίωση μπορεί επίσης να εμφανιστεί σε τυρβώδεις ροές με διάτμηση, λόγω μεγάλων διακυμάνσεων στην πίεση.
- Ο ασταθής χαρακτήρας κάποιων ροών (όπως για παράδειγμα στους αγωγούς τροφοδότησης κινητήρα Diesel με καύσιμο) μπορεί να οδηγήσει σε επιτάχυνση του ρευστού και συνεπώς σε στιγμιαία παραγωγή σημείων χαμηλής πίεσης, γεγονός που οδηγεί σε σπηλαίωση.
- Η τραχύτητα των τοιχωμάτων παράγει τοπικά περιοχές ομόρρου (local wakes) όπου μπορεί να αναπτυχθεί σπηλαίωση με τη μορφή προσκολλημένων κοιλοτήτων.
- Ως συνέπεια της ταλαντούμενης κίνησης των τοιχωμάτων (για παράδειγμα σε μηχανές Diesel), δημιουργούνται διακυμαινόμενα πεδία πίεσης που επιβάλλονται πάνω στο κατά τα άλλα ομοιόμορφο πεδίο πίεσης. Αν το εύρος διακύμανσης είναι αρκετά μεγάλο, μπορεί να εμφανιστεί σπηλαίωση.
- Αν ένα στερεό σώμα επιταχυνθεί απότομα (κρούση) εντός υγρού που βρίσκεται αρχικά σε ηρεμία, ιδιαίτερα αν το σώμα διαθέτει αιχμηρές άκρες, μπορεί να δημιουργηθεί σπηλαίωση. Η επιτάχυνση του υγρού που απαιτείται για να παρακάμψει τις άκρες παράγει χαμηλές πιέσεις, ακόμα και αν οι ταχύτητες είναι σχετικά μικρές αμέσως μετά την κρούση.

2.4.3 Οι κύριες επιπτώσεις της σπηλαιώσης σε υδραυλικά συστήματα

Το φαινόμενο της σπηλαιώσης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα υδραυλικά συστήματα.

Οι σημαντικότερες επιπτώσεις είναι οι εξής:

- Αλλαγή στην απόδοση του συστήματος
- Εμφάνιση επιπλέον δυνάμεων στις στερεές δομές
- Παραγωγή ταλαντώσεων και θορύβου
- Διάβρωση των τοιχωμάτων στην περίπτωση αναπτυγμένης σπηλαιώσης σε περίπτωση που η ταχύτητα του υγρού είναι πολύ μεγάλη.

Εκ πρώτης όψεως, η σπηλαιώση εμφανίζεται ως ένα επιβλαβές φαινόμενο, του οποίου η εμφάνιση πρέπει να αποφεύγεται. Σε ορισμένες περιπτώσεις, για να μην επιβαρυνθεί οικονομικά μια εγκατάσταση, μπορεί να επιτραπεί ένας ορισμένος βαθμός ανάπτυξης της σπηλαιώσης. Αυτό όμως πρέπει να γίνεται εφόσον οι επιπτώσεις της σπηλαιώσης ελέγχονται και δεν επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία της διάταξης.

Εκτός από τις αρνητικές επιπτώσεις, η σπηλαιώση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάποιες βιομηχανικές διεργασίες και εφαρμογές για να συγκεντρώσει ενέργεια σε μικρές επιφάνειες και να παράγει υψηλές πιέσεις σε προκαθορισμένα σημεία. Για αυτόν τον σκοπό, συχνά χρησιμοποιούνται συσκευές υπερήχων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ωφέλιμης χρήσης της σπηλαιώσης είναι ο καθαρισμός επιφανειών με υπερήχους ή δέσμες, η διασπορά σωματιδίων σε υγρό μέσο, η χρήση σε τομείς της εμβιομηχανικής και τέλος η μείωση του ρυθμού ροής σε περιορισμένες ροές μέσω ανάπτυξης υπερσπηλαιώσης.

2.5 ΕΙΔΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ

2.5.1 Πίεση και κλίση πίεσης

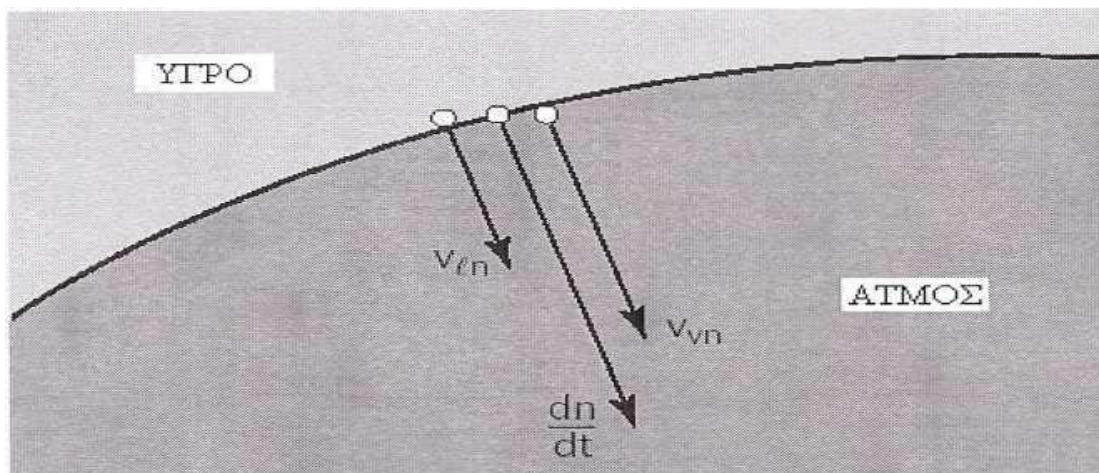
Σε ασυμπίεστες ροές χωρίς σπηλαιώση, η απόλυτη τιμή της πίεσης δεν έχει καμία επίπτωση στη δυναμική της ροής, η οποία εξαρτάται από την κλίση της πίεσης (pressure gradient). Όμως η απόλυτη τιμή της πίεσης μπορεί με μείωση της κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο να προκαλέσει την εμφάνιση και ανάπτυξη σπηλαιώσης. Έτσι, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τόσο η απόλυτη τιμή της πίεσης όσο και η κλίση της πίεσης.

Για την πρόβλεψη της έναρξης της σπηλαιώσης με θεωρητική ανάλυση ή με χρήση αριθμητικής προσομοίωσης, πρέπει να συγκριθεί η υπολογισμένη τιμή της πίεσης σε μια κρίσιμη περιοχή της ροής όπου αναμένεται η έναρξη της σπηλαιώσης με μία κατώτατη επιτρεπόμενη τιμή, η οποία συνήθως είναι η πίεση ατμοποίησης.

2.5.2 Διεπιφάνειες υγρού-ατμού

Οι ροές με σπηλαιώση, όπως και οι υπόλοιπες ροές δύο φάσεων υγρού-ατμού, χαρακτηρίζονται από την παρουσία πολλαπλών διεπιφανειών (interfaces) λόγω της εμφάνισης φυσαλίδων. Ωστόσο, η ανταπόκριση τους σε εξωτερικές διαταραχές (για παράδειγμα σε μια αύξηση πίεσης) μπορεί να διαφέρει από την αντίστοιχη σε ροές υγρού ατμού στις οποίες λαμβάνει χώρα εξάτμιση. Όταν αυτές οι ροές περιέχουν φυσαλίδες αερίου συνήθως δεν υπόκεινται σε γρήγορες αλλαγές στη μέση πυκνότητα.

Ωστόσο, στις ροές με σπηλαιώση οι διεπιφάνειες από τη μία πλευρά υπόκεινται σε σταθερή πίεση, πρακτικά ίση με την πίεση ατμοποίησης. Έτσι, δεν μπορούν να διατηρήσουν μια αύξηση ή μείωση στην εξωτερική πίεση χωρίς να εξελιχθούν ταχέως σε σχήμα και μέγεθος, γεγονός που τις καθιστά εξαιρετικά ασταθείς. Είναι εξαιρετικά δύσκολο να χρησιμοποιηθούν όργανα μέτρησης για να ληφθούν μετρήσεις εντός ροής με σπηλαιώση. Αυτό οφείλεται κυρίως στη σπηλαιώση που είναι δυνατό να επάγει το ίδιο το όργανο μέτρησης. Όμως, στην περίπτωση που το υγρό είναι διαφανές (π.χ. νερό), είναι εφικτό να παρατηρηθούν μέσω σύγχρονων οπτικών μεθόδων οι διεπιφάνειες, καθώς αντανακλούν πολύ αποτελεσματικά από το φως. Η οπτικοποίηση των διεπιφανειών παρέχει σημαντικά στοιχεία για τη δυναμική της ροής.



Στην εικόνα απεικονίζεται διεπιφάνεια υγρού/ατμού (φυσαλίδας).

2.5.3 Τυπικά μεγέθη σπηλαιώσης

Αστάθεια στις διεπιφάνειες μπορεί να οδηγήσει σε έκρηξη-κατάρρευση (collapse-explosion) των φυσαλίδων, με μεγάλες αποκλίσεις σε μέγεθος και ταχύτητα σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Μερικές τυπικές τιμές που συναντώνται στο πεδίο της σπηλαιώσης είναι οι εξής:

- Η χρονική διάρκεια της κατάρρευσης σφαιρικής φυσαλίδας ατμού ακτίνας 1 cm σε νερό κάτω από εξωτερική πίεση 1bar, είναι περίπου 1 ms.
- Η διάρκεια του τελικού σταδίου κατάρρευσης μιας φυσαλίδας, μέγεθος πολύ σημαντικό για τη διαδικασία της διάβρωσης, είναι της κλίμακας 1 μs.
- Η κάθετη ταχύτητα μιας διεπιφάνειας κυμαίνεται μεταξύ μερικών μέτρων ανά δευτερόλεπτο.
- Οι υπερπίεσεις (overpressures) λόγω ενδόρηξης (implosion) φυσαλίδων ή δινών μπορεί να φτάσουν έως και αρκετές χιλιάδες bar.

2.6 ΑΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

2.6.1 Αριθμός σπηλαιώσης (cavitation number)

Σε υδραυλικά συστήματα στα οποία εμφανίζεται σπηλαιώση, ορίζεται ως Pr η πίεση σε συμβατικό σημείο αναφοράς r . Το σημείο r συνήθως επιλέγεται κοντά στην περιοχή όπου αναμένεται να εμφανιστεί η σπηλαιώση. Αν T είναι η θερμοκρασία του υγρού και Δp η διαφορά πίεσης που χαρακτηρίζει το σύστημα, ο αριθμός σπηλαιώσης (που ονομάζεται επίσης και παράμετρος σπηλαιώσης) ορίζεται ως εξής:

$$\sigma_v = \frac{p_r - p_v(T)}{\Delta p} = \frac{p_{downstream} - p_v(T)}{p_{upstream} - p_{downstream}}$$

2.6.2 Σχετική υποπίεση

Αν υπάρχει σπηλαιώση με παρουσία προσκολλημένων κοιλοτήτων ή εάν υπάρχει μεγάλος αριθμός φυσαλίδων, η πίεση στην περιοχή που καλύπτεται από τη σπηλαιώση είναι ομοιόμορφη. Συμβολίζοντας αυτήν την πίεση ως P_c , ορίζεται μια αδιάστατη παράμετρος γνωστή ως σχετική υποπίεση (relative underpressure) της σπηλαιώσης.

$$\sigma_c = \frac{p_r - P_c}{\Delta p}$$

Αυτή η μεταβλητή χρησιμοποιείται στην αριθμητική μοντελοποίηση ροών με αναπτυγμένη σπηλαίωση, και παίζει σημαντικό ρόλο στη δυναμική της σπηλαίωσης. Συνήθως η πίεση P_c στη σπηλαίωση είναι το άθροισμα δύο στοιχείων: της πίεσης ατμοποίησης P_v και της μερικής πίεσης P_g λόγω της παρουσίας μη συμπυκνούμενου αερίου εντός της σπηλαίωσης. Αν ο τελευταίος όρος είναι αμελητέος, η σχετική υποπίεση της σπηλαίωσης γίνεται ίση με την παράμετρο σπηλαίωσης.

2.7 ΜΙΚΡΟΦΥΣΑΛΙΔΕΣ ΚΑΙ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ

2.7.1 Πυρήνες σπηλαίωσης ή μικροφουσαλίδες

Ορισμένες φορές, η ελάχιστη απόλυτη πίεση όπου εμφανίζεται η σπηλαίωση δεν ισούται με την πίεση ατμοποίησης P_v του υγρού. Αυτό το φαινόμενο έχει παρατηρηθεί σε πολλά πειράματα, και για την εξήγηση του πρέπει να γίνει κατανοητή η ατμοποίηση του υγρού.

Η υπόθεση του ομογενούς υγρού διευκολύνει τους θεωρητικούς υπολογισμούς, αλλά δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Έτσι, σε κάθε υγρό μέσο υπάρχουν σημεία που διασπούν την ομοιογένεια του υγρού. Τα σημεία αυτά σχηματίζονται από μικρή ποσότητα αερίου και ατμού, και λειτουργούν ως σημεία εκκίνησης για την ατμοποίηση του υγρού. Ονομάζονται πυρήνες σπηλαίωσης (cavitation nuclei) ή μικροφουσαλίδες (microbubbles). Πειράματα αποδεικνύουν ότι τα σημεία αυτά έχουν μέγεθος μεταξύ μερικών μm έως μερικές εκατοντάδες μm . Παραμένουν σφαιρικά σε αυτήν την κλίμακα, λόγω της επιφανειακής τάσης.

Οι μικροφουσαλίδες βρίσκονται στα τοιχώματα ή στον κύριο όγκο του υγρού. Αυτές που βρίσκονται στα τοιχώματα αποτελούνται από αέριο παγιδευμένο σε μερικές ρωγμές οι οποίες δεν περιέχουν καθόλου υγρό. Ο συνηθέστερος τρόπος δημιουργίας μικροφουσαλίδων είναι η μείωση της πίεσης του υγρού ενώ αυτό βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού.

Εφόσον οι μικροφουσαλίδες σχηματιστούν, εξελίσσονται με δύο τρόπους. Πρώτον, όσες δεν είναι προσκολλημένες σε τοίχωμα ανεβαίνουν λόγω της άνωσης. Δεύτερον, όλες οι μικροφουσαλίδες ανταλλάσσουν αέριο μέσω διάχυσης με το διαλυμένο αέριο που υπάρχει στο περιβάλλον υγρό. Γενικά, οι συντελεστές διάχυσης μάζας είναι πολύ μικροί, η διαδικασία διάχυσης αργή και οι τυπικοί χρόνοι διάχυσης είναι της τάξης δευτερολέπτου.

Κεφάλαιο 3

Φαινόμενο υπερσηλαίωσης

3.1 Από τη σηλαίωση στην υπερσηλαίωση

Για αρκετά χρόνια το φαινόμενο της υπερσηλαίωσης θεωρείτο από τους επιστήμονες ως μια οριακή κατάσταση του φαινομένου της σηλαίωσης το οποίο απετέλεσε αντικείμενο θεωρητικής και εφαρμοσμένης έρευνας εδώ και αρκετές δεκαετίες, αλλά για σκοπούς διαφορετικούς από την ανάπτυξη ταχέως κινούμενων υποβρύχιων αντικειμένων. Η μελέτη της σηλαίωσης ήταν αποτέλεσμα των προβλημάτων που προκαλούσε η ταχεία κίνηση αντικειμένων μέσα στο νερό και είχε ως στόχο όχι την αξιοποίηση, αλλά την αποτροπή της εμφάνισης και των αρνητικών συνεπειών του φαινομένου αυτού.

Η σηλαίωση είναι φαινόμενο που σχετίζεται με τη βασική αρχή της δυναμικής των ρευστών, σύμφωνα με την οποία η αύξηση της ταχύτητας ενός ρευστού συνεπάγεται την πτώση της πίεσης του. Καθώς η έλικα ενός πλοίου περιστρέφεται μέσα στο νερό, τα πτερύγια της παρασύρουν ένα στρώμα του υγρού που τα περιβάλλει, με αποτέλεσμα την πτώση της πίεσης του ταχέως κινούμενου αυτού στρώματος νερού. Είναι γνωστό ότι η φυσική κατάσταση του νερού (όπως και κάθε ρευστού) είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης του. Αν η θερμοκρασία του νερού ανέλθει πάνω από ένα όριο (100 βαθμούς C, υπό συνθήκες πίεσης 1 atm) το νερό βράζει και εξατμίζεται, μεταβαίνοντας από υγρή σε αέρια κατάσταση. Το ίδιο συμβαίνει όταν η πίεση του πέσει κάτω από ένα όριο (0,33 atm υπό θερμοκρασία 20 βαθμών C). Όταν λοιπόν η έλικα ενός πλοίου περιστρέφεται με αρκετά μεγάλη ταχύτητα, το στρώμα υγρού που τον περιβάλλει αναγκάζεται να κινηθεί επίσης ταχέως, με αποτέλεσμα μερικές φορές την πτώση της πίεσης του κάτω από το όριο εξάτμισης.

Η εξάτμιση του νερού λόγω ανόδου της θερμοκρασίας διαφέρει από την εξάτμιση του λόγω πτώσης της πίεσης, αν και τα αρχικά φυσικά χαρακτηριστικά των δύο φαινομένων είναι όμοια. Και στις δύο περιπτώσεις σχηματίζονται φυσαλίδες υδρατμών οι οποίες διογκώνονται βαθμιαία. Η διαδικασία αυτή όμως έχει πολύ διαφορετική κατάληξη όταν οφείλεται στην άνοδο της θερμοκρασίας, από ότι όταν οφείλεται στην πτώση της πίεσης. Στην πρώτη περίπτωση, οι σχηματιζόμενες φυσαλίδες είναι σταθερές. Οι υδρατμοί μέσα σε αυτές είτε διαφεύγουν προς την ατμόσφαιρα είτε αποδίδουν τη θερμότητα τους στο περιβάλλον και η φυσαλίδα γεμίζει με υγρό χωρίς να καταρρεύσει, καθώς οι υδρατμοί στο εσωτερικό της συμπυκνώνονται. Στην περίπτωση όμως των φυσαλίδων που σχηματίζονται λόγω της πτώσης της πίεσης του νερού, τα πράγματα είναι διαφορετικά. Οι σχηματιζόμενες φυσαλίδες επιβιώνουν μόνο αν η πίεση παραμένει χαμηλή. Μικρή

άνοδος της πίεσης έχει ως αποτέλεσμα την απότομη προς τα έσω κατάρρευση (implosion) των φυσαλίδων. Έχει παρατηρηθεί ότι φυσαλίδες μεγέθους 1 cm εξαφανίζονται μέσα σε μερικά milliseconds. Λόγω της ξαφνικής και βίαιης κατάρρευσης των φυσαλίδων εμφανίζονται κρουστικά κύματα τα οποία κτυπούν τις μεταλλικές έλικες, σωλήνες ή άλλα τμήματα και προκαλούν φθορές (pitting).

Επιπλέον, όσον αφορά τις έλικες, το φαινόμενο της σπηλαίωσης δεν προκαλεί μόνο φθορά αλλά και μείωση της απόδοσης τους. Η πτώση της πίεσης του νερού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ώθησης που ασκείται στο πλοίο. Όταν οι περιστρεφόμενες έλικες δημιουργούν σημαντική σπηλαίωση, ωθούν στην πραγματικότητα ένα μίγμα υγρού και υδρατμών. Επειδή η πυκνότητα των υδρατμών είναι πολύ μικρότερης αυτής του νερού, η έλικα ωθεί το νερό με πολύ μικρότερη δύναμη, με αποτέλεσμα τη μείωση της ώθησης που μεταφέρεται στο πλοίο. Η σπηλαίωση λοιπόν είναι ένα φαινόμενο με αρνητικές συνέπειες, την εμφάνιση του οποίου οι τεχνικοί προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν σχεδιάζοντας κατάλληλες αύλακες και διόδους και μεταβάλλοντας το σχήμα, το βήμα, τα υλικά κατασκευής ή τη θέση των ελίκων, ώστε η ταχύτητα και συνεπώς η πίεση του διερχόμενου νερού να μη ξεπερνούν ορισμένες τιμές ασφαλείας. Πρόσφατα όμως αναπτύχθηκε μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα της αντιμετώπισης της σπηλαίωσης. Σε πλοία τα οποία κινούνται με ταχύτητες μεγαλύτερες των 60 μιλίων την ώρα, η εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαίωσης στις έλικες είναι αναπόφευκτη. Εδώ έρχεται στο προσκήνιο η υπερσπηλαίωση.

Κατά την εκδήλωση του φαινομένου της υπερσπηλαίωσης, οι μικρές φυσαλίδες υδρατμών που έχουν δημιουργηθεί κατά τη σπηλαίωση διογκώνονται και συνενώνονται σχηματίζοντας μια μεγάλη, σταθερή και με προβλέψιμη συμπεριφορά φυσαλίδα γύρω από το κινούμενο αντικείμενο. Η φυσαλίδα είναι μεγαλύτερη από το αντικείμενο, με αποτέλεσμα μόνον η εμπρόσθια όψη του να έρχεται σε επαφή με το νερό (στην υγρή του κατάσταση). Το υπόλοιπο μέρος του αντικειμένου περιβάλλεται από υδρατμούς χαμηλής πίεσης (μέσα στους οποίους κινείται) με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της υδροδυναμικής αντίστασης. Οι έλικες αρκετών σκαφών που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να υποβοηθείται η εμφάνιση της υπερσπηλαίωσης, με σκοπό την αξιοποίηση της χαμηλότερης υδροδυναμικής αντίστασης.

Η υπερσπηλαίωση μπορεί επίσης να εμφανιστεί και κατά την ταχεία κίνηση ενός ειδικά σχεδιασμένου υποβρύχιου βλήματος. Οι δύο βασικές προϋποθέσεις για την εμφάνιση του φαινομένου είναι η κατάλληλη σχεδίαση του εμπρόσθιου άκρου του βλήματος και η εκτόξευση του με (επαρκώς) υψηλή αρχική ταχύτητα ώστε να δημιουργηθεί το στρώμα νερού χαμηλής πίεσης γύρω από αυτό. Όπως διαπίστωσαν πρώτοι οι Σοβιετικοί ερευνητές, η αιχμή του βλήματος έπρεπε να έχει τη μορφή επίπεδου δίσκου ενώ η αρχική ταχύτητα έπρεπε να είναι της τάξης των 110 μιλίων την ώρα (176 km/hr). Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις το νερό κινείται απομακρυσμένο από την περιφέρεια του εμπρόσθιου τμήματος του βλήματος με ταχύτητα και γωνία τέτοια ώστε να

αποτρέπεται ο στροβιλισμός του γύρω από αυτό. Το αποτέλεσμα είναι η πτώση της πίεσης και η δημιουργία της φυσαλίδας υδρατμών μέσα στην οποία κινείται πλέον το βλήμα, υφιστάμενο ελάχιστη υδροδυναμική αντίσταση. Η υδροδυναμική αντίσταση είναι ως γνωστόν ανάλογη της πυκνότητας του υγρού μέσα στο οποίο κινείται ένα αντικείμενο. Στην περίπτωση της υπερσπηλαίωσης, το αντικείμενο κινείται σε μέσον πολύ μικρότερης πυκνότητας (υδρατμοί) με αποτέλεσμα τη δραστική μείωση της υδροδυναμικής αντίστασης και την επίτευξη πολύ υψηλότερων ταχυτήτων. (Αρκεί να αναφέρουμε ότι η συνολική υδροδυναμική αντίσταση ενός σώματος που κινείται βυθισμένο πλήρως μέσα στο νερό, είναι 1.000 φορές περίπου μεγαλύτερη από την αεροδυναμική αντίσταση σωμάτων που κινούνται στον αέρα). Επίσης, σύμφωνα με κατά προσέγγιση εκτιμήσεις, η επιφανειακή τριβή ενός υποβρυχίου βλήματος που κινείται υπό συνθήκες υπερσπηλαίωσης είναι 200.000 φορές μικρότερη από ότι ενός βλήματος (τορπίλης) που κινείται με συμβατικές ταχύτητες.

Οι φυσαλίδες υδρατμών που δημιουργούνται υπό συνθήκες υπερσπηλαίωσης κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: τις φυσικές και τις υποβοηθούμενες. Οι πρώτες σχηματίζονται με φυσικό τρόπο (διόγκωση και συνένωση μικρότερων φυσαλίδων). Οι δεύτερες σχηματίζονται με τη διοχέτευση αερίων (τεχνητή υποβοήθηση) μέσα στη μερικώς σχηματισμένη φυσαλίδα, τα οποία προέρχονται είτε από το ίδιο το κινούμενο αντικείμενο είτε από κάποια πηγή στην επιφάνεια του νερού. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε, στην τορπίλη με τη διοχέτευση μέρους των αερίων της εξαγωγής του πυραυλοκινητήρα μέσα στη φυσαλίδα. Έχει παρατηρηθεί πάντως ότι αν και τα διοχετευόμενα αέρια αυξάνουν τις διαστάσεις της φυσαλίδας, εισάγουν πρόσθετες μεταβλητές (διαφορετική ελαστικότητα των πρόσθετων αερίων, ταχύτητα διαρροής κλπ.) με αποτέλεσμα την αυξομείωση του σχήματος και του όγκου της φυσαλίδας, η οποία είναι λιγότερο σταθερή από ότι η σχηματιζόμενη με φυσικό τρόπο. Κατά τα άλλα όμως, τόσο οι τεχνητές όσο και οι υποβοηθούμενες φυσαλίδες είναι όμοιες και υπόκεινται στις ίδιες φυσικές αρχές.

Το μέγεθος που προσδιορίζει τη συμπεριφορά μίας φυσαλίδας που δημιουργείται υπό συνθήκες υπερσπηλαίωσης είναι ο συντελεστής σπηλαίωσης K . Ο συντελεστής K (καθαρός αριθμός) αποτελεί συνάρτηση της διαφοράς πίεσης μεταξύ της φυσαλίδας και του περιβάλλοντος νερού, της πυκνότητας του ρευστού και της ταχύτητας του αντικειμένου. Από πρακτική άποψη μπορούμε να πούμε ότι ο συντελεστής αποτελεί μέτρο της αστάθειας της φυσαλίδας. Όσο μειώνεται ο συντελεστής, τόσο αυξάνεται το μέγεθος και η σταθερότητα της φυσαλίδας. Με βάση τον συντελεστή σπηλαίωσης και το σχήμα του εμπρόσθιου άκρου του αντικειμένου, είναι δυνατό να υπολογιστεί το μέγεθος και το σχήμα της φυσαλίδας.

Όπως έχει διαπιστωθεί πειραματικά, η διαδικασία εμφάνισης και καταστροφής της φυσαλίδας που δημιουργείται γύρω από αντικείμενα (βλήματα) που κινούνται με ταχύτητες υπερσπηλαίωσης, έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από τις φυσαλίδες του φαινομένου της

σπηλαιώσης. Μετά την εκτόξευση του με την κατάλληλη αρχική ταχύτητα, εμφανίζεται το φαινόμενο της υπερσπηλαιώσης και το βλήμα περιβάλλεται από τη φυσαλίδα υδρατμών υφιστάμενο πολύ μικρότερη υδροδυναμική αντίσταση. Όταν η ταχύτητα του βλήματος μειωθεί, ο συντελεστής σπηλαιώσης αυξάνεται και η φυσαλίδα συρρικνώνεται μέχρι να εξαφανιστεί πλήρως. Σε αντίθεση όμως με τις φυσαλίδες που εμφανίζονται υπό συνθήκες σπηλαιώσης, η καταστροφή της φυσαλίδας υπερσπηλαιώσης δεν είναι ούτε ξαφνική ούτε βίαιη. Η φυσαλίδα απλώς συρρικνώνεται με αυξανόμενο ρυθμό γύρω από το κινούμενο βλήμα μέχρι να εξαφανιστεί τελείως. Η φθορά στο αντικείμενο από την εξαφάνιση της φυσαλίδας είναι σχεδόν μηδενική, κάτι που αποτελεί πλεονέκτημα συγκρινόμενο με τούς κρατήρες που δημιουργούν οι φυσαλίδες υπό συνθήκες σπηλαιώσης.

Αναφέραμε παραπάνω ότι μια από τις προϋποθέσεις για την εκδήλωση της υπερσπηλαιώσης γύρω από ένα βλήμα που κινείται κάτω από νερό είναι το σχήμα του και συγκεκριμένα η μορφή του εμπρόσθιου άκρου του. Για να δημιουργηθεί η κατάλληλη ροή νερού γύρω από το βλήμα, το εμπρόσθιο άκρο του πρέπει να είναι επίπεδο. Παρά το ότι επίπεδο άκρο σημαίνει και μεγαλύτερη υδροδυναμική αντίσταση, έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι από τη στιγμή που εκδηλώνεται το φαινόμενο της υπερσπηλαιώσης, η συνολική υδροδυναμική αντίσταση μειώνεται δραματικά και η σχέση της με την ταχύτητα του βλήματος γίνεται γραμμική (απλή αναλογία) καθιστώντας δυνατή (θεωρητικά τουλάχιστον) την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων. Ας θυμίσουμε ότι σε συμβατικές ταχύτητες, η υδροδυναμική αντίσταση είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του αντικειμένου. Το φαινόμενο δεν έχει εξηγηθεί πλήρως, αλλά τα πειραματικά δεδομένα είναι αναντίρρητα. Το 1997 Αμερικανοί ερευνητές του Κέντρου Υποβρύχιου Ναυτικού Πολέμου (Naval Undersea Warfare Center, NUWC) ανακοίνωσαν ότι ανέπτυξαν βολίδα με ειδικά σχεδιασμένη επίπεδη αιχμή, η οποία βαλλόμενη από πυροβόλο όπλο τοποθετημένο σε υποβρύχιο ατρακτίδιο, έσπασε το φράγμα του ήχου μέσα στο νερό, επιτυγχάνοντας ταχύτητα της τάξης των 1,6 km/sec. Οι ερευνητές του NUWC μάλιστα δήλωσαν ότι σύμφωνα με τις εκτιμήσεις τους είναι δυνατή η προσέγγιση ή και η κατάρριψη του ρεκόρ ταχύτητας συμβατικών πυρομαχικών στον αέρα (που είναι 2,5 km/sec) από ειδικά σχεδιασμένα υποβρύχια βλήματα που κινούνται υπό συνθήκες υπερσπηλαιώσης.

3.2 Υπερσπηλαιώση και υποβρύχια όπλα στις ΗΠΑ

Η μελέτη του φαινομένου της υπερσπηλαιώσης ξεκίνησε στις ΗΠΑ μέσα στη δεκαετία του 1940. Κατά την ανάπτυξη όμως συναφών ναυτικών εφαρμογών, οι Αμερικανοί ερευνητές εστίασαν την προσοχή τους στην εφαρμογή του φαινομένου σε έλικες υψηλής ταχύτητας και στη μείωση της υδροδυναμικής αντίστασης υδροπτέρυγων σκαφών (οι σχετικές εφαρμογές προτάθηκαν για πρώτη φορά από τον M.Tullin ο οποίος σήμερα είναι διευθυντής του Εργαστηρίου Ωκεανίας

Μηχανολογίας στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας) και όχι στην ανάπτυξη ταχέων υποβρύχιων όπλων. Όπως και αν έχει πάντως, οι περισσότεροι αναλυτές πιστεύουν ότι σήμερα το Αμερικανικό Ναυτικό δεν διαθέτει όπλα που βασίζονται στο φαινόμενο της υπερσπηλαίωσης, αλλά καταβάλλει εντατικές προσπάθειες να φθάσει τους Ρώσους οι οποίοι προηγούνται στον συγκεκριμένο τομέα.

Οι προσπάθειες των Αμερικανών όσον αφορά την ανάπτυξη υποβρύχιων όπλων υπερσπηλαίωσης συντονίζονται από το Γραφείο Ναυτικών Ερευνών (Office of Naval Research) το οποίο υποστηρίζει προγράμματα για λογαριασμό του Αμερικανικού Ναυτικού και του Σώματος Πεζοναυτών και συνεργάζεται με περισσότερα από 450 πανεπιστήμια, εργαστήρια και άλλα ιδρύματα. Όπως αναφέραμε παραπάνω, οι Αμερικανοί έχουν ήδη ανακοινώσει την ανάπτυξη βλημάτων με ειδικά σχεδιασμένη επίπεδη αιχμή που μπορεί να κινηθεί με ταχύτητες υπερσπηλαίωσης και σε πρώτη φάση προορίζεται να χρησιμοποιηθεί σε αποστολές ναρκοπολέμου. Πρόκειται για βλήματα των 20mm τα οποία διατηρούν την ευστάθειά τους σε μέσα διαφορετικής πυκνότητας (αέρα και νερό). Το βλήμα το οποίο στην επιχειρησιακή του έκδοση θα έχει διάμετρο 30mm, θα βάλλεται από περιστροφικό πυροβόλο τύπου Gatling τοποθετημένο σε ελικόπτερο και θα χρησιμοποιείται για την εξουδετέρωση θαλάσσιων ναρκών που βρίσκονται στην επιφάνεια είτε σε μικρό βάθος. Το σχετικό οπλικό σύστημα, γνωστό με την ονομασία (RAMICS, Rapid Airborne Mine Clearance System), εκτός από το περιστροφικό πυροβόλο και τα βλήματα, περιλαμβάνει, ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου πυρός/σταθεροποίησης του όπλου και ένα εξελιγμένο σύστημα σκόπευσης ακτινών λέιζερ οι οποίες διεισδύουν στο νερό και εντοπίζουν με ακρίβεια νάρκες ευρισκόμενες σε μικρό βάθος. Η διάταξη λέιζερ παρέχει τις συντεταγμένες του στόχου στο σύστημα ελέγχου πυρός του RAMICS. Το σύστημα ελέγχου πυρός στρέφει και σταθεροποιεί το όπλο και εκτελεί ριπή 20-50 βλημάτων κατά του στόχου. Τα βλήματα προσκρούουν με υψηλή ταχύτητα στη νάρκη διαπερνώντας το μεταλλικό κέλυφος της και στη συνέχεια θραύονται, απελευθερώνοντας ένα υλικό (χημικό αντιδραστήριο) το οποίο μπορεί να καύσει την εκρηκτική γόμωση της νάρκης. Η καταστροφή της νάρκης είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού της κινητικής ενέργειας του βλήματος και του χημικού αντιδραστήριου. Οι Αμερικανοί μελετούν επίσης την τοποθέτηση μιας κατάλληλα τροποποιημένης έκδοσης του RAMICS σε σκάφη επιφανείας, όπου θα χρησιμεύει ως όπλο αυτοπροστασίας για την αντιμετώπιση τορπιλών.

Ένα άλλο σύστημα που βρίσκεται υπό μελέτη, αφορά την τοποθέτηση παρόμοιων πυροβόλων σε υποβρύχια ατρακτίδια τα οποία θα εκτοξεύουν βλήματα υπερσπηλαίωσης κατά ναρκών ή και επερχομένων τορπιλών. Τα ατρακτίδια του συστήματος (γνωστού ως AHSUM, Adaptable High-Speed Undersea Munitions) θα μπορούν να τοποθετηθούν σε σκάφη επιφανείας και σε υποβρύχια, ενώ η σκόπευση τους θα γίνεται με τη βοήθεια σόναρ.

Η δεύτερη κατηγορία υποβρυχίων όπλων υπερσπηλαίωσης που μελετούν οι Αμερικανοί περιλαμβάνει ταχέως κινούμενες τορπίλες. Τα όπλα αυτά αναπτύσσονται στα πλαίσια του

προγράμματος HSUV (High Speed Undersea Weaponry), που έχει ως στόχο τη σχεδίαση αυτόνομων υποβρύχιων όπλων υψηλής ταχύτητας που θα επιφέρουν επανάσταση στον υποβρύχιο πόλεμο. Τα όπλα προορίζονται για ανθυποβρυχιακό πόλεμο (Anti Submarine Warfare, ASW) και κατά σκαφών επιφανείας (Anti-Surface Warfare, ASuW) και εντάσσονται στα πλαίσια του νέου δόγματος των αμερικανικών ενόπλων δυνάμεων που αποδίδει έμφαση στη διενέργεια παράκτιων επιθετικών επιχειρήσεων και στην ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων ταχείας αντίδρασης για την εξουδετέρωση απειλών σε εγγύς αποστάσεις.

Το πρόγραμμα HSUV έχει τρία επιμέρους αντικείμενα: την φυσική του φαινομένου της υπερσπηλαίωσης, την ανάπτυξη συστημάτων καθοδήγησης και την ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου της πλευσης των όπλων. Το πρώτο αφορά τη μελέτη και κατανόηση των θεμελιωδών αρχών που σχετίζονται με το φαινόμενο της υπερσπηλαίωσης και τον ποσοτικό υπολογισμό των παραμέτρων ροής του ρευστού (νερού) στις δύο φάσεις (υγρή και αέρια). Η ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου αφορά τη σχεδίαση και κατασκευή ακουστικών και μη ακουστικών αισθητήρων, την επεξεργασία σήματος, τις κυματομορφές, τις τεχνικές πρόσκτησης στόχου και τον αυτόματο πιλότο και το σύστημα ελέγχου (είτε αυτόνομο είτε με εξωτερική αλληλεπίδραση) που κατευθύνει το όπλο στον στόχο. Τέλος, η ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου της πλευσης των όπλων, αφορά τη δυνατότητα εκτέλεσης ελιγμών του όπλου υψηλής ταχύτητας με έμφαση στην σταθεροποίηση της φυσαλίδας που σχηματίζεται κατά την υπερσπηλαίωση και τη βελτιστοποίηση του σχήματος της για όσο το δυνατόν μικρότερη υδροδυναμική αντίσταση.

3.3 Εφαρμογές και προβλήματα του φαινομένου

Η έρευνα για την εφαρμογή του φαινομένου της υπερσπηλαίωσης στον ναυτικό πόλεμο σήμερα, περιβάλλεται από μυστικότητα – και φυσικά δεν διεξάγεται μόνο στη Ρωσία, αλλά και στις ΗΠΑ και πιθανότατα και σε άλλες χώρες – ενώ η κατασκοπεία για την απόκτηση των πλεονεκτημάτων που διαθέτει η μία πλευρά πρέπει να θεωρείται δεδομένη (το περιστατικό με τον Αμερικανό που συνελήφθη και καταδικάστηκε στη Ρωσία είναι ενδεικτικό). Η έρευνα φαίνεται να προσανατολίζεται σε τρεις κατηγορίες όπλων:

- Κατευθυνόμενες τορπίλες υψηλής ταχύτητας οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά πλοίων επιφανείας, υποβρυχίων ή και κατά εχθρικών τορπιλών, τορπίλες εξοπλισμένες με πυρηνικές κεφαλές υψηλής ισχύος, οι οποίες μπορούν να βληθούν και να εκραγούν στη μέση μιας εχθρικής αρμάδας (που περιλαμβάνει αεροπλανοφόρα) καταστρέφοντας την ολοσχερώς, ή ακόμη και κατά στόχων στα παράλια (λιμάνια ή άλλες εγκαταστάσεις).
- Βλήματα ή βολίδες υπερηχητικών ταχυτήτων που μπορούν να βληθούν από πολυβόλα ή πυροβόλα τοποθετημένα σε ελικόπτερα ή υποβρύχια ατρακτίδια για την καταστροφή θαλάσσιων ναρκών, εχθρικών τορπιλών ή και σκαφών. Οι Αμερικανοί ανακοίνωσαν την

ανάπτυξη μίας τέτοιας βολίδας η οποία βάλλεται από περιστροφικά πυροβόλα τύπου Gatling εγκατεστημένα σε ελικόπτερα κατά ποντισμένων θαλάσσιων ναρκών επιτυγχάνοντας την εξουδετέρωση τους με μικρότερο κόστος και μεγαλύτερη ασφάλεια, ενώ μελετάται επίσης και η τοποθέτηση σε υποβρύχια ή και σκάφη επιφανείας υποβρυχίων ατρακτιδίων με παρόμοια πυροβόλα που θα λειτουργούν ως όπλα εξουδετέρωσης επερχόμενων τορπιλών.

- Υπερταχεία (υπερηχητικά) υποβρύχια σκάφη, η ανάπτυξη των οποίων θα επέφερε ριζικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο διεξάγεται σήμερα ο ναυτικός πόλεμος. Σύμφωνα με μια εκδοχή, μικρά υπερταχεία υποβρύχια θα μπορούσαν να μεταφέρονται από ένα μητρικό σκάφος σε κοντινές σχετικά αποστάσεις από τους στόχους και κατόπιν να εκτοξεύουν και να κινούνται αυτόνομα διεξάγοντας ταχύτατες επιθέσεις με πυροβόλα ή πολυβόλα που εκτοξεύουν βλήματα κινούμενα επίσης με ταχύτητες υπερσηλαίωσης.

Είναι βέβαια φανερό ότι εκτός από την ανάπτυξη τορπιλών και άλλων βλημάτων που κινούνται με υψηλές ταχύτητες κάτω από το νερό, η πλέον ενδιαφέρουσα εφαρμογή θα ήταν η ανάπτυξη υποβρυχίων ικανών να κινούνται με ταχύτητες υπερσηλαίωσης. Εκτός από τον ναυτικό πόλεμο, μια τέτοια κατηγορία σκαφών θα είχε προφανείς εφαρμογές και στον πολιτικό τομέα. Για παράδειγμα, ένα υποβρύχιο κινούμενο με ταχύτητα 2,5km/sec υπό συνθήκες υπερσηλαίωσης, θα μπορούσε να διασχίσει τον ατλαντικό σε διάστημα λιγότερο της μιας ώρας.

Όμως η κίνηση υποβρυχίων με υπερηχητικές ταχύτητες παρουσιάζει ακόμη μεγάλες τεχνικές προκλήσεις που αφορούν τόσο τα συστήματα πρόωσης, όσο και (κυρίως) τα συστήματα πλοήγησης και ελέγχου. Η πρόωση των τορπιλών Shkval που έχουν αναπτύξει οι Ρώσοι γίνεται με τη βοήθεια πυραυλοκινητήρα στερεών προωθητικών (για την ακρίβεια χρησιμοποιούνται δύο πυραυλοκινητήρες, ένας κύριος και ένας βοηθητικός για την αρχική εκκίνηση). Για την επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης εμβέλειας, απαιτούνται προωθητικά υψηλής ενεργειακής πυκνότητας που παρέχουν μέγιστη ειδική ώση. Οι τεχνικοί φαίνεται να συμφωνούν ότι με τη χρήση πυραυλοκινητήρα στερεών προωθητικών, μια τορπίλη παρόμοια με τη Shkval, μπορεί να πετύχει μέγιστη ταχύτητα της τάξης των 200m/sec (720 km/hr) και βεληνεκές αρκετών δεκάδων χιλιομέτρων. Ως προωθητικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέταλλα (αλουμίνιο, μαγνήσιο ή λίθιο) ενώ ως οξειδωτικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί το νερό (το οποίο μπορεί να παίζει επίσης τον ρόλο ψυκτικού). Το πιο ενεργητικό από τα μεταλλικά αυτά προωθητικά είναι το αλουμίνιο, το οποίο μπορεί να οξειδωθεί (καεί) αναπτύσσοντας θερμοκρασία 10.600 βαθμών C. Οι πυραυλοκινητήρες όμως δεν θεωρούνται ως τα καταλληλότερα μέσα για την πρόωση μεγάλων υποβρυχίων που θα εκτελούν ταξίδια εκατοντάδων ή χιλιάδων χιλιομέτρων με υπερηχητικές ταχύτητες.

Εκτός από την πρόωση με πυραυλοκινητήρες, οι Ρώσοι έχουν αναπτύξει ένα σύστημα στροβιλοελίκων (turbine – driven propeller screws). Στο σύστημα αυτό τα αέρια για τη κίνηση του

στροβίλου παράγονται (όπως και στον πυραυλοκινητήρα) από την αντίδραση αλουμινίου – οξειδωτικού. Η αντίδραση αυτή μπορεί να επιταχυνθεί μέσω της ρευστοποίησης (τήξης) του μετάλλου και της εξάτμισης του νερού. Η θερμότητα από τον θάλαμο καύσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τήξη φύλλων αλουμινίου και επίσης για την εξάτμιση του νερού. Οι Αμερικανοί επίσης έχουν αναπτύξει μια παρόμοια εφαρμογή (water ramjet system) που χρησιμοποιείται ως βοηθητική πηγή ισχύος σε σκάφη επιφανείας. Στην αμερικάνικη εφαρμογή, το αλουμίνιο υπό μορφή σκόνης τροφοδοτείται σε μια δίνη θαλάσσιου νερού, η οποία σχηματίζεται μέσα σε ένα ειδικό θάλαμο καύσης (vortex chamber). Η ταχεία περιδίνηση του νερού προκαλεί την τριβή των κόκκων της σκόνης αλουμινίου μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να απομακρύνεται το αδρανές στρώμα οξειδίου του αλουμινίου. Η θερμότητα της αντίδρασης αυτής χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού ο οποίος μπορεί να παράγει ώση εξερχόμενος με μεγάλη ταχύτητα από ένα ακροφύσιο, είτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση στροβιλοελίκων. Δοκιμές με πειραματικές διατάξεις έδειξαν ότι η χρήση στροβιλοελίκων μπορεί να παράγει 20% περισσότερη ώση από ότι ένας πυραυλοκινητήρας. Ας αναφέρουμε πάντως ότι τα συστήματα αυτά αφορούν την πρόωση τορπιλών και όχι την πρόωση μεγάλων υποβρυχίων με ταχύτητες υπερσπηλαίωσης. Στην περίπτωση των σκαφών αυτών η επικρατέστερη μέχρι σήμερα λύση φαίνεται να είναι αυτή του πυρηνικού αντιδραστήρα.

Όμως, το κύριο πρόβλημα για την ανάπτυξη υπερταχέων υποβρυχίων αφορά τη δυνατότητα αλλαγής κατεύθυνσης τους υπό συνθήκες υπερσπηλαίωσης. Αν και μερικοί αναλυτές υποψιάζονται ότι το ναυτικό της Ρωσίας και πιθανόν των ΗΠΑ είναι κοντά στη λύση του προβλήματος, φαίνεται ότι προς το παρόν δεν είναι δυνατή η δυνατότητα αλλαγής κατεύθυνσης βλημάτων ή υποβρυχίων χωρίς μείωση της ταχύτητας. Ο λόγος είναι ότι το μόνο τμήμα του υποβρυχίου το οποίο έρχεται σε επαφή με το νερό είναι το εμπρόσθιο άκρο του, ενώ η χρησιμοποίηση και άλλων επιφανειών για τον έλεγχο της πορείας του θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της υδροδυναμικής αντίστασης και τη μείωση της ταχύτητας.

Ένα άλλο πρόβλημα, τέλος, είναι η ασταθής συμπεριφορά του ουραίου τμήματος της φουσαλίδας που σχηματίζεται σε ταχύτητες υπερσπηλαίωσης, αλλά και του ίδιου του σκάφους που κινείται μέσα σε αυτήν. Η ουρά της φουσαλίδας δημιουργεί βίαιους παφλασμούς γύρω από το κινούμενο σκάφος με αποτέλεσμα ενδεχόμενη καταστροφή των επιφανειών ελέγχου ή τμημάτων του μηχανισμού πρόωσης. Επίσης, τα κινούμενα μέσα στη φουσαλίδα υποβρυχία αντικείμενα σε ταχύτητες υπερσπηλαίωσης παρουσιάζουν αρκετή αστάθεια, οφειλόμενη πιθανότατα στον τρόπο εισόδου τους μέσα στο νερό. Τα σώματα κλίνουν και ταλαντώνονται γύρω από το εμπρόσθιο άκρο τους, με αποτέλεσμα το οπίσθιο τμήμα τους να κτυπά στα πλευρά της φουσαλίδας. Εφόσον οι επιφάνειες της φουσαλίδας αποτελούνται από νερό σε υγρή κατάσταση, οι προσκρούσεις αυτές αυξάνουν την υδροδυναμική αντίσταση και μειώνουν την ταχύτητα του σώματος. Το αποτέλεσμα

είναι η συρρίκνωση της φυσαλίδας και ο κίνδυνος κατάρρευσης και εξαφάνισης της. Η προστασία ενός υποβρυχίου από τις προσκρούσεις λόγω της αστάθειας τόσο της φυσαλίδας όσο και του ίδιου, θα μπορούσε να εξασφαλιστεί διογκώνοντας τη φυσαλίδα με τεχνητή διοχέτευση αέρα (υποβοήθηση). Όμως η τεχνητή διοχέτευση αέρα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αστάθειας, και στις υψηλές ταχύτητες υπερσπηλαιώσης οι πλευρικές επιταχύνσεις λόγω των αναταράξεων, ιδίως στο ουραίο τμήμα του σκάφους, θα είναι πολύ υψηλές για τους επιβάτες.

3.4 Πλοίο τεχνολογίας << supercavitation>>



Αποτελούσε ένα από τα <<μαύρα>> προγράμματα του Πενταγώνου, που πραγματοποιούν εταιρίες για λογαριασμό τους, χωρίς ποτέ να έρχεται στην επιφάνεια η ύπαρξη τους. Όμως ένα από αυτά αποκαλύφθηκε, από την ίδια την εταιρία που το αναπτύσσει, την Juliet Marine, καθώς το Αμερικανικό Ναυτικό πήρε τους περιορισμούς απορρήτου στο πρόγραμμα. Πρόκειται για το GHOST, το πρώτο πλοίο που χρησιμοποιεί τεχνολογία <<super-cavitation>> για την ανάπτυξη υψηλής ταχύτητας, που περιγράφεται από τους σχεδιαστές του σαν γεγονός το ίδιο σημαντικό με την επίτευξη υπερηχητικής ταχύτητας από αεροπλάνα. Η σπηλαιώση είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται στην κίνηση σωμάτων με πολύ υψηλές ταχύτητες μέσα σε ρευστά (υγρά), όπου δημιουργούνται κοιλότητες (ασυνέχειες) στη μάζα τους. Το ρευστό προσπαθώντας να αποκαταστήσει την διαταραχή, προκαλεί διάφορα επακόλουθα, όπως τη δημιουργία ισχυρών δυνάμεων πάνω στο σώμα που την δημιουργεί, δραματική αύξηση της τριβής, υψηλό επίπεδο θορύβου κ.α.



Στην περίπτωση του GHOST, η τεχνολογία αντί-σπηλαίωσης επιτρέπει στο σκάφος να κινείται μέσα σε ένα <<τεχνητό αέριο περιβάλλον>> στα μέρη που βρίσκονται κάτω από το νερό, μειώνοντας την τριβή κατά 900%, αυξάνοντας κατακόρυφα την δυνατότητα ανάπτυξης ταχύτητας και μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου. Η ταχύτητα του και η αφανής του κίνηση, το καθιστά ιδανικό για ειδικές επιχειρήσεις, μπορεί να αναπτύσσει ταχύτητες μέχρι 60 κόμβους. Το σχήμα του, όπως απεικονίζετε στην φωτογραφία, είναι παρόμοιο με αυτά που προσπαθούσαν να δώσουν οι Αμερικανοί σε σκάφη του πολεμικού ναυτικού την δεκαετία του 80 για την αποφυγή αποκάλυψης από ραντάρ επιφανείας. Με άλλα λόγια η τεχνολογία δημιουργεί γύρω από το σκάφος μια φυσαλίδα αέρα που λειτουργεί σαν οριακό στρώμα (boundary layer) γύρω από το κύτος που μειώνει την τριβή. Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρία, το GHOST έχει περίπου την ίδια μέγιστη ταχύτητα με τα σκάφη Mark V που χρησιμοποιούν οι SEALs, αλλά την επιταχύνει πολύ πιο γρήγορα, ενώ το κυριότερο μπορεί να ταξιδέψει με υψηλή ταχύτητα στη διπλάσια απόσταση.

Επίλογος – Συμπεράσματα

Το φαινόμενο της υπερσπηλαίωσης σχετίζεται άμεσα με το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Το τελευταίο προσπαθούμε να το αποφύγουμε και το πρώτο να το αξιοποιήσουμε. Η μελέτη του φαινομένου της υπερσπηλαίωσης έχει να κάνει με την εφαρμογή του κυρίως σε όπλα.

1. Κατευθυνόμενες τορπίλες υψηλής ταχύτητας.
2. Βλήματα ή βολίδες υπερηχητικών ταχυτήτων που μπορούν να βληθούν από πολυβόλα ή πυροβόλα τοποθετημένα σε ελικόπτερα ή υποβρύχια ατρακτίδια για την καταστροφή θαλάσσιων ναρκών, εχθρικών τορπίλων ή και σκαφών.
3. Υπερταχέα (υπερηχητικά) υποβρύχια σκάφη, η ανάπτυξη των οποίων θα επέφερε ριζικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο διεξάγεται σήμερα ο ναυτικός πόλεμος. Σύμφωνα με μια εκδοχή, μικρά υπερταχέα υποβρύχια θα μπορούσαν να μεταφέρονται από ένα μητρικό σκάφος σε κοντινές σχετικά αποστάσεις από τους στόχους και κατόπιν να εκτοξεύουν και να κινούνται αυτόνομα διεξάγοντας ταχύτατες επιθέσεις με πυροβόλα ή πολυβόλα που εκτοξεύουν βλήματα κινούμενα επίσης με ταχύτητες υπερσπηλαίωσης.
4. Πλοίο τεχνολογίας υπερσπηλαίωσης. Πρόκειται για το GHOST, το πρώτο πλοίο που χρησιμοποιεί τεχνολογία <<super-cavitation>> για την ανάπτυξη υψηλής ταχύτητας, που περιγράφεται από τους σχεδιαστές του σαν γεγονός το ίδιο σημαντικό με την επίτευξη υπερηχητικής ταχύτητας από αεροπλάνα.

Βιβλιογραφία

1. Πάντζαλης Νικόλαος, Μηχανική των ρευστών (2008), Ίδρυμα Ευγενίδου
2. Παπαθανάσης Ηλίας, Περισκόπιο της επιστήμης (2002)
3. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.
4. <https://ptisidiastima.wordpress.com>
5. http://tolmwannika.blogspot.gr/2011/09/blog-post_07.html
6. <http://en.wikipedia.org/wiki/Supercavitation>
7. <http://cav.safll.umn.edu/>

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Πρόλογος	5
Κεφάλαιο 1: Βασικές έννοιες	
1.1 Η σημασία των ρευστών	6
1.2 Ιδιότητες των ρευστών	7
1.2.1 Θερμοκρασία	7
1.2.2 Πίεση	8
1.2.3 Πυκνότητα	8
1.2.4 Τάση ατμών	9
1.2.5 Ιξώδες ή συνεκτικότητα	9
1.2.6 Συντελεστής ιξώδους	10
Κεφάλαιο 2: Φαινόμενο σπηλαίωσης	
2.1 Ορισμός σπηλαίωσης	11
2.2 Πίεση ατμοποίησης	11
2.3 Κύριες μορφές σπηλαίωσης	12
2.4 Σπηλαίωση σε πρακτικές εφαρμογές	16
2.4.1 Στάδια σπηλαίωσης	16
2.4.2 Ευνοϊκές συνθήκες για την εμφάνιση σπηλαίωσης	16
2.4.3 Οι κύριες επιπτώσεις της σπηλαίωσης σε υδραυλικά συστήματα	17
2.5 Ειδικά χαρακτηριστικά της σπηλαίωσης	17
2.5.1 Πίεση και κλίση πίεσης	17
2.5.2 Διεπιφάνειες υγρού-ατμού	18
2.5.3 Τυπικά μεγέθη σπηλαίωσης	19
2.6 Αδιάστατες παράμετροι	19
2.6.1 Αριθμός σπηλαίωσης (cavitation number)	19
2.6.2 Σχετική υποπίεση	19
2.7 Μικροφουσαλίδες και σπηλαίωση	20
2.7.1 Πυρήνες σπηλαίωσης ή μικροφουσαλίδες	20
Κεφάλαιο 3: Φαινόμενο υπερσπηλαίωσης	
3.1 Από τη σπηλαίωση στην υπερσπηλαίωση	21
3.2 Υπερσπηλαίωση και υποβρύχια όπλα στις ΗΠΑ	24

3.3 Εφαρμογές και προβλήματα του φαινομένου	26
3.4 Πλοίο τεχνολογίας << supercavitation>>	29
Επίλογος – Συμπεράσματα	31
Βιβλιογραφία	32