



Δρ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΑΡΩΝΗΣ - ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ
ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ 9, 157 80 ΖΩΓΡΑΦΟΥ
ΤΗΛ: 210 - 772 3825, 772 3143 FAX: 210 - 7723 163
email: dkaronis@central.ntua.gr

Ζωγράφου 8/5/2025

Προς: Εφέτη – Ανακριτή Λάρισας κ. Σωτήριο Μπακαΐμη
Θέμα: Υποβολή Πραγματογνωμοσύνης για το Δυστύχημα των Τεμπών

Αξιότιμε κ. Εφέτη – Ανακριτά,

Σας υποβάλλω προς την πραγματογνωμοσύνη για το τραγικό δυστύχημα που οδήγησε στον αδόκητο θάνατο 57 ανθρώπων το βράδυ της 28^{ης} Φεβρουαρίου 2023.

Η πραγματογνωμοσύνη ανατέθηκε με τη Διάταξη Διορισμού 4/2024 (Αριθμός Δικογραφίας: Φ2023/49α'(ΕΓ4-23/3)).

Με εκτίμηση,

Δημήτριος Καρώνης
Καθηγητής, Μέλος του Συμβουλίου Διοίκησης του ΕΜΠ

Πραγματογνωμοσύνη σε Απάντηση της Διάταξης Διορισμού 4/2024
(Αριθμός Δικογραφίας: Φ2023/49α'(ΕΓ4-23/3)) από τον Εφέτη Ανακριτή
Λάρισας κ. Σωτήριο Μπακαΐμη

Συντάκτης: Δημήτριος Καρώνης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος 2025

Αφιερώνεται στη μνήμη των αθών θυμάτων του τραγικού δυστυχήματος της 28^{ης}
Φεβρουαρίου 2023



Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	1
1.1. Εισαγωγή	1
1.2. Αντικείμενο της Πραγματογνωμοσύνης	1
1.3. Υλικό	1
1.4. Διάρθρωση της Αναφοράς	5
Κεφάλαιο 2	6
2.1. Φωτιά	6
2.2. Ανάφλεξη	7
2.3. Όρια Αναφλεξιμότητας	8
2.4. Τύποι Συμβάντων Φωτιάς	9
2.5. Πύρινες Σφαίρες	11
2.6. Συνθήκες Σχηματισμού Εύφλεκτου Νέφους	11
2.7. Τα Βασικά Στοιχεία της Ακτινοβολίας της Φωτιάς	12
2.8. Στατικό Μοντέλο	13
2.8.1. Σχήμα Πύρινης Σφαίρας	13
2.8.2. Διάμετρος Πύρινης Σφαίρας	13
2.8.3. Διάρκεια Πύρινης Σφαίρας	14
2.8.4. Μάζα Καυσίμου που Εμπλέκεται	14
2.8.5. Εκπεμπόμενη Θερμική Ακτινοβολία	15
2.8.6. Θέση της Πύρινης Σφαίρας	15
2.8.7. Συντελεστής Θέασης	15
2.8.8. Διαπερατότητα της Ατμόσφαιρας	16
2.9. Δυναμικό Μοντέλο	16
2.9.1. Σχήμα Πύρινης Σφαίρας	16
2.9.2. Μάζα του Εμπλεκόμενου Καυσίμου	16
2.9.3. Διάρκεια της Πύρινης Σφαίρας	17
2.9.4. Διάμετρος και Θέση της Πύρινης Σφαίρας	17
2.9.5. Εκπεμπόμενη Θερμική Ακτινοβολία	18
2.9.6. Συντελεστής Θέασης	19
2.9.7. Διαπερατότητα της Ατμόσφαιρας	19
2.10. Πύρινες Σφαίρες από Εκνεφώματα Υγρών	19
2.10.1. Εκνεφώματα Σταγονιδίων	19
2.10.2. Οδηγία EN 60079-10-1 για Εκρηκτικές Ατμόσφαιρες	21
2.11. Διαδικασίες Υπολογισμού Εκροής Υγρού από Δοχείο	24
2.11.1. Διαδικασία Υπολογισμών TNO	24
2.11.2. Διαδικασία Υπολογισμών ADAM	26
Κεφάλαιο 3	29
3.1. Έλαια Μετασχηματιστών	29
3.2. Σημείο Ανάφλεξης	30
3.3. Μονωτικά Υλικά Μετασχηματιστών – Σχηματισμός Αερίων	30
3.4. Έλαια Σιλικόνης	31
3.5. Αιτίες Σχηματισμού Αερίων σε Μετασχηματιστές	31
3.5.1. Θερμική Αποσύνθεση του Ελαίου	32
3.5.2. Χημική Αποσύνθεση του Ελαίου	32
3.5.3. Θερμική Αποσύνθεση Κυτταρινούχου Υλικού	33

3.5.4.	Αποσύνθεση λόγω Μερικής Εκφόρτισης	34
3.5.5.	Διάσπαση από Ηλεκτρικό Τόξο	34
3.6.	Αναφλεξιμότητα Ελαίων Σιλικόνης	35
3.7.	Θερμική Αποικοδόμηση των Πολυδιμεθυλοσιλοξανίων	36
3.7.1.	Αποπολυμερισμός	36
3.7.2.	Αντίδραση Τυχαίας Διάσπασης	37
3.7.3.	Κυκλικά Διμεθυλοσιλοξάνια	37
3.7.4.	Καύση Πολυδιμεθυλοσιλοξανίων.....	40
3.8.	Εργασίες Δοκιμών Καύσης Ελαίων Σιλικόνης.....	42
3.8.1.	Δοκιμές Ανάφλεξης με Φρέσκο Έλαιο	42
3.8.2.	Εργαστηριακές Δοκιμές Ελέγχου Ανάφλεξης με Επιβολή Τόξου.....	46
3.8.3.	Δοκιμές Πεδίου Ελέγχου Ανάφλεξης με Επιβολή Τόξου	50
Κεφάλαιο 4	56
4.1.	Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες	56
4.1.1.	Μονοαρωματικοί Υδρογονάνθρακες	56
4.1.2.	Σχηματισμός Μονοαρωματικών Υδρογονανθράκων σε Συνθήκες Καύσης ..	58
4.1.3.	Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες.....	61
4.1.4.	Σχηματισμός Πολυκυκλικών Αρωματικών Υδρογονανθράκων σε Συνθήκες Καύσης	62
4.1.5.	Παρουσία Μονοαρωματικών Υδρογονανθράκων στο Έδαφος	70
4.1.6.	Μετακίνηση Ξυλολίου στο Έδαφος	77
4.2.	Άλλες Οργανικές Ενώσεις.....	79
4.2.1.	Καρβονυλικές Ενώσεις	80
4.2.2.	Εκπομπές από Καύση Πολυμερών.....	82
4.3.	Ποσοτικοποίηση Εκπομπών από Καύση	86
4.4.	Πτητικές Οργανικές Ενώσεις στο Έδαφος	89
4.5.	Όρια Ρύπων στο Έδαφος.....	91
Κεφάλαιο 5	97
5.1.	Δειγματοληψίες – Δείγματα.....	97
5.2.	Κατηγορίες Ενώσεων.....	98
5.3.	Συνοπτικός Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	99
5.3.1.	Δείγματα Σειράς ΕΜΠ 12	99
5.3.2.	Δείγματα Σειράς ΕΜΠ 42.....	100
5.3.3.	Δείγματα Σειράς ΕΜΠ 51.....	102
5.3.4.	Δείγματα Σειράς ΕΜΠ 12.....	102
5.3.5.	Δείγματα Σειράς ΕΜΠ 13.....	102
5.3.6.	Δείγματα Σειράς ΕΜΠ 17.....	104
5.3.7.	Δείγματα Σειράς ΕΜΠ 23.....	107
5.3.8.	Δείγματα Σειράς ΕΜΠ 25.....	107
5.3.9.	Δείγματα Σειράς ΕΜΠ 33.....	107
5.3.10.	Μονοαρωματικοί Υδρογονάνθρακες στα Δείγματα Πολυμερών.....	108
5.4.	Απαντήσεις στα Ερωτήματα.....	109
5.4.1.	Ερώτημα 1: Δικαιολογούνται τα ευρήματα των αναλύσεων του Γενικού Χημείου του Κράτους (Γ.Χ.Κ.) από την ίδια τη σύσταση των υλικών των δειγμάτων που αναλύθηκαν;	109

5.4.2.	Ερώτημα 2: Δικαιολογούνται τα ευρήματα των αναλύσεων του Γενικού Χημείου του Κράτους (Γ.Χ.Κ.) από τα φορολογικά και λοιπά στοιχεία-έγγραφα φόρτωσης της εμπορικής αμαξοστοιχίας;.....	110
5.4.3.	Ερώτημα 3: Δικαιολογούνται τα ευρήματα των αναλύσεων του Γενικού Χημείου του Κράτους (Γ.Χ.Κ.) από τα υλικά κατασκευής των συγκρουσθαισών επιβαταμαξών, φορταμαξών και ηλεκτραμαξών;	111
5.4.4.	Ερώτημα 4: Δικαιολογούνται τα ευρήματα των αναλύσεων του Γενικού Χημείου του Κράτους (Γ.Χ.Κ.) από τη σύσταση και τα ειδικότερα χαρακτηριστικά του ελαίου (σιλικόνης) ψύξης των μετασχηματιστών (Μ/Σ) των ηλεκτραμαξών των συγκρουσθαισών αμαξοστοιχιών;	112
5.4.5.	Ερώτημα 5: Σε τι κατά την γνώμη του οφείλεται το καταγραφέν από τις κάμερες φαινόμενο «πύρινης σφαίρας» («fireball») και με ποιο μηχανισμό εκδηλώθηκε αυτό;	112
5.4.6.	Ερώτημα 6: Είναι δυνατή η καύση του ελαίου (σιλικόνης) ψύξης των μετασχηματιστών (Μ/Σ) των ηλεκτραμαξών των συγκρουσθαισών αμαξοστοιχιών; Εάν ναι, υπό ποιες συνθήκες;.....	122

Κεφάλαιο 1

1.1. Εισαγωγή

Η παρούσα αναφορά περιλαμβάνει την πραγματογνωμοσύνη για το τραγικό δυστύχημα που συνέβη στις 28-02-2023 στην περιοχή των Τεμπών, όπου συγκρούστηκαν δύο αμαξοστοιχίες και είχε ως αποτέλεσμα τον αδόκητο θάνατο 57 επιβαινόντων. Η ανάθεση της πραγματογνωμοσύνης έγινε με τη Διάταξη Διορισμού 4/2024 (Αριθμός Δικογραφίας: Φ2023/49α'(ΕΓ4-23/3)) από τον Εφέτη Ανακριτή Λάρισας κ. Σωτήριο Μπακαΐμη στις 15-03-2024. Στις 21-03-2024 απεστάλη στον Πρύτανη του ΕΜΠ Καθηγητή Ιωάννη Χατζηγεωργίου το με ΑΠ 103/21-03-2024 σχετικό έγγραφο ενημέρωσης σχετικά με τη διαδικασία ορκωμοσίας ενώπιον Ανακριτή του Πρωτοδικείου. Η σχετική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Πρωτοδικείο Αθηνών στις 01-04-2024.

1.2. Αντικείμενο της Πραγματογνωμοσύνης

Όπως αναφέρεται στη Διάταξη Διορισμού 4/2024, το αντικείμενο της πραγματογνωμοσύνης ήταν η απάντηση στα ακόλουθα ερωτήματα:

- 1) Δικαιολογούνται τα ευρήματα των αναλύσεων του Γενικού Χημείου του Κράτους (Γ.Χ.Κ.) από την ίδια τη σύσταση των υλικών των δειγμάτων που αναλύθηκαν;
- 2) Δικαιολογούνται τα ευρήματα των αναλύσεων του Γενικού Χημείου του Κράτους (Γ.Χ.Κ.) από τα φορολογικά και λοιπά στοιχεία-έγγραφα φόρτωσης της εμπορικής αμαξοστοιχίας;
- 3) Δικαιολογούνται τα ευρήματα των αναλύσεων του Γενικού Χημείου του Κράτους (Γ.Χ.Κ.) από τα υλικά κατασκευής των συγκρουσθεισών επιβαταμαξών, φορταμαξών και ηλεκτραμαξών;
- 4) Δικαιολογούνται τα ευρήματα των αναλύσεων του Γενικού Χημείου του Κράτους (Γ.Χ.Κ.) από τη σύσταση και τα ειδικότερα χαρακτηριστικά του ελαίου (σιλικόνης) ψύξης των μετασχηματιστών (Μ/Σ) των Ηλεκτραμαξών των συγκρουσθεισών αμαξοστοιχιών;
- 5) Σε τι κατά την γνώμη του οφείλεται το καταγραφέν από τις κάμερες φαινόμενο «πύρινης σφαίρας» («fireball») και με ποιο μηχανισμό εκδηλώθηκε αυτό;
- 6) Είναι δυνατή η καύση του ελαίου (σιλικόνης) ψύξης των μετασχηματιστών (Μ/Σ) των Ηλεκτραμαξών των συγκρουσθεισών αμαξοστοιχιών; Εάν ναι, υπό ποιες συνθήκες;
- 7) να επισημάνει - υποδείξει, ό,τι άλλο κρίνει βάσει των επιστημονικών του γνώσεων και των διαπιστώσεών του ως σημαντικό.

Την αιτιολογημένη απάντηση επί των ερωτημάτων αυτών και τις επισημάνσεις υποδείξεις του ο εν λόγω διορισθείς πραγματογνώμονας θα περιλάβει στην έκθεση-γνωμοδότηση που θα συντάξει εγγράφως και θα καταθέσει νομίμως.

1.3. Υλικό

Το υλικό που απεστάλη από τη Γραμματεία του Εφέτη Ανακριτή για να μελετηθεί και να ληφθεί υπόψη στη σύνταξη της πραγματογνωμοσύνης αποτυπώνεται στη συνέχεια.

- Στις 11-04-2024 απεστάλη μέσω courier το αναφερόμενο στην Διάταξη Διορισμού υλικό, ήτοι:
 - Το με ΑΠ 2179_Φ.706.12/23-03-2023 έγγραφο της ΔΙΠΥΝ Λάρισας με θέμα "Ορισμός Πραγματογνώμονα-ων", η 14/24-03-2023 παραγγελία του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας προς τη Χημική Υπηρεσία Λάρισας και το με ΑΠ ΕΜΠ 12/10-05-2023 έγγραφο της Β Χ.Υ. Αθηνών του Γενικού Χημείου του Κράτους με θέμα: "Εκθέσεις εξέτασης δειγμάτων που ελήφθησαν κατόπιν του ΑΠ 14/24-03-2023 έγγραφο του Εφετείου Λάρισας"
 - Το με ΑΠ ΕΜΠ 27/30-06-2023 έγγραφο της Β Χ.Υ. Αθηνών του Γενικού Χημείου του Κράτους με θέμα "Απαντήσεις σε ερωτήματα του Εφετείου Λάρισας" και το με ΑΠ 110/27-6-2023 έγγραφο του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας

- Το με ΑΠ ΕΜΠ 30/28-07-2023 έγγραφο της Β Χ.Υ. Αθηνών του Γενικού Χημείου του Κράτους με θέμα "Απάντηση σε ερώτημα ποσοτικοποίησης ξυλλογίου" μαζί με το από 25-07-2023 μήνυμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου του Δικαστικού Πραγματογνώμονα Απόστολου Βασιλάκου και η από 28-07-2023 απάντηση σε αυτό
- Το με ΑΠ ΕΜΠ 43/13-10-2023 έγγραφο της Β Χ.Υ. Αθηνών του Γενικού Χημείου του Κράτους με θέμα "Αποστολή αντιγράφων πρωτογενών δεδομένων" και το με ΑΠ 169/13-10-2023 έγγραφο του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας
- Η με ΑΠ 136/7-8-2023 παραγγελία προς τη Χημική Υπηρεσία Λάρισας, το με ΑΠ ΕΜΠ 30/18-8-2023 έγγραφο της Χημικής Υπηρεσίας Λάρισας με θέμα "Λήψη Δειγμάτων που αφορούν στο σιδηροδρομικό δυστύχημα", η με ΑΠ 142/21-08-2023 παραγγελία του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας, η με ΑΠ 167/02-10-2023 παραγγελία του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας, το με ΑΠ ΕΜΠ 39/05-09-2023 έγγραφο της Χημικής Υπηρεσίας Λάρισας με θέμα "Δειγματοληψία πειστηρίων που αφορούν στο σιδηροδρομικό δυστύχημα" με συνημμένα το με ΑΠ 1019/21/1-ρζ'/31-08-2023 έγγραφο του Τμήματος Τροχαίας Λάρισας και το από 30-08-2023 μήνυμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, η με ΑΠ 173/24-10-2023 παραγγελία του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας, το με ΑΠ ΕΜΠ 48/02-10-2023 έγγραφο της Χημικής Υπηρεσίας Λάρισας με θέμα "Αποστολή Πρωτοκόλλου Δειγματοληψίας Κατασχεμένων πειστηρίων", το από 03-10-2023 αποδεικτικό παράδοσης-παραλαβής, το με ΑΠ ΕΜΠ 55/26-10-2023 έγγραφο της Χημικής υπηρεσίας Λάρισας με θέμα "Αποστολή Πρωτοκόλλου Δειγματοληψίας 1-14/25-10-2023", το με ΑΠ 1019/21/1-ρη'/28-09-2023 έγγραφο του Τμήματος Τροχαίας Λάρισας μαζί με το με ΑΠ 9001/13/1909-ε'/30-09-2023 έγγραφο του Τμήματος Εγκληματολογικών Ερευνών Λάρισας, το με ΑΠ ΕΜΠ 51/22-11-2023/16-01-2024 έγγραφο της Β Χ.Υ Αθηνών με θέμα "Εκθέσεις εξέτασης δειγμάτων που ελήφθησαν κατόπιν των με ΑΠ 136/7-8-2023 και 142/21-08-2023 εγγράφων του Εφετείου Λάρισας", το με ΑΠ ΕΜΠ 42/13-10-2023/21-12-2023 έγγραφο της Β Χ.Υ. Αθηνών με θέμα "Εκθέσεις εξέτασης δειγμάτων κατασχεμένων πειστηρίων που ελήφθησαν κατόπιν των με ΑΠ 136/07-08-2023 και 142/21-08-2023 εγγράφων του Εφετείου Λάρισας"
- Το με ΑΠ ΕΜΠ79/30-01-2024 έγγραφο της ΕΛ.Υ.Τ Θεσσαλονίκης με θέμα "Διαβίβαση λόγω αρμοδιότητας", το με ΑΠ ΕΜΠ3/7-02-2024 έγγραφο του Αυτοτελούς Τμήματος Χημικοτεχνικής Δασμολογίου με θέμα "Απάντηση σε έγγραφο της Ελεγκτικής Υπηρεσίας Τελωνείων Θεσσαλονίκης", το με ΑΠ ΔΔΘΕΚΑ Α115900ΕΞ 2024 ΕΜΠ/08-02-2024 έγγραφο του Α' Τμήματος της Διεύθυνσης Δασμολογικών Θεμάτων, Ειδικών Καθεστώτων και απαλλαγών και η με ΑΠ 11/23-01-2024 παραγγελία του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας.
- Η από 19-06-2023 έκθεση πραγματογνωμοσύνης των Απόστολου Βασιλάκου και Σταύρου Μπατζόπουλου και οι από 21-08-2023 διορθώσεις επί της από 19-06-2023 έκθεσης πραγματογνωμοσύνης των κκ. Απόστολου Βασιλάκου και Σταύρου Μπατζόπουλου
- Το με ΑΠ 1898_Φ.706.6 έγγραφο του Ανακριτικού Γραφείου της ΔΙΠΥΝ Λάρισας με θέμα "Υποβολή Έκθεσης Απλής Αυτοψίας"
- Το με ΑΠ 5785_Φ.706.7/06-07-2023 έγγραφο του Ανακριτικού Γραφείου της ΔΙΠΥΝ Λάρισας με θέμα "Υποβολή Συμπληρωματικής Έκθεσης Αυτοψίας και Διερεύνησης Αιτιών Πυρκαγιάς" και η με ΑΠ 12/23-03-2023 παραγγελία του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας
- Βιντεοληπτικό υλικό και ανάλυση δύο βίντεο που αποτυπώνουν την σύγκρουση σε καρέ
- Η με ΑΠ 97/12-06-2023 παραγγελία του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας και το με ΑΠ 33052/23/T10/12-06-2023 έγγραφο της Hellenic Train – Ανώνυμη Σιδηροδρομική Εταιρεία



- Έντυπο της εταιρείας Bayer με τα χαρακτηριστικά του ελαίου σιλικόνης
- Δελτίο Δεδομένων Ασφαλείας ελαίου σιλικόνης
- Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μετασχηματιστή Ηλεκτράμαξας
- Έγγραφο με τίτλο "Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος σε σιδηροδρομικές εφαρμογές"
- Στις 27-05-2024 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας απεστάλη το με ΑΠ 384.24.Γ3/27-05-2024 έγγραφο της Hellenic Train (με τα συνημμένα αυτού στην γερμανική γλώσσα)
- Στις 31-05-2024 ταχυδρομικώς συμπληρωματικό υλικό και συγκεκριμένα:
 - Η από 28-02-2023 έκθεση αυτοψίας του Α/Β' Μπαρμπούτη του Α.Τ Τεμπών
 - Το με ΑΠ SieMo Gr./OUT/0331/13-12-2023 έγγραφο της Siemens Mobiliy ΑΕ με θέμα "Διαβίβαση επιστολής Siemens Mobility GmbH" με συνημμένο έγγραφο από 12-12-2023 της Siemens Mobility GmbH, συνταχθέν στην αγγλική συνοδευόμενο από επίσημη μετάφραση, μαζί με το με ΑΠ SieMo Gr./OUT/0321/16-11-2023 έγγραφο της Siemens Mobiliy ΑΕ με θέμα "Παραγγελία-168/2023" και το από 17-10-2023 μήνυμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου με θέμα "υπ' αριθμ. 168 παραγγελία και επισυναπτόμενα αυτής" και η με ΑΠ 168/11-10-2023 παραγγελία του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας
 - Το με ΑΠ SieMo Gr./OUT/0349/09-02-2024 έγγραφο της Siemens Mobiliy ΑΕ με θέμα "Διαβίβαση απαντητικής επιστολής Siemens Mobility GmbH" με συνημμένο έγγραφο από 08-02-2024 της Siemens Mobility GmbH, συνταχθέν στην αγγλική συνοδευόμενο από επίσημη μετάφραση, και η με ΑΠ 8/15-01-2024 παραγγελία του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας
 - Δελτία συντήρησης των τριών εμπλεκόμενων ηλεκτραμαξών
 - Φωτογραφίες του μετασχηματιστή της επιβατικής αμαξοστοιχίας IC62
 - Δελτίο Δεδομένων ασφαλείας του αφρού που χρησιμοποιήθηκε κατά την κατάσβεση
 - Το από Ιούλιο του 2023 πόρισμα σιδηροδρομικού ατυχήματος 28.02.2023 στη περιοχή Ευαγγελισμός Λάρισας της Επιτροπής Διερεύνησης Ανεξάρτητων Πραγματογνωμόνων Οικογενειών
 - Η από 04-01-2024 προκαταρκτική τεχνική έκθεση σχετικά με έρευνα στην περιοχή Κουλούρι στο χώρο φύλαξης των συντριμμίων στις 15-16 Νοεμβρίου 2023 της Επιτροπής Διερεύνησης Ανεξάρτητων Πραγματογνωμόνων Οικογενειών
 - Το από Φεβρουάριο του 2024 πόρισμα σιδηροδρομικού ατυχήματος 28.02.2023 στη περιοχή Ευαγγελισμός Λάρισας της Επιτροπής Διερεύνησης Ανεξάρτητων Πραγματογνωμόνων Οικογενειών προσκομισθέν στις 22-02-2024
 - Το από Φεβρουάριο του 2024 πόρισμα σιδηροδρομικού ατυχήματος 28.02.2023 στη περιοχή Ευαγγελισμός Λάρισας της Επιτροπής Διερεύνησης Ανεξάρτητων Πραγματογνωμόνων Οικογενειών προσκομισθέν στις 28-02-2024
 - Η από Ιανουάριο 2024 τεχνική έκθεση του κ. Αναστάσιου Δέδε
 - Η από 01-12-2023 τεχνική έκθεση πραγματογνωμοσύνης των κκ. Στυλιανού και Νικολάου Κακαμούκα
 - Η από 19-01-2024 συμπληρωματική τεχνική έκθεση πραγματογνωμοσύνης των κκ. Στυλιανού και Νικολάου Κακαμούκα
 - Η από 08-02-2024 συνοπτική τεχνική έκθεση διαπιστώσεων του κ. Βασίλειου Κοκοτσάκη
 - Η από 18-02-2024 τεχνική έκθεση κ. του Βασίλειου Κοκοτσάκη
 - Η από 07-03-2024 ειδική συμπληρωματική τεχνική έκθεση του κ. Βασίλειου Κοκοτσάκη
 - Η από 21-03-2024 ειδική συμπληρωματική τεχνική έκθεση Νο2 (τελική) του κ. Βασίλειου Κοκοτσάκη
 - Η από 13-05-2024 επικαιροποιημένη τεχνική έκθεση του κ. Βασίλειου Κοκοτσάκη
- Στις 04-06-2024 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας το με ΑΠ ΕΜΠ 12/09-04-2024/31-05-2024 έγγραφο της Β Χ.Υ. Αθηνών με θέμα "Εξετάσεις δειγμάτων που ελήφθησαν κατόπιν των με ΑΠ 122/26-3-2024 και 173/05-04-2024 εγγράφων του Εφετείου Λάρισας".

- Στις 18-08-2024 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας τα συνημμένα στο με ΑΠ 384.24.Γ3/27-05-2024 έγγραφο της Hellenic Train μεταφρασμένα επίσημα στην ελληνική γλώσσα.
- Στις 20-09-2024 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας η τεχνική έκθεση του κ. Yves Carton που συντάχθηκε για λογαριασμό της Hellenic Train.
- Στις 30-09-2024 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας η γνωμοδότηση του Καθηγητή Faisal Khan.
- Στις 01-11-2024 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας η από 24-10-2024 έκθεση του τεχνικού συμβούλου κ. Αχιλλέα Μιχόπουλου.
- Στις 31-01-2025 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας
 - το με ΑΠ ΕΜΠ 25/30-08-2024/13-01-2025 έγγραφο της Β Χ.Υ. Αθηνών με θέμα "Εξετάσεις δειγμάτων εσωτερικής επένδυσης βαγονιού"
 - το με ΑΠ ΕΜΠ 13/23-04-2024/09-01-2025 έγγραφο της Β Χ.Υ. Αθηνών με θέμα "Εκθέσεις εξέτασης δειγμάτων που ελήφθησαν κατόπιν των με ΑΠ 180/11-04-2024 και 193/17-04-2024 εγγράφων του Εφετείου Λάρισας"
 - βιντεοληπτικό υλικό από την διέλευση της εμπορικής αμαξοστοιχίας από την Λεπτοκαρυά
 - το με ΑΠ ΕΜΠ 19/12-07-2024/15-11-2024 έγγραφο της Β Χ.Υ Αθηνών με θέμα "Ποσοτικά στοιχεία ξυλολίου και ταυτοποίηση άγνωστης ουσίας"
 - η υπ' αριθμ. 263481/24/20-12-2024 γνωμοδότηση για τη χημική ανάλυση δειγμάτων ελαίου σιλικόνης από το Γενικό Χημείο του Κράτους της Γκλαβόπουλος Χ.Δ & ΣΙΑ ΕΕ
 - το Παράρτημα 3 της επικαιροποιημένης έκθεσης (15/5/2024) του κ. Βασιλείου Κοκοτσάκη
 - η από 28-11-2024 έκθεση του τεχνικού συμβούλου κ. Αχιλλέα Μιχόπουλου
 - η από 12-01-2025 έκθεση του τεχνικού συμβούλου κ. Αχιλλέα Μιχόπουλου
 - η από Ιανουάριο 2025 τεχνική έκθεση επαναξιολόγησης αποτελεσμάτων εξέτασης δειγμάτων του δυστυχήματος των Τεμπών από το Γενικό Χημείο του Κράτους του κ. Νικόλαου Κάρναβου
- Στις 03-02-2025 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας η από 03-02-2025 αίτηση του κ. Maurizio Capotorto.
- Στις 04-02-2025 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας το με ΑΠ ΕΜΠ 17/25-06-2024/03-02-2025 έγγραφο της Β Χ.Υ. Αθηνών με θέμα "Εκθέσεις εξέτασης δειγμάτων που ελήφθησαν κατόπιν των με ΑΠ 231/21-05-2024 και 281/28-05-2024 εγγράφων του Εφετείου Λάρισας"
- Στις 14-02-2025 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας απεστάλη η από 16-02-2024 έκθεση του Δρ. Paul Jowett σχετικά με την πρόκληση και εξάπλωση πυρκαγιάς που προέκυψε από σιδηροδρομικό ατύχημα κοντά στον Ευαγγελισμό της Λάρισας στις 28- 28 Φεβρουαρίου 2023.
- Στις 20-03-2025 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας απεστάλησαν
 - το με αριθμ.πρωτ. ΕΜΠ 51/22-11-2023/16-01-2024 έγγραφο της Β Χ.Υ Αθηνών με θέμα «Εκθέσεις εξέτασης δειγμάτων που ελήφθησαν κατόπιν των υπ' αριθμ. πρωτ. 136/7-8-2023 και 142/21-08-2023 εγγράφων του Εφετείου Λάρισας»
 - το με αριθμ.πρωτ. ΕΜΠ 13/23-04-2024/09-01-2025 έγγραφο της Β Χ.Υ Αθηνών με θέμα «Εκθέσεις εξέτασης δειγμάτων που ελήφθησαν κατόπιν των υπ'αριθμ. πρωτ.180/11-04-2024 και 193/17-04-2024 εγγράφων του Εφετείου Λάρισας»
 - από το με αριθμ.πρωτ. ΕΜΠ 17/25-06-2024/03-02-2025 έγγραφο της Β Χ.Υ Αθηνών με θέμα «Εκθέσεις εξέτασης δειγμάτων που ελήφθησαν κατόπιν των υπ'αριθμ. πρωτ.231/21-05-2024 και 281/28-05-2024 εγγράφων του Εφετείου Λάρισας» , οι εκθέσεις εξέτασης που αφορούν τα δείγματα 1-19
 - το με αριθμ. πρωτ. ΕΜΠ 23/29-07-2024/08-01-2025 έγγραφο της Β Χημικής Υπηρεσίας Αθηνών με θέμα «Εκθέσεις εξέτασης δειγμάτων που ελήφθησαν κατόπιν του υπ' αριθμ. 376/26-7-2024 εγγράφου του Εφετείου Λάρισας»

- Στις 26-03-2025 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας το με ΑΠ 157 έγγραφό του Εφέτη Ανακριτή Λάρισας, σχετικά με την πιστοποίηση της γνησιότητας των βίντεο καταγραφής της εμπορικής αμαξοστοιχίας 63503 από τις σήραγγες Πλαταμώνα και Τεμπών.
- Στις 01-04-2025 μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας τα βίντεο που απεικονίζουν την διέλευση της εμπορικής αμαξοστοιχίας 63503, μαζί με τις με ΑΠ 3022-21-8925_4/27-03-2025 και 3022_21_8925_5/27-03-2025 εκθέσεις της Διεύθυνσης Εγκληματολογικών Ερευνών

Πέραν του υλικού που απεστάλη από τον Εφέτη Ανακριτή Λάρισας, χρησιμοποιήθηκαν δημοσιεύσεις της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας σε θέματα που θα μπορούσαν να συσχετίσουν μέρος των ευρημάτων των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο Γενικό Χημείο του Κράτους στα πλαίσια της διερεύνησης του τραγικού συμβάντος με το αντικείμενο της πραγματογνωμοσύνης. Οι σχετικές πηγές αναφέρονται ως παραπομπές στις σελίδες της αναφοράς.

1.4. Διάρθρωση της Αναφοράς

Η αναφορά περιέχει τα εξής μέρη:

1. Εισαγωγή
2. Πύρινες Σφαίρες
3. Έλαια Σιλικόνης
4. Υδρογονάνθρακες – Προϊόντα Καύσης
5. Απαντήσεις στα Ερωτήματα



Κεφάλαιο 2

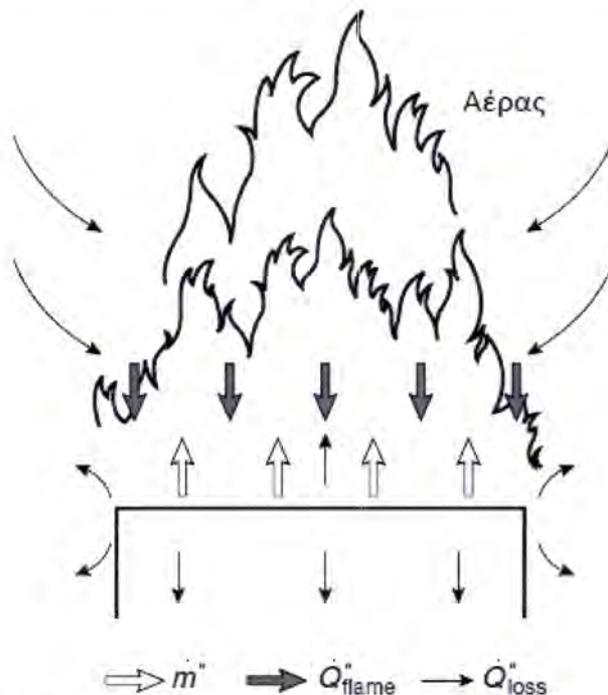
2.1. Φωτιά

Η φωτιά ή η καύση είναι συνήθως το αποτέλεσμα της αντίδρασης καυσίμου και οξυγόνου που συνδυάζονται σε κατάλληλες αναλογίες και με μια πηγή θερμότητας. Η κατανάλωση ενός υλικού από μια φωτιά είναι μια χημική αντίδραση στην οποία η θερμαινόμενη ουσία συνδυάζεται με οξυγόνο. Παράγεται θερμότητα, φως, καπνός και προϊόντα καύσης. Η φωτιά είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει πολλές αλληλεπιδράσεις μεταξύ χημικών και φυσικών διεργασιών. Η καθαρή παραγωγή θερμότητας από μια πυρκαγιά περιλαμβάνει τόσο αντιδράσεις παραγωγής θερμότητας όσο και αντιδράσεις απορρόφησης θερμότητας, με περισσότερη θερμότητα να παράγεται από ό,τι απορροφάται. Απαιτείται ενέργεια με τη μορφή θερμότητας:

1. Για την παραγωγή ατμών και αερίων με εξάτμιση ή αποσύνθεση στερεών και υγρών. Η πραγματική καύση συνήθως περιλαμβάνει αέρια ή ατμούς αναμεμιγμένους στενά με μόρια οξυγόνου.
2. Για να ενεργοποιήσει τα μόρια του οξυγόνου και των εύφλεκτων ατμών σε συνδυασμό μεταξύ τους, εκκινώντας έτσι μια χημική αντίδραση.

Η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την πρόκληση καύσης ποικίλλει σημαντικά. Το υδρογόνο μπορεί να αναφλεγεί από μικροσκοπικούς σπινθήρες ή απλά μπορεί να αναφλεγεί από στατικό ηλεκτρισμό που παράγεται καθώς τα αέρια ή οι ατμοί εκκενώνονται από αγωγούς στον αέρα. Άλλα υλικά, όπως το διχλωρο μεθάνιο, απαιτούν τόσο μεγάλες ποσότητες ενέργειας για να αναφλεγούν που μερικές φορές θεωρούνται μη εύφλεκτα.

Οι βασικές αλληλεπιδράσεις μιας φωτιάς με το περιβάλλον της απεικονίζονται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Διάγραμμα καίόμενης επιφάνειας

Αυτό το απλοποιημένο μοντέλο μιας φλεγόμενης επιφάνειας δείχνει πώς η ροή των ατμών καυσίμου διατηρείται με μεταφορά θερμότητας από τη φλόγα στην επιφάνεια. Ο μέγιστος ρυθμός καύσης (\dot{m}'') επιτυγχάνεται όταν επιτευχθεί μια κατάσταση σταθερής κατάστασης, όπως εκφράζεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}''_{flame} - \dot{Q}''_{loss}}{LH_g}, \text{ kg/sec} \quad (1)$$

όπου: \dot{m}'' = ρυθμός μάζας καυσίμου, kg/s

\dot{Q}''_{flame} = ροή θερμότητας από τη φλόγα στην επιφάνεια, kW/m²

\dot{Q}''_{loss} = απώλεια θερμότητας από την επιφάνεια εκφρασμένη ως ροή μέσω της επιφάνειας, kW/m²

LH_g = θερμότητα εξάτμισης (αεριοποίησης), kJ/kg

Η εξίσωση (1) και το Σχήμα 1.1 περιέχουν την ουσία της κατανόησης της φωτιάς και της συμπεριφοράς της φωτιάς, συγκεκριμένα, το ρόλο της μεταφοράς θερμότητας στον προσδιορισμό της διαδικασίας καύσης.

2.2. Ανάφλεξη

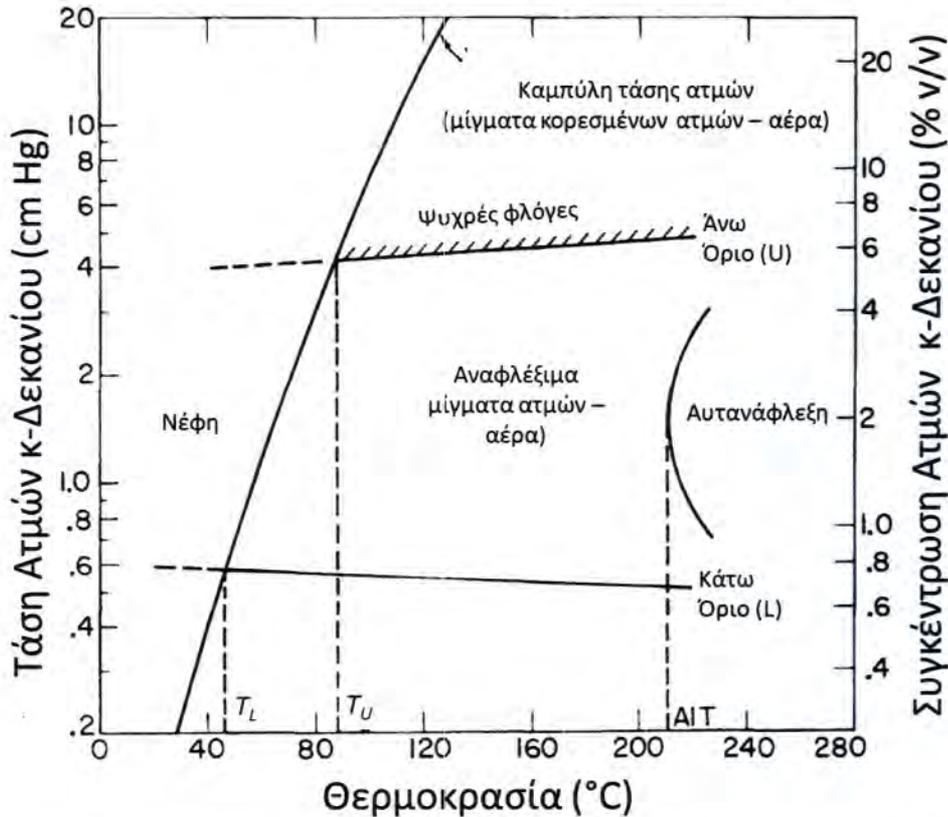
Η ανάφλεξη είναι η διαδικασία με την οποία ξεκινά η αυτοσυντηρούμενη καύση. Έτσι, για ένα εύφλεκτο μίγμα ατμών/αέρα (δηλαδή η συγκέντρωση καυσίμου βρίσκεται εντός σαφώς καθορισμένων ορίων αναφλεξιμότητας), η εισαγωγή της πηγής ανάφλεξης με τη μορφή σπινθήρα ή μικρής φλόγας θα έχει ως αποτέλεσμα τη διάδοση φλόγας μέσω του μίγματος. Η συνάφεια αυτής της διαδικασίας με τα συμπυκνωμένα καύσιμα (υγρά και στερεά) απεικονίζεται καλύτερα εξετάζοντας την έννοια του σημείου ανάφλεξης για τα υγρά καύσιμα. Το σημείο ανάφλεξης ορίζει την κρίσιμη κατάσταση υπό την οποία ένα καύσιμο μπορεί να αναφλεγεί και αναφέρεται στην ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία υπάρχει εύφλεκτο μίγμα ατμών – αέρα πάνω από την επιφάνεια του υγρού. Μπορεί να μετρηθεί σε συσκευή κλειστού δοχείου. Το σημείο ανάφλεξης κλειστού δοχείου αντιστοιχεί στη θερμοκρασία στην οποία η τάση ατμών ισορροπίας είναι ίση με το κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας. Η εισαγωγή μιας βοηθητικής πηγής ανάφλεξης στον ελεύθερο χώρο πάνω από την επιφάνεια του υγρού προκαλεί μια γρήγορη εμφάνιση φλόγας. Μπορεί να μετρηθεί στη συσκευή κλειστού δοχείου Pensky-Martens.

Το σημείο ανάφλεξης του ανοικτού δοχείου μετριέται υπό συνθήκες όπου οι ατμοί καυσίμου μπορούν να διαχυθούν μακριά από την επιφάνεια του υγρού. Είναι η χαμηλότερη χύδην θερμοκρασία υγρού στην οποία παρατηρείται αναλαμπή φλόγας όταν υπάρχει πηγή ανάφλεξης στο χείλος του δοχείου που καθορίζεται στην πρότυπη δοκιμή. Όλοι οι ατμοί καυσίμου εντός των ορίων αναφλεξιμότητας καταναλώνονται στιγμιαία, αλλά η καύση δε διατηρείται. Μετριέται στη συσκευή ανοικτού δοχείου Cleveland. Το σημείο ανάφλεξης ανοικτού δοχείου είναι υψηλότερο από το σημείο ανάφλεξης κλειστού δοχείου.

Για να ακολουθήσει την ανάφλεξη η συνεχής καύση του υγρού, η θερμοκρασία του πρέπει να αυξηθεί στο σημείο καύσης, το οποίο μπορεί επίσης να μετρηθεί στη συσκευή ανοικτού δοχείου Cleveland. Η εισαγωγή μιας πηγής ανάφλεξης στο μίγμα ατμών – αέρα πάνω από την επιφάνεια του υγρού θα δώσει μια αναλαμπή φλόγας, αλλά αυτό θα ακολουθηθεί από παρατεταμένη καύση. Η θερμοκρασία του σημείου καύσης είναι υψηλότερη από το σημείο ανάφλεξης ανοικτού δοχείου.

Τόσο για τα υγρά καύσιμα όσο και για τα στερεά, η έναρξη της καύσης συμβαίνει στην αέρια φάση. Απαιτείται ενέργεια για τη μετατροπή επαρκούς ποσότητας καυσίμου στη φάση ατμών για τη δημιουργία ενός εύφλεκτου μίγματος ατμών – αέρα κοντά στην επιφάνεια. Για τα περισσότερα υγρά καύσιμα, αυτή είναι απλώς μια διαδικασία εξάτμισης, αλλά σχεδόν όλα τα στερεά καύσιμα πρέπει να υποβληθούν σε χημική αποσύνθεση πριν απελευθερωθούν εύφλεκτα αέρια. Η ελάχιστη θερμοκρασία που σχετίζεται με το σχηματισμό ενός εύφλεκτου μίγματος στην επιφάνεια του καυσίμου προσδιορίζεται εύκολα για τα υγρά καύσιμα ως η θερμοκρασία του υγρού. Ωστόσο, αν και ακριβώς τα ίδια φαινόμενα σημείου ανάφλεξης και σημείου καύσης μπορούν να παρατηρηθούν για καύσιμα στερεά, η διαδικασία περιλαμβάνει μη αναστρέψιμες χημικές μεταβολές και μπορούν να οριστούν μόνο με όρους επιφανειακής θερμοκρασίας. Αυτή η επιφανειακή θερμοκρασία συνήθως δεν μετριέται και είναι

συνηθέστερο να προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά ανάφλεξης των εύφλεκτων στερεών ως συνάρτηση της επιβαλλόμενης ροής θερμότητας. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός ο τύπος ανάφλεξης απαιτεί την παρουσία μιας βοηθητικής πηγής ανάφλεξης. Στην πράξη, οι πιλοτικές θερμοκρασίες ανάφλεξης των στερεών επηρεάζονται από την κίνηση του αέρα, το ρυθμό θέρμανσης και το μέγεθος και το σχήμα της κλίνης καυσίμου. Για το λόγο αυτό, τα μετρούμενα χαρακτηριστικά αναφλεξιμότητας ενός στερεού εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη μέθοδο δοκιμής που χρησιμοποιείται.¹



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα αναφλεξιμότητας - τάσης ατμών συστήματος ατμών - αέρα σε διάφορες θερμοκρασίες και ατμοσφαιρική πίεση (για κ-δεκάνιο)

2.3. Όρια Αναφλεξιμότητας

Ένα εύφλεκτο αέριο μίγμα καύσιμου και οξειδωτικού είναι αυτό που, όταν αναφλεγεί, θα διαδώσει τη φλόγα πέρα από την επίδραση της πηγής ανάφλεξης. Όλα τα εύφλεκτα αέρια και οι εύφλεκτοι ατμοί υγρών ή στερεών σχηματίζουν εύφλεκτα μίγματα σε περιορισμένο εύρος εύφλεκτων συγκεντρώσεων, ανάλογα με τη θερμοκρασία, την πίεση και τη φύση του οξειδωτικού. Οι κρίσιμες συγκεντρώσεις καυσίμων είναι γνωστές ως όρια αναφλεξιμότητας ή όρια εκρηκτικότητας του συστήματος και ορίζονται ως το φτωχό σε καύσιμο ή κατώτερο όριο (L) και το πλούσιο σε καύσιμο ή ανώτατο όριο (U). Αυτά τα όρια είναι συνήθως σε εκατοστιαία αναλογία όγκου και αναφέρονται σε ομοιογενή εύφλεκτα μίγματα ατμού - οξειδωτικού. Δεδομένου ότι τα όρια αναφλεξιμότητας ποικίλλουν ανάλογα με τη θερμοκρασία και δεδομένου ότι ο σχηματισμός ατμών ενός καυσίμου στην υγρή ή στερεά του κατάσταση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία, είναι χρήσιμο να κατασκευαστεί ένα διάγραμμα συγκέντρωσης-θερμοκρασίας αναφλεξιμότητας του τύπου

¹ Arthur E. Cote, Editor-in-Chief: "Fire Protection Handbook", 20th Edition, Volumes I and II, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2008, ISBN: 978-0-87765-758-3

που φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Ένα τρισδιάστατο διάγραμμα για να συμπεριληφθεί η επίδραση της πίεσης θα απαιτηθεί για τον πλήρη προσδιορισμό των περιοχών αναφλεξιμότητας.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, τα αναφλέξιμα μίγματα ενός εύφλεκτου συστήματος υγρού – αέρα μπορεί να αποτελούνται από νέφος (σταγονίδια + κορεσμένος ατμός + αέρας), κορεσμένα μίγματα ατμού – αέρα (καμπύλη τάσης ατμών) ή μίγματα καθαρού ατμού – αέρα (περιοχή πέρα από τις θερμοκρασίες κορεσμένων ατμών). Το εύρος θερμοκρασιών στο οποίο το υγρό μπορεί να σχηματίσει εύφλεκτες συγκεντρώσεις ατμών ορίζεται από τα όρια θερμοκρασίας αναφλεξιμότητας (T_L και T_U). Οι τομές αυτών των ορίων θερμοκρασίας με την καμπύλη τάσης ατμών καθορίζουν τα όρια συγκέντρωσης αναφλεξιμότητας (L και U) σε συνθήκες ισορροπίας υγρού-ατμού. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οι περιοχές αναφλεξιμότητας για τα μίγματα ατμού – αέρα διευρύνονται, ιδιαίτερα στην πλούσια σε καύσιμο πλευρά. Τελικά, η θερμοκρασία μπορεί να είναι επαρκής για την παραγωγή αυτανάφλεξης των μειγμάτων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.

Το κατώτερο όριο θερμοκρασίας (T_L) έχει μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον επειδή καθορίζει την ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία πρέπει να θερμανθεί ένα καύσιμο υγρό ή στερεό για να σχηματίσει ένα εύφλεκτο μίγμα ατμού – αέρα, δηλαδή το κατώτερο όριο ευφλεκτότητας (L). Στην πράξη, αυτή η θερμοκρασία αντιστοιχεί περίπου στο σημείο ανάφλεξης του καύσιμου, το οποίο προσδιορίζεται υπό λιγότερο ιδανικές συνθήκες (διάδοση φλόγας προς τα κάτω και ανομοιόμορφα μίγματα) από εκείνες που χρησιμοποιούνται στους προσδιορισμούς ορίων αναφλεξιμότητας (ανοδική διάδοση και ομοιόμορφα μίγματα). Τα σημεία ανάφλεξης κλειστού δοχείου είναι οι πιο αξιόπιστες τιμές. Είναι προφανές από το Σχήμα 2.2 ότι εύφλεκτα νέφη, εκνεφώματα ή αφροί μπορούν να σχηματιστούν κάτω από το σημείο ανάφλεξης ή το T_L του καύσιμου. Ωστόσο, οι ενεργειακές απαιτήσεις ανάφλεξης είναι πολύ πιο σοβαρές από ό, τι για καθαρά μίγματα ατμού – αέρα. Τα χαρακτηριστικά αναφλεξιμότητας των νεφών αναμένεται να προσεγγίσουν τη συμπεριφορά ατμών τους όταν το μέγεθος σταγονιδίων του νέφους είναι μικρότερο από περίπου 10 μm .²

2.4. Τύποι Συμβάντων Φωτιάς

- Στιγμαία Ανάφλεξη (Flash Fire)
Η ταχεία καύση ενός μίγματος εύφλεκτων ατμών και αέρα κατά την οποία η φλόγα διέρχεται μέσα από το μίγμα με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα του ήχου, έτσι ώστε να δημιουργείται αμελητέα καταστροφική υπερπίεση.



² Joseph M. Kuchta: "Investigation of Fire and Explosion Accidents in the Chemical, Mining, and Fuel-Related Industries, A Manual", U.S. Bureau of Mines, Bulletin 680, 1985



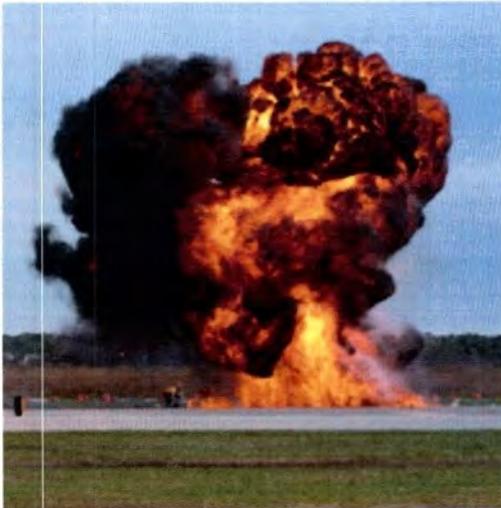
- Πίδακας Φωτιάς (Jet Fire)
Η καύση υλικών που εκλύονται από ένα άνοιγμα με μεγάλη ορμή.



- Λίμνη Φωτιάς (Pool Fire)
Η καύση υλικού που εξατμίζεται από στρώμα υγρού (λίμνη).



- Πύρινη Σφαίρα (Fireball)
Μια πυρκαγιά, που καίγεται αρκετά γρήγορα ώστε η καίσιμη μάζα να ανυψώνεται στον αέρα ως νέφος ή σφαίρα.



- BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)
Έκρηξη διογκούμενου νέφους ατμών που δημιουργούνται από βρασμό υγρού.



2.5. Πύρινες Σφαίρες

Η πύρινη σφαίρα (ή πυρόσφαιρα) ορίζεται ως "φωτιά, που καίγεται επαρκώς γρήγορα ώστε η καϊόμενη η μάζα να ανυψωθεί στον αέρα ως νέφος ή σφαίρα". Μια πύρινη σφαίρα λαμβάνει χώρα όταν ένα εύφλεκτο υγρό, αέριο ή σκόνη απελευθερώνεται ξαφνικά και έχει περιορισμένη ανάμιξη με τον αέρα πριν από την ανάφλεξη. Αυτό το γεγονός διαφέρει από μια ταχεία ανάφλεξη (flash fire που παρατηρείται όταν ένα εύφλεκτο νέφος στον ανοικτό αέρα βρει μια πηγή ανάφλεξης), ή μια έκρηξη νέφους ατμών, στο ότι η έκλυση εύφλεκτου υλικού αναφλέγεται πριν από την ανάμιξη με τον εξωτερικό αέρα. Το συμβάν της καύσης με πύρινη σφαίρα περιλαμβάνει επομένως την παράσυρση και ανάμιξη με τον περιβάλλοντα αέρα καθώς καίγεται. Η καύση λαμβάνει χώρα κυρίως στο εξωτερικό στρώμα της πύρινης σφαίρας, όπου το πλούσιο σε καύσιμα νέφος αναμιγνύεται με τον περιβάλλοντα αέρα. Καθώς τα αέρια στο εσωτερικό της πύρινης σφαίρας θερμαίνονται, η άνωση αυξάνεται και η πύρινη σφαίρα ανυψώνεται καθώς διαστέλλεται.

Υπάρχουν διάφορα σενάρια που μπορούν να οδηγήσουν σε μια πύρινη σφαίρα, όπως:

Η ανάφλεξη μιας έκλυσης εύφλεκτου υλικού κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος BLEVE.

- Η ανάφλεξη ενός νέφους ατμών πλούσιου σε καύσιμο.
- Η ανάφλεξη μιας έκλυσης υγροποιημένου αερίου εντός αγωγού, όπου του πίδακα φωτιάς (jet fire) προηγείται μια πύρινη σφαίρα.
- Η ανάφλεξη μιας ξαφνικής απελευθέρωσης εύφλεκτου υλικού μετά από συμβάν έντονου βρασμού.
- Μια απελευθέρωση εύφλεκτων ατμών σε ένα κτίριο και επακόλουθη ανάφλεξη.
- Ανάφλεξη εκρηκτικών ή προωθητικών υλικών.
- Εκτόνωση μιας ανάφλεξης μέσα σε κλειστό χώρο.

Αυτός ο τύπος καύσης είναι σχετικά αργός, δεδομένου ότι η ταχύτητα της καύσης περιορίζεται από το χρόνο παρασυρόμενου αέρα και το χρόνο ανάμιξης. Συνεπώς, δεν υπάρχει σχετικό κύμα έκρηξης. Η πύρινη σφαίρα, ωστόσο, ενέχει κίνδυνο ακτινοβολίας, καθώς η θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την καύση εκπέμπεται ακτινικά.³

2.6. Συνθήκες Σχηματισμού Εύφλεκτου Νέφους

Όλα τα εκρηκτικά νέφη ατμών (vapor cloud explosion, VCE) προκύπτουν από την ανάφλεξη ενός εύφλεκτου νέφους που σχηματίστηκε λόγω της απελευθέρωσης μεγάλης ποσότητας εύφλεκτου εξατμιζόμενου υγρού ή αερίου από δεξαμενή αποθήκευσης, δοχείο επεξεργασίας ή μεταφοράς ή αγωγό.

Ωστόσο, δεν θα οδηγήσουν απαραίτητα όλες αυτές οι εκροές σε VCE. Σε γενικές γραμμές, πρέπει να υπάρχουν αρκετές συνθήκες για να συμβεί έκρηξη νέφους ατμών με καταστροφική υπερπίεση.

- Πρώτον, το απελευθερωμένο υλικό πρέπει να είναι εύφλεκτο και σε κατάλληλες συνθήκες πίεσης ή θερμοκρασίας. Παραδείγματα κατάλληλων υλικών είναι τα υγραέρια (προπάνιο, βουτάνιο), τα συνήθη εύφλεκτα υγρά ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες ή/και πιέσεις (κυκλοεξάνιο, νάφθα) και τα μη υγροποιημένα εύφλεκτα αέρια (μεθάνιο, αιθυλένιο, ακετυλένιο).
- Δεύτερον, πρέπει να σχηματιστεί ένα νέφος πριν από την ανάφλεξη (φάση διασποράς). Εάν η ανάφλεξη συμβεί αμέσως κατά την απελευθέρωση, θα συμβεί μια ταχεία ανάφλεξη που από μόνη της που προκαλεί εκτεταμένη τοπική βλάβη από τη θερμική ακτινοβολία. Ωστόσο, σημαντικές πιέσεις λόγω έκρηξης που προκαλούν εκτεταμένη ζημιά δεν είναι πιθανό να συμβούν. Εάν το νέφος αφεθεί να σχηματιστεί για μια χρονική περίοδο μέσα σε μια περιοχή διεργασίας και στη συνέχεια να αναφλεγεί, οι πιέσεις λόγω έκρηξης που

³ Morgan J. Hurley (Editor): "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 5th Edition, Volume I, Springer, New York, 2016, ISBN 978-1-4939-2565-0

διαδίδονται μακριά από το κέντρο του νέφους μπορούν να οδηγήσουν σε εκτεταμένες ζημιές σε μια ευρεία περιοχή. Οι καθυστερήσεις ανάφλεξης από ένα έως πέντε λεπτά θεωρούνται οι πιο πιθανές για πρόκληση έκρηξης νέφους ατμών, αν και έχουν τεκμηριωθεί σημαντικά περιστατικά με καθυστερήσεις ανάφλεξης τόσο χαμηλές όσο λίγα δευτερόλεπτα και μεγαλύτερες από 30 λεπτά.

- Τρίτον, ένα μέρος του νέφους πρέπει να βρίσκεται εντός της περιοχής αναφλεξιμότητας του υλικού. Ένα νέφος ατμών θα έχει γενικά τρεις περιοχές - μια πλούσια περιοχή κοντά στο σημείο απελευθέρωσης, μια φτωχή περιοχή στην άκρη του νέφους και μια περιοχή μεταξύ τους που είναι εντός των ορίων αναφλεξιμότητας. Το ποσοστό του νέφους ατμών σε κάθε περιοχή ποικίλλει, ανάλογα με πολλούς διαφορετικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του τύπου και της ποσότητας του υλικού που απελευθερώνεται, της πίεσης κατά την απελευθέρωση, του μεγέθους του ανοίγματος εκροής (όλοι τους όροι που αφορούν στην πηγή της εκροής), του βαθμού περιορισμού του νέφους και του ανέμου, της υγρασίας και άλλων περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Τέταρτον, τα αποτελέσματα έκρηξης που προκαλούνται από εκρήξεις νεφών ατμών καθορίζονται από την ταχύτητα διάδοσης της φλόγας. Όσο πιο γρήγορα διαδίδεται η φλόγα μέσω του εύφλεκτου νέφους, τόσο υψηλότερη θα είναι η υπερπίεση στο νέφος, γεγονός που θα αυξήσει τα εκρηκτικά αποτελέσματα έξω από το νέφος. Αυτό σημαίνει ότι ο τρόπος διάδοσης της φλόγας είναι πολύ σημαντικός. Γενικά, ο τρόπος διάδοσης της φλόγας θα είναι μια γρήγορη ανάφλεξη (deflagration). Υπό εξαιρετικές συνθήκες μπορεί να συμβεί έκρηξη.

Όταν η ανάφλεξη συμβαίνει σε ένα εύφλεκτο νέφος σε ηρεμία, η φλόγα θα αρχίσει να διαδίδεται μακριά από το σημείο ανάφλεξης. Τα προϊόντα καύσης διαστέλλονται προκαλώντας ροή μπροστά από τη φλόγα. Αρχικά αυτή η ροή θα είναι στρωτή. Υπό στρωτές ή σχεδόν στρωτές συνθήκες, οι ταχύτητες φλόγας για κανονικούς υδρογονάνθρακες είναι της τάξης των 5 έως 30 m/s, οι οποίες είναι πολύ χαμηλές για να προκαλέσουν σημαντική υπερπίεση έκρηξης. Υπό αυτές τις συνθήκες, δηλαδή εάν ο ρυθμός καύσης δεν ενταθεί, το νέφος ατμών απλώς θα καεί και το γεγονός περιγράφεται ως μεγάλη πυρκαγιά.

2.7. Τα Βασικά Στοιχεία της Ακτινοβολίας της Φωτιάς

Όλες οι πυρκαγιές εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Κατά τη μοντελοποίηση της θερμικής ακτινοβολίας από πυρκαγιές που αφορούν εύφλεκτα υγρά και αέρια, η φλόγα συνήθως αναπαρίσταται ως ένα απλό γεωμετρικό σχήμα (κώνος, κεκλιμένος κύλινδρος κ.λπ.) που εκπέμπει ακτινοβολία από την επιφάνειά του. Η ακόλουθη εξίσωση χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της έντασης της θερμικής ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη θέση "στόχου" έξω από τη φλόγα.^{4,5,6,7}

$$q_i = q_s \cdot F \cdot \tau \quad (2)$$

όπου: q_i = ροή θερμικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο στόχο λόγω της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την πύρινη σφαίρα, kW/m² (Btu/(h·ft²))

⁴ C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings (Editors): "Methods for the calculation of physical effects – due to releases of hazardous materials (liquids and gases) – 'Yellow Book'", CPR 14E, 3rd Edition, The Hague, 2005, <https://publications.tno.nl/publication/34634119/QIKv78/TNO-2005-yellow.pdf>

⁵ William E. Martinsen, Jeffrey D. Marx: "An Improved Model for the Prediction of Radiant Heat from Fireballs" 1999 International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, San Francisco, California, September 28 - October 1, 1999, <https://proceedings.aiche.org/conferences/international-conference-and-workshop-on-modeling-and-mitigation-consequences-accidental-releases/1999/proceeding/paper/improved-model-prediction-radiant-heat-fireballs>

⁶ R.F. Cracknell and A.J. Carsley: "Cloud Fires - A Methodology for Hazard Consequence Modelling", ICHME Symposium Series No. 141, 1997, pp. 139-150, <https://www.icheme.org/media/10325/xiii-paper-13.pdf>

⁷ TNV BLEV (Fireball) Theory Review & Validation, 2023

q_s = μέση ροή θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την "επιφάνεια" της πύρινης σφαίρας, kW/m² (Btu/(h·ft²))

F = συντελεστής θέασης από το στόχο προς την πύρινη σφαίρα, αδιάστατος

τ = διαπερατότητα ατμόσφαιρας, αδιάστατη

Η σοβαρότητα των τραυματισμών και η έκταση των ζημιών που μπορεί να προκληθούν από τη θερμική ακτινοβολία μιας πυρκαγιάς εξαρτώνται από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, q_s , και τη διάρκεια έκθεσης σε αυτό το επίπεδο ροής θερμότητας. Δεδομένου ότι οι πύρινες σφαίρες διαρκούν για λίγα μόνο δευτερόλεπτα, η διάρκεια έκθεσης συνήθως ορίζεται ίση με το διάστημα της πύρινης σφαίρας.

Οι μέθοδοι για την πρόβλεψη των συνεπειών της θερμικής ακτινοβολίας από τις πύρινες σφαίρες περιλαμβάνουν συνήθως στοιχεία ή μοντέλα για τον ορισμό ή τον υπολογισμό των ακόλουθων παραγόντων.

- Εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία της πύρινης σφαίρας
- Γεωμετρικός παράγοντας προβολής
- Ατμοσφαιρική διαπερατότητα
- Διάρκεια της πύρινης σφαίρας

Οι παράμετροι εισόδου για αυτά τα μοντέλα είτε θα υπολογίζονται από υποδείγματα είτε θα βασίζονται σε παραδοχές.

Για παράδειγμα, οι ακόλουθες παράμετροι απαιτούνται για την εισαγωγή στα περισσότερα μοντέλα γεωμετρικού συντελεστή θέασης.

- Σχήμα πύρινης σφαίρας πυρκαγιάς (υποθετικό)
- Μέγεθος πύρινης σφαίρας (υπολογιστικό)
- Μάζα καυσίμου που συμμετέχει στην πύρινη σφαίρα (απαιτείται από την εξίσωση μεγέθους της πύρινης σφαίρας)
- Θέση της πύρινης σφαίρας σε σχέση με το στόχο (υποθετικό)
- Προσανατολισμός του στόχου σε σχέση με την πύρινη σφαίρα (υποθετικό)

2.8. Στατικό Μοντέλο

Η πύρινη σφαίρα είναι ένα δυναμικό φαινόμενο. Συνήθως, μια πύρινη σφαίρα αρχίζει τη ζωή της ως μια μικρή σφαίρα φωτιάς που βρίσκεται κοντά στο επίπεδο του εδάφους. Κατά τη διάρκεια των επόμενων δευτερολέπτων, η πύρινη σφαίρα μεγαλώνει σε μέγεθος, φτάνοντας σύντομα στη μέγιστη διάμετρό της. Η πύρινη σφαίρα αρχίζει να αιωρείται και ανυψώνεται από το έδαφος καθώς η θερμότητα της φωτιάς εξατμίζει σταγονίδια υγρού και αυξάνει τη θερμοκρασία του εναπομείναντος μίγματος ατμών, αέρα και προϊόντων αντίδρασης. Καθώς η σφαίρα ανυψώνεται, το περιορισμένο απόθεμα καυσίμου καταναλώνεται και η πύρινη σφαίρα παύει να υπάρχει.

Παρά τη δυναμική αυτή συμπεριφορά, τα περισσότερα μοντέλα ακτινοβολίας της πύρινης σφαίρας που χρησιμοποιούνται, αντιμετωπίζουν την πύρινη σφαίρα ως ένα στατικό γεγονός στο οποίο η πύρινη σφαίρα έχει σταθερό μέγεθος, εκπέμπει ακτινοβολούμενη θερμότητα με σταθερό ρυθμό και βρίσκεται σε σταθερή θέση σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς. Αυτός ο τύπος μοντέλου αποτελείται γενικά από οκτώ βασικά στοιχεία ή υπομοντέλα.

2.8.1. Σχήμα Πύρινης Σφαίρας

Σχεδόν όλα τα μοντέλα πύρινης σφαίρας αντιμετωπίζουν την πύρινη σφαίρα ως τέλεια σφαίρα. Βίντεο και άλλες παρατηρήσεις τυχαίων και πειραματικών πύρινων σφαιρών δείχνουν ότι οι περισσότερες πύρινες σφαίρες πυρκαγιάς μπορούν εύλογα να περιγραφούν ως σφαιρικές πάνω από στο μεγαλύτερο μέρος της διάρκειάς τους.

2.8.2. Διάμετρος Πύρινης Σφαίρας

Τα στατικά μοντέλα συνήθως υποθέτουν ότι η πύρινη σφαίρα φθάνει ακαριαία στη μέγιστη διάμετρό της και διατηρεί αυτό το μέγεθος για όλη τη διάρκεια της πύρινης σφαίρας. Σχεδόν

όλα τα στατικά μοντέλα υπολογίζουν τη διάμετρο της πύρινης σφαίρας χρησιμοποιώντας μια εξίσωση της ακόλουθης μορφής, η οποία συνδέει τη μέγιστη διάμετρο της πύρινης σφαίρας με τη μάζα του καυσίμου που εμπλέκεται στην πύρινη σφαίρα.

$$D = k \cdot m_f^n \quad (3)$$

όπου D = μέγιστη διάμετρος πύρινης σφαίρας, m

m_f = μάζα καυσίμου, kg

k και n = σταθερές

Στα δημοσιευμένα μοντέλα, η σταθερά k κυμαίνεται από 2,97 έως 6,48. Η συνηθέστερη τιμή του εκθέτη n είναι το 1/3, αν και ορισμένα μοντέλα χρησιμοποιούν ελαφρώς χαμηλότερες τιμές. Η ακόλουθη μορφή της εξίσωσης, η οποία αναπτύχθηκε από τον Roberts, χρησιμοποιείται ευρέως (εξίσωση υπολογισμού HSE).

$$D = 5,8 \cdot m_f^{1/3} \quad (4)$$

Η αντίστοιχη έκφραση του TNO της Ολλανδίας (Dutch Organization for Applied Scientific Research) είναι η ακόλουθη:

$$D = 6,48 \cdot m_f^{0,325} \quad (5)$$

2.8.3. Διάρκεια Πύρινης Σφαίρας

Η εξίσωση για τη διάρκεια της πύρινης σφαίρας πυρός έχει συνήθως την ακόλουθη μορφή, η οποία σχετίζεται με τη διάρκεια ή τη διάρκεια ζωής της πύρινης σφαίρας με τη μάζα του καυσίμου που συμμετέχει στην πύρινη σφαίρα.

$$t_d = k \cdot m_f^n \quad (6)$$

όπου: t_d = διάρκεια πύρινης σφαίρας, s

Στα δημοσιευμένα μοντέλα, οι τιμές των σταθερών k και n κυμαίνονται από 0,23 έως 2,61 και από 0,0966 έως 0,333, αντίστοιχα. Η εκδοχή του TNO:

$$t_d = 0,852 \cdot m_f^{0,26} \quad (7)$$

Το Health and Safety Executive του Ηνωμένου Βασιλείου (HSE) ανέπτυξε το ακόλουθο σύνολο δύο εξισώσεων για τη διάρκεια. Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως. Η αλλαγή του εκθέτη από 1/3 σε 1/6 αναφέρεται ότι αντικατοπτρίζει την αλλαγή στη συμπεριφορά μιας πύρινης σφαίρας καθώς αυξάνεται η μάζα του καυσίμου.

$$t_d = 0,45 \cdot m_f^{1/3} \text{ αν } m_f < 37.000 \text{ kg} \quad (8\alpha)$$

$$t_d = 2,60 \cdot m_f^{1/6} \text{ αν } m_f > 37.000 \text{ kg} \quad (8\beta)$$

2.8.4. Μάζα Καυσίμου που Εμπλέκεται

Η μάζα του καυσίμου που εμπλέκεται στην πύρινη σφαίρα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των εξισώσεων για τη διάμετρο και τη διάρκεια της πύρινης σφαίρας. Η μάζα αυτή μπορεί να είναι η ίδια με τη μάζα που περιέχεται στο δοχείο πριν από τη διάρρηξή του, αλλά μπορεί να είναι μικρότερη από αυτή την ποσότητα - ιδιαίτερα εάν το ποσό της υπερθέρμανσης είναι μικρό.

Διάφοροι συγγραφείς έχουν προτείνει διαφορετικές σχέσεις μεταξύ της μάζας που απελευθερώνεται και της μάζας που εμπλέκεται στην πύρινη σφαίρα πυρκαγιάς. Οι Crocker και Napier πρότειναν τις ακόλουθες κατευθυντήριες γραμμές.

Η μάζα που εμπλέκεται ισούται με τη μάζα που απελευθερώνεται εάν η αδιαβατική ανάφλεξη (γλώσσα φωτιάς) υπερβαίνει το 50%. Διαφορετικά, η μάζα που εμπλέκεται ισούται με το διπλάσιο της αδιαβατικής ανάφλεξης.

Με βάση τις εργασίες των Hasegawa και Sato, ο Roberts πρότεινε τους ακόλουθους κανόνες.

Η εμπλεκόμενη μάζα ισούται με τη μάζα που απελευθερώνεται εάν η αδιαβατική ανάφλεξη υπερβαίνει το 35%, και μηδέν εάν η αδιαβατική ανάφλεξη ισούται με μηδέν. Προτείνεται γραμμική παρεμβολή μεταξύ αυτών των δύο ορίων.

Το βιβλίο του Center for Chemical Process Safety (CCPS) του American Institute of Chemical Engineers, Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs, προτείνει την ακόλουθη παραλλαγή των κανόνων του Roberts.

Η εμπλεκόμενη μάζα ισούται με τη μάζα που απελευθερώνεται, εάν η αδιαβατική ανάφλεξη υπερβαίνει το 1/3. Διαφορετικά, η εμπλεκόμενη μάζα ισούται με το τριπλάσιο της αδιαβατικής ανάφλεξης.

Αυτή η παραλλαγή παρέχει τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα, δεδομένου ότι η μάζα του καυσίμου που βάζει στην πύρινη σφαίρα πάντα ισούται ή υπερβαίνει την ποσότητα που υπολογίζεται με οποιαδήποτε από τις άλλες δύο μεθόδους.

2.8.5. Εκπεμπόμενη Θερμική Ακτινοβολία

Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας (*SEP*) συνήθως συσχετίζουν την *SEP* με την πίεση στο δοχείο τη στιγμή της έκρηξης. Δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως. Ο Roberts ανέπτυξε την ακόλουθη εξίσωση, η οποία προβλέπει το κλάσμα της συνολικής διαθέσιμης θερμικής ενέργειας που εκπέμπεται από την πύρινη σφαίρα.

$$f = 0,27 \cdot p^{0,32} \quad (9)$$

όπου: f = κλάσμα θερμότητας που ακτινοβολείται, αδιάστατο

p = πίεση διάρρηξης, MPa

Αφού υπολογιστεί το κλάσμα της θερμότητας που εκπέμπεται, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό της επιφανειακής εκπεμπόμενης ισχύος της πύρινης σφαίρας.

$$q_s = \frac{f \cdot m_f \cdot H_c}{\pi \cdot D^2 \cdot t_d} \quad (10)$$

όπου: H_c = θερμότητα καύσης (θερμογόνος δύναμη) του καυσίμου, kJ/kg

$m_f \cdot H_c$ = συνολική ποσότητα διαθέσιμης θερμικής ενέργειας, kJ

$\pi \cdot D^2$ = επιφάνεια της πύρινης σφαίρας (θεωρώντας κανονική σφαίρα), m²

Με πρώτη ματιά, η εξίσωση αυτή φαίνεται να δείχνει ότι η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία, q_s , είναι ανάλογη της μάζας του καυσίμου που συμμετέχει στην πύρινη σφαίρα. Ωστόσο, εάν η διάρκεια και η διάμετρος της πύρινης σφαίρας είναι και οι δύο ανάλογες προς την κυβική ρίζα της μάζας του εμπλεκόμενου καυσίμου, η *SEP* που προβλέπεται από τη μέθοδο αυτή είναι ανεξάρτητη από τη μάζα του καυσίμου. Αντίθετα, εάν είτε η διάμετρος είτε η διάρκεια δεν είναι ανάλογη του $m_f^{1/3}$, τότε η πρόβλεψη της *SEP* θα επηρεαστεί από τις αλλαγές στη μάζα.

Η άλλη συνήθης μέθοδος χρησιμοποιεί μια ενιαία εξίσωση που αναπτύχθηκε από τους Moorhouse και Ritchard. Όπως φαίνεται παρακάτω, παρέχει μια άμεση σχέση μεταξύ της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας και της πίεσης στην οποία διαρρηγνύεται το δοχείο για πιέσεις όχι μεγαλύτερες από 2 MPa (≈ 300 psi).

$$q_s = 2,35 \cdot p^{0,39} \quad (11)$$

2.8.6. Θέση της Πύρινης Σφαίρας

Τα περισσότερα από τα μοντέλα στατικής πύρινης σφαίρας υποθέτουν ότι η πύρινη σφαίρα εφάπτεται στο έδαφος, αλλά ορισμένα χρησιμοποιούν υψηλότερη θέση. Για παράδειγμα, το μοντέλο TNO τοποθετεί το κέντρο της πύρινης σφαίρας σε 1,5 ακτίνα πάνω από το έδαφος.

2.8.7. Συντελεστής Θέασης

Ο συντελεστής θέασης (F στην Εξ. 2) βασίζεται στη γεωμετρική σχέση μεταξύ της τέλει μορφής πύρινης σφαίρας και ενός επίπεδου στόχου που βρίσκεται έξω από την πύρινη σφαίρα. Σε ορισμένα στατικά μοντέλα, το διάνυσμα που είναι κάθετο στην επιφάνεια του στόχου δείχνει απευθείας στο κέντρο της τέλει μορφής πύρινης σφαίρας. (Αυτός ο προσανατολισμός οδηγεί στις μέγιστες δυνατές τιμές για το συντελεστή θέασης). Η ακόλουθη

εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συντελεστών θέασης για αυτόν τον προσανατολισμό.

$$F = \frac{R^2}{h^2} \quad (12)$$

όπου: R = ακτίνα της πύρινης σφαίρας, m

h = απόσταση από το στόχο έως το κέντρο της πύρινης σφαίρας, m

Σε άλλα στατικά μοντέλα, ο στόχος θεωρείται ότι έχει κατακόρυφο προσανατολισμό. Έτσι, το δiάνυσμα που είναι κάθετο στην επιφάνεια του στόχου θα είναι οριζόντιο. Εάν η πύρινη σφαίρα εφάπτεται του εδάφους και ο στόχος βρίσκεται στο έδαφος, το κανονικό δiάνυσμα θα είναι εφapτόμενο στην πύρινη σφαίρα. Η ακόλουθη εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συντελεστών θέασης για αυτόν τον προσανατολισμό.

$$F = \frac{R^2 \cdot \sqrt{h^2 - R^2}}{h^2} \quad (13)$$

Για κατά τα άλλα πανομοιότυπες καταστάσεις, αυτή η διαφορά στον προσανατολισμό του στόχου οδηγεί σε διαφορά στις προβλεπόμενες τιμές του συντελεστή θέασης F . Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική διαφορά στις προβλεπόμενες τιμές της προσπίπτουσας ροής θερμότητας q , όταν ο στόχος βρίσκεται κοντά στην πύρινη σφαίρα.

2.8.8. Διαπερατότητα της Ατμόσφαιρας

Οι υδρατμοί και το διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα θα απορροφήσουν κάποια θερμική ακτινοβολία καθώς περνά μέσα από αέρα ανάμεσα στην πύρινη σφαίρα και το στόχο. Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό αυτής της επίδρασης. Κυμαίνονται σε πολυπλοκότητα από τη χρήση μιας σταθερής τιμής (π.χ. 0,75) για τη διαπερατότητα, έως εξισώσεις στις οποίες η διαπερατότητα είναι συνάρτηση της απόλυτης υγρασίας, της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα, και του μήκους διαδρομής.

2.9. Δυναμικό Μοντέλο

Τα δυναμικά μοντέλα πύρινων σφαιρών επιχειρούν να μοντελοποιήσουν τη χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά των πύρινων σφαιρών προκειμένου να προβλέψουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις συνέπειες της θερμικής ακτινοβολίας των πραγματικών πύρινων σφαιρών. Όπως και τα στατικά μοντέλα, τα δυναμικά μοντέλα βασίζονται σε ορισμένες υποθέσεις (π.χ. μια τέλεια σφαίρα είναι μια αρκετά ακριβής αναπαράσταση μιας πύρινης σφαίρας) και σε αρκετούς εμπειρικούς τύπους. Σε αντίθεση με τα στατικά μοντέλα, ένα καλό δυναμικό μοντέλο θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη χρονικά μεταβαλλόμενα φαινόμενα που έχουν παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια προγραμματισμένων και μη προγραμματισμένων περιστατικών πύρινης σφαίρας.

2.9.1. Σχήμα Πύρινης Σφαίρας

Η πύρινη σφαίρα θεωρείται ότι έχει σφαιρικό σχήμα. Αν και καμία πύρινη σφαίρα δεν θα είναι απόλυτα σφαιρική, η καταλληλότητα της υπόθεσης ενός σφαιρικού σχήματος επιβεβαιώνεται από παρατηρήσεις στατικών φωτογραφιών και βίντεο πραγματικών πύρινων σφαιρών.

2.9.2. Μάζα του Εμπλεκόμενου Καυσίμου

Η εξίσωση της μάζας του καυσίμου που εμπλέκεται στην πύρινη σφαίρα με τη μάζα του καυσίμου που απελευθερώνεται είναι υπερβολικά συντηρητική για κάθε πύρινη σφαίρα που δημιουργείται από την απελευθέρωση υγρού που υπερθερμαίνεται ελαφρώς. Αντ' αυτού, χρησιμοποιούνται οι κατευθυντήριες γραμμές που προτείνονται από το CCPS.

Η εμπλεκόμενη μάζα ισούται με τη μάζα που απελευθερώνεται εάν η αδιαβατική ανάφλεξη υπερβαίνει το 1/3. Διαφορετικά, η μάζα που εμπλέκεται ισούται με τρεις φορές την αδιαβατική ανάφλεξη (υπολογιζόμενη στην πίεση διάρρηξης του δοχείου).

Οι εν λόγω κατευθυντήριες γραμμές θα πρέπει να παρέχουν εύλογα συντηρητικά αποτελέσματα, χωρίς να είναι υπερβολικά απαισιόδοξες.

2.9.3. Διάρκεια της Πύρινης Σφαίρας

Ο TNO πρότεινε την ακόλουθη σχέση μεταξύ της διάρκειας της πύρινης σφαίρας και της μάζας καυσίμου που εμπλέκεται στην πύρινη σφαίρα.

$$t_d = 0,852 \cdot m_f^{0,26} \quad (7)$$

Το δυναμικό μοντέλο χρησιμοποιεί την ακόλουθη σχέση, η οποία είναι μια μικρή παραλλαγή της εξίσωσης TNO.

$$t_d = 0,9 \cdot m_f^{0,25} \quad (14)$$

Οι διάρκειες που προβλέπονται από την εξίσωση (14) είναι σχεδόν ίδιες με εκείνες της TNO έως ότου η μάζα υπερβεί τα 10.000 kg και είναι ελαφρώς μικρότερες από τις προβλεπόμενες από την TNO όταν η μάζα υπερβαίνει τα 10.000 kg. Σε σύγκριση με τις προβλέψεις διάρκειας των εξισώσεων (8α) και (8β), οι διάρκειες που προβλέπονται από την εξίσωση (14) είναι ελαφρώς μεγαλύτερες για μάζες μικρότερες από 5.000 kg ή περισσότερες από 300.000 kg. Στο τμήμα της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας (SEP) του στατικού μοντέλου παρουσιάστηκε μια σύντομη συζήτηση της σχέσης μεταξύ της εμπλεκόμενης μάζας καυσίμου στην πύρινη σφαίρα και της SEP. Σύμφωνα με τη συζήτηση αυτή, αν οι εξισώσεις (9) και (10) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της SEP και η διάρκεια και η διάμετρος της πύρινης σφαίρας είναι ανάλογες προς την κυβική ρίζα της μάζας του εμπλεκόμενου καυσίμου, η προβλεπόμενη SEP είναι ανεξάρτητη από τη μάζα του καυσίμου. Έτσι, εάν η εξίσωση (6) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέγιστης διαμέτρου και η εξίσωση (8α) χρησιμοποιείται για τη διάρκεια, η SEP είναι ανεξάρτητη από τη μάζα του καυσίμου. Ωστόσο, εάν η εξίσωση (8β) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διάρκειας των πύρινων σφαιρών που περιλαμβάνουν περισσότερα από 37.000 kg καυσίμου, η SEP ξαφνικά εξαρτάται από τη μάζα του καυσίμου. Αυτή η αλλαγή στη συμπεριφορά της SEP όταν η μάζα του καυσίμου φτάσει τα 37.000 kg είναι εξαιρετικά απίθανη. Ως εκ τούτου, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (14) για τον υπολογισμό της διάρκειας της πύρινης σφαίρας.

2.9.4. Διάμετρος και Θέση της Πύρινης Σφαίρας

Κατά τη διάρκεια του πρώιμου τμήματος της ύπαρξης μιας πύρινης σφαίρας, το δυναμικό μοντέλο αντιμετωπίζει την πύρινη σφαίρα ως μια σφαίρα που αυξάνεται σε διάμετρο με το χρόνο, παραμένοντας επαφτόμενη στο έδαφος καθώς μεγαλώνει. Στο τέλος της φάσης ανάπτυξης, η πύρινη σφαίρα έχει φτάσει στη μέγιστη διάμετρο της (η οποία προβλέπεται από την εξίσωση 4) και αρχίζει να ανεβαίνει στον αέρα.

$$D = 5,8 \cdot m_f^{1/3} \quad (4)$$

Η πύρινη σφαίρα θεωρείται ότι επιτυγχάνει τη μέγιστη διάμετρο της στο τέλος του πρώτου τρίτου της διάρκειάς της. Αυτή είναι επίσης η στιγμή κατά την οποία θεωρείται ότι θα συμβεί η ανύψωση, δηλαδή: $t_{lo} = t_d / 3$).

Οι υποθέσεις αυτές βασίζονται σε:

- πειραματικά δεδομένα, τα οποία δείχνουν ότι η μέγιστη παραγωγή ακτινοβολίας συμβαίνει στο τέλος του πρώτου τρίτου της διάρκειας της πύρινης σφαίρας.
- την εργασία του Roberts, ο οποίος σημείωσε ότι η μέγιστη παραγωγή ακτινοβολίας συμβαίνει όταν η πύρινη σφαίρα έχει αυξηθεί στη μέγιστη διάμετρο της. και
- πειραματικά δεδομένα από τους Hasegawa και Sato και Hardee και Lee, τα οποία δείχνουν ότι η πύρινη σφαίρα αρχίζει να ανεβαίνει στον αέρα μόλις φτάσει στη μέγιστη διάμετρο της.

Οι Hardee και Lee διεξήγαγαν πειράματα στα οποία ανέλυσαν προαναμεμιγμένες ποσότητες αερίου προπανίου και αέρα. Σύμφωνα με αυτά τα πειράματα, η διάμετρος της πύρινης σφαίρας ήταν ανάλογη με την κυβική ρίζα του χρόνου, μέχρι η διάμετρος να φτάσει στο

μέγιστο. Οι Moorhouse και Pritchard επανεξέτασαν άλλα πειράματα και κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα. Για να ελεγχθεί αυτή η υπόθεση, πραγματοποιήθηκε ανάλυση καρέ-καρέ τριών πύρινων σφαιρών BLEVE από το βίντεο NFPA, "BLEVE Update". Τα τρία ατυχήματα αφορούσαν δεξαμενές προπανίου που κυμαίνονταν σε μέγεθος από φορητό κύλινδρο έως βυτιοφόρο όχημα. Σε κάθε ένα από αυτά τα περιστατικά, ο ρυθμός ανάπτυξης της πύρινης σφαίρας ήταν περίπου ανάλογος με την κυβική ρίζα του χρόνου. Επιπλέον, ο χρόνος κατά τον οποίο η πύρινη σφαίρα έφτασε στο μέγιστο μέγεθός της και ο χρόνος κατά τον οποίο απογειώθηκε ήταν περίπου ίσοι.

Οι Hardee, Lee και Benedick πρότειναν μια εξίσωση της ακόλουθης μορφής για τον υπολογισμό της διαμέτρου μιας πύρινης σφαίρας κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξής της.

$$D(t) = C \cdot m_f^{5/18} \cdot t^{1/3} \quad (15)$$

όπου $D(t)$ = διάμετρος πύρινης σφαίρας σε χρόνο t , m

C = Συντελεστής αναλογικότητας

Δεδομένου ότι η πύρινη σφαίρα φτάνει στη μέγιστη διάμετρο της σε χρόνο t_{lo} , η εξίσωση 14 μπορεί να "λυθεί" αντικαθιστώντας τη μέγιστη διάμετρο $5,8 \cdot m_f^{1/3}$ με $D(t)$, και $t_{lo} \cdot (0,3 \cdot m_f^{1/4})$ για t . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό της διαμέτρου της πύρινης σφαίρας κατά τη φάση ανάπτυξής της:

$$D(t) = 8,664 \cdot m_f^{1/4} \cdot t^{1/3} \quad \text{για } t \leq t_{lo} \quad (16)$$

Μόλις η διάμετρος της πύρινης σφαίρας φτάσει στη μέγιστη τιμή της και η πύρινη σφαίρα έχει αρχίσει να ανυψώνεται, η διάμετρος παραμένει σταθερή έως ότου η πύρινη σφαίρα διαλυθεί εντελώς στο χρόνο t_d .

Ο Shield παρατήρησε ότι η πύρινη σφαίρα έπαψε να υπάρχει μόλις το κέντρο της πύρινης σφαίρας ανέβηκε σε ύψος τρεις φορές τη μέγιστη ακτίνα. Παρατήρησε επίσης ότι η ταχύτητα μιας ανερχόμενης πύρινης σφαίρας ήταν περίπου σταθερή. Έτσι, το κέντρο της πύρινης σφαίρας κινείται προς τα πάνω με σταθερό ρυθμό από τη θέση πριν από την εκτόξευση (μία μέγιστη ακτίνα πάνω από το έδαφος) σε τριπλάσιο υψόμετρο στα τελευταία δύο τρίτα της ύπαρξης της πύρινης σφαίρας. Με αυτή τη συσχέτιση, μπορεί να προσδιοριστεί η θέση της πύρινης σφαίρας ανά πάσα στιγμή.

2.9.5. Εκπεμπόμενη Θερμική Ακτινοβολία

Η SEP βασίζεται στην εξίσωση 9, η οποία προβλέπει το κλάσμα της συνολικής διαθέσιμης θερμικής ενέργειας που εκπέμπεται ως ακτινοβολία.

$$f = 0,27 \cdot p^{0,32} \quad (9)$$

Μόλις υπολογιστεί το κλάσμα της ακτινοβολούμενης θερμότητας, χρησιμοποιείται η ακόλουθη παραλλαγή της εξίσωσης 8 για τον υπολογισμό της επιφανειακής ισχύος εκπομπής.

$$q_s = \frac{f \cdot m_f \cdot H_c}{0,8888 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot t_d} \quad (17)$$

όπου: $0,8888 \cdot \pi \cdot D^2$ = χρονικά μέση επιφάνεια της πύρινης σφαίρας, m^2

Αντικαθιστώντας D με $5,8 \cdot m_f^{1/3}$ για και t_d με $0,9 \cdot m_f^{1/4}$ οδηγεί στην ακόλουθη εξίσωση.

$$q_s = 0,0133 \cdot f \cdot H_c \cdot m_f^{1,12} \quad (18)$$

Αυτή η εξίσωση αυξάνει την εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία καθώς αυξάνεται η μάζα του καυσίμου που εμπλέκεται στην πύρινη σφαίρα. Η τάση αυτή υποστηρίζεται από πειραματικά δεδομένα. Ωστόσο, η έρευνα καύσης δείχνει ότι η SEP δε θα υπερβεί κάποιο ανώτατο όριο, ανεξάρτητα από τη μάζα ή την πίεση που εμπλέκεται. Έχουν προταθεί όρια που κυμαίνονται από 300 kW/m^2 έως 450 kW/m^2 . Με βάση τα πειράματα της British Gas, εκτιμάται ότι τα 400 kW/m^2 είναι ένα ρεαλιστικό ανώτατο όριο για τη SEP . Ως εκ τούτου, το δυναμικό μοντέλο

χρησιμοποιεί τη *SEP* που υπολογίζεται από την εξίσωση (16), ή 400 kW/m^2 , όποιο είναι μικρότερο.

Η προκύπτουσα *SEP* εφαρμόζεται στην πύρινη σφαίρα κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξής της. Πειραματικά δεδομένα έδειξαν ότι η *SEP* μειώνεται μόλις η πύρινη σφαίρα φτάσει στη μέγιστη διάμετρο της. Το δυναμικό μοντέλο πύρινης σφαίρας εξηγεί αυτή τη συμπεριφορά μειώνοντας γραμμικά τη *SEP* από τη μέγιστη τιμή του στο μηδέν κατά τα τελευταία δύο τρίτα της διάρκειας της πύρινης σφαίρας.

2.9.6. Συντελεστής Θέασης

Οποιαδήποτε από τις εξισώσεις του συντελεστή θέασης για μια σφαίρα που ακτινοβολεί σε ένα σημείο έξω από τη σφαίρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αυτό το μοντέλο. Η προτιμότερη εξίσωση θα ποικίλει ανάλογα με την κατάσταση που πρέπει να μοντελοποιηθεί και τις επιθυμίες του χειριστή του μοντέλου. Για γενική χρήση, το δυναμικό μοντέλο τοποθετεί το στόχο στο έδαφος, με το διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια του στόχου να διέρχεται από το κέντρο της πύρινης σφαίρας. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η εξίσωση (12) για τον υπολογισμό του συντελεστή θέασης. Καθώς η πύρινη σφαίρα ανεβαίνει, ο στόχος περιστρέφεται συνεχώς έτσι ώστε το κάθετο προς την επιφάνεια του στόχου διάνυσμα να συνεχίζει να διέρχεται από το κέντρο της πύρινης σφαίρας ανά πάσα στιγμή. Αυτή είναι μια συντηρητική υπόθεση, δεδομένου ότι διασφαλίζει ότι, ανά πάσα στιγμή, ο υπολογιζόμενος συντελεστής προβολής θα είναι ο μέγιστος δυνατός για ένα στόχο που βρίσκεται σε δεδομένη απόσταση από την πύρινη σφαίρα.

2.9.7. Διαπερατότητα της Ατμόσφαιρας

Οι εξισώσεις από τον Wayne χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής διαπερατότητας. Υπολογίζουν την απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας από υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και προβλέπουν αύξηση της απορρόφησης καθώς αυξάνεται η απόλυτη υγρασία και το μήκος της διαδρομής.

Το μοντέλο ορίζει το μήκος διαδρομής ίσο με την απόσταση μεταξύ του στόχου και του πλησιέστερου σημείου της επιφάνειας της πύρινης σφαίρας. (Αυτή είναι μια συντηρητική υπόθεση, δεδομένου ότι η θερμική ακτινοβολία από όλα τα άλλα σημεία στην επιφάνεια της πύρινης σφαίρας θα πρέπει να ταξιδέψει σε μεγαλύτερο μήκος διαδρομής.) Επειδή η θέση της πύρινης σφαίρας αλλάζει συνεχώς, το μήκος διαδρομής μεταξύ του στόχου και της σφαίρας αλλάζει επίσης με το χρόνο.

2.10. Πύρινες Σφαίρες από Εκνεφώματα Υγρών

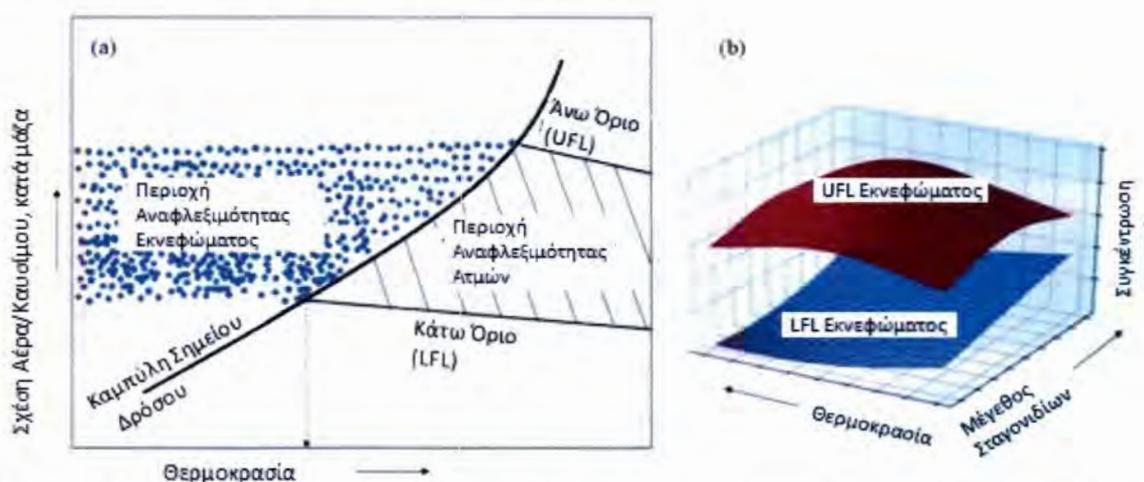
2.10.1. Εκνεφώματα Σταγονιδίων

Είναι γνωστό ότι τα εκνεφώματα υγρών υψηλού σημείου ανάφλεξης όπως το ντήζελ, η κηροζίνη και τα λιπαντικά έλαια μπορούν να αναφλεγούν και να προκαλέσουν εκρήξεις σε θερμοκρασίες κάτω από τα σημεία ανάφλεξης τους. Μια ανασκόπηση από τον Santon εντόπισε 37 ιστορικά περιστατικά ανάφλεξης που αφορούσαν εύφλεκτα εκνεφώματα, συμπεριλαμβανομένων 20 εκρήξεων, εκ των οποίων εννέα ήταν αθροιστικά υπεύθυνες για συνολικά 29 θανάτους.⁸ Ο πιθανός κίνδυνος από εκνεφώματα αναγνωρίζεται στην Ευρωπαϊκή Οδηγία για τις Εκρηκτικές Ατμόσφαιρες (ATEX).⁹ Όμως, υπάρχει περιορισμένη μόνο καθοδήγηση σχετικά με τις μεθόδους πρόβλεψης της έκτασης του κινδύνου που

⁸ R.C. Santon: "Mist Fires and Explosions – An Incident Survey", Proceedings Institute of Chemical Engineers, Hazards XXI Symposium & Workshop, Manchester, UK, 2009, <https://www.icheme.org/media/9551/xxi-paper-054.pdf>

⁹ Οδηγία 1999/92/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 16ης Δεκεμβρίου 1999, σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για τη βελτίωση της προστασίας της υγείας και της ασφάλειας των εργαζομένων οι οποίοι είναι δυνατόν να εκτεθούν σε κίνδυνο από εκρηκτικές ατμόσφαιρες (δέκατη πέμπτη ειδική οδηγία κατά την έννοια του άρθρου 16 παράγραφος 1 της οδηγίας 89/391/ΕΟΚ), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:31999L0092>

δημιουργείται από εκνεφώματα υγρών υψηλού σημείου ανάφλεξης. Η πιο πρόσφατη έκδοση του σχετικού προτύπου IEC (IEC 60079-10-1; IEC 2015) περιέχει δύο σελίδες ποιοτικής καθοδήγησης σχετικά με τα εύφλεκτα εκνεφώματα και ο πρότυπος κώδικας ασφαλούς πρακτικής E15 για την ταξινόμηση περιοχών (Energy Institute, 2015) σημειώνει: "υπάρχει περιορισμένη γνώση σχετικά με το σχηματισμό εύφλεκτου εκνεφώματος και της αντίστοιχης έκτασης των σχετιζόμενων επικίνδυνων περιοχών". Εκνέφωμα μπορεί να σχηματίζεται ή να υπάρχει ταυτόχρονα με εύφλεκτους ατμούς. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τον τρόπο διασποράς εύφλεκτων υλικών και την έκταση τυχόν επικίνδυνων περιοχών. Η αυστηρή εφαρμογή της ταξινόμησης περιοχών για αέρια και ατμούς μπορεί να μην είναι κατάλληλη επειδή τα χαρακτηριστικά ευφλεκτότητας των συγκεντρώσεων σταγονιδίων δεν είναι πάντα προβλέψιμα. Ενώ μπορεί να είναι δύσκολο να αποφασιστεί ο τύπος και η έκταση των ζωνών, τα κριτήρια που ισχύουν για τα αέρια και τους ατμούς θα δώσουν, στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα ασφαλές αποτέλεσμα. Ωστόσο, πρέπει πάντα να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον κίνδυνο ανάφλεξης εύφλεκτων εκνεφωμάτων.¹⁰



Σχήμα 2.3. α) Σχηματικό διάγραμμα αναφλεξιμότητας σε σταθερή πίεση, β) Σχηματική περιοχή αναφλεξιμότητας εκνεφώματος σε σταθερή πίεση ως συνάρτηση του μεγέθους, της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης των σταγονιδίων.

Ενώ οι κίνδυνοι αναφλεξιμότητας και εκρηκτικότητας αερίων και σκονών έχουν μελετηθεί καλά, δε μπορεί να ειπωθεί το ίδιο για τα εκνεφώματα, τα οποία συχνά παραβλέπονται από τη βιομηχανία, τους νομοθέτες και τους ακαδημαϊκούς. Η εσφαλμένη αντίληψη ότι ένα υγρό δεν μπορεί να αναφλεγεί κάτω από το σημείο ανάφλεξης του έχει επισημανθεί από το 1955. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.α, υποδεικνύεται εννοιολογικά η ύπαρξη της περιοχής αναφλεξιμότητας του εκνεφώματος, αν και πολύ απλουστευμένα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.β η περιοχή αναφλεξιμότητας ενός εκνεφώματος σε σταθερή πίεση περιλαμβάνει παραμέτρους όπως το μέγεθος των σταγονιδίων, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση. Εκατοντάδες υγρά που χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες όπως οι μεταφορές, τα διυλιστήρια και η υπεράκτια βιομηχανία έχουν δυνατότητες σχηματισμού εκνεφωμάτων. Μια έκρηξη εκνεφώματος έχει τη δυνατότητα να εξελιχθεί στο φαινόμενο "βόμβα καυσίμου – αέρα", στο οποίο μια αρχική έκρηξη διασκορπίζει άκαυστα σταγονίδια στο ετερογενές μίγμα, ακολουθούμενη από μια πιο σοβαρή δευτερογενή έκρηξη που προκύπτει από ενισχυμένη ανάμιξη με το περιβάλλον οξυγόνο. Επιπλέον, υπό τις κατάλληλες

¹⁰ Simon Gant, Richard Bettis, Simon Coldrick, Graham Burrell, Roger Santon Brian Fullam, Kyriakos Mouzakitis, Anthony Giles, Philip Bowen: "Area classification of flammable mists: summary of joint-industry project findings", Proceedings Institute of Chemical Engineers, Hazards 26, Edinburgh, UK, 2016, <https://www.icheme.org/media/11775/hazards-26-paper-38-area-classification-of-flammable-mists-summary-of-joint-industry-project-findings.pdf>

συνθήκες, η απελευθέρωση υγρών και ο σχηματισμός εκνεφώματος σε πλήρη κλίμακα μπορεί να οδηγήσει σε μετάβαση ανάφλεξης σε έκρηξη (deflagration to detonation – DDT).¹¹

Πίνακας 1.1 Σύνοψη των δοκιμών ανάφλεξης

Γεωμετρία Ψεκασμού	Ρευστό	Πίεση (barg)	Θερμοκρασία	Έναυση;
Ελεύθερος Ψεκασμός	Jet A1	1, 7, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20	Περιβάλλοντος	Σε όλες τις πιέσεις
Ελεύθερος Ψεκασμός	Υδραυλικό Έλαιο	5, 10, 15, 20, 30, 70, 110, 130	Περιβάλλοντος	Όχι, αλλά μερικές “αναφλέξεις” στις υψηλότερες πιέσεις
Ελεύθερος Ψεκασμός	Ελαφρύ Μαζούτ	5, 10, 15, 20	Περιβάλλοντος	Όχι
Ελεύθερος Ψεκασμός	Ελαφρύ Μαζούτ	5, 10, 15, 20	70 °C	Σε όλες τις πιέσεις
Πρόσκρουσης	Υδραυλικό Έλαιο	5, 10, 15, 20	Περιβάλλοντος	Όχι
Πρόσκρουσης	Ελαφρύ Μαζούτ	15, 20	Περιβάλλοντος	Στα 20 barg μόνο
Πρόσκρουσης	Ελαφρύ Μαζούτ	5, 10, 15, 20	70°C	Σε όλες τις πιέσεις

Για την αντιμετώπιση του ζητήματος της δυνατότητας ανάφλεξης εκνεφωμάτων και του καθορισμού περιοχών επικινδυνότητας εκπονήθηκε ερευνητικό έργο που είχε ως στόχο η ανάπτυξη πρακτικών κριτηρίων για τον καθορισμό της πιθανότητας σχηματισμού εύφλεκτου εκνεφώματος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως μέρος μιας διαδικασίας ταξινόμησης περιοχών. Το πεδίο εργασίας περιελάμβανε το σχηματισμό εύφλεκτου εκνεφώματος, μεθόδους πρόβλεψης της έκτασης του εύφλεκτου νέφους, έννοιες εξοπλισμού προστασίας και επιλογής εξοπλισμού. Αξιολογήθηκαν πειραματικά και μέσω διαδικασίας υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) υγρά διαφορετικής πτητικότητας και αναφλεξιμότητας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανάφλεξης σε διάφορες συνθήκες ψεκασμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Έγινε επίσης προσπάθεια κατηγοριοποίησης εκροών – διαρροών, που για σύστημα με πίεση 10 barg και διάμετρο οπής 1 mm προτάθηκαν οι εξής κατηγορίες:

- Κατηγορία έκλυσης I: Πιο πτητικά υγρά που είναι πιο επιρρεπή στη διασπορά, όπως πολλά εμπορικά καύσιμα.
- Κατηγορία έκλυσης II: Πιο πτητικά υγρά που είναι λιγότερο επιρρεπή στη διασπορά, όπως ιξώδες μαζούτ σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος.
- Κατηγορία έκλυσης III: Λιγότερο πτητικά υγρά που είναι επίσης λιγότερο επιρρεπή στη διασπορά, όπως πολλά λιπαντικά και υδραυλικά υγρά σε χαμηλές (κοντά στο περιβάλλον) θερμοκρασίες.
- Κατηγορία έκλυσης IV: Λιγότερο πτητικά υγρά που είναι πιο επιρρεπή στη διασπορά, όπως πολλά λιπαντικά και υδραυλικά υγρά σε υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί να προκύψουν κατά τη χρήση.

Κατά την εκχώρηση μιας κατηγορίας έκλυσης για μια δεδομένη κατάσταση, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες του υγρού στη χειρότερη περίπτωση (συνήθως η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας του υγρού).

2.10.2. Οδηγία EN 60079-10-1 για Εκρηκτικές Ατμόσφαιρες

Η Οδηγία EN 60079-10-1 δίνει τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατηγοριοποίηση περιοχών σε περιπτώσεις εκρηκτικής ατμόσφαιρας λόγω παρουσίας αερίων. Μέσα στην Οδηγία υπάρχει το Παράρτημα D που δίνει πληροφορίες σχετικά με εύφλεκτα εκνεφώματα.¹²

Οι πληροφορίες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- D.1. Όταν ο χειρισμός ενός υγρού γίνεται στο σημείο ανάφλεξης ή πάνω από αυτό, οποιαδήποτε εκροή θα υποβληθεί σε επεξεργασία μέσω της κανονικής διαδικασίας

¹¹ Shuai Yuan, Chenxi Ji, Haitian Han, Yue Sun, Chad V. Mashuga: "A review of aerosol flammability and explosion related incidents, standards, studies, and risk analysis", Process Safety and Environmental Protection, 146, (2021), pp. 499-514, doi:10.1016/j.psep.2020.11.032

¹² EN 60079-10-1 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas - Explosive gas atmospheres, European Committee for Electrotechnical Standardization, Brussels, 2014

ταξινόμησης περιοχής που περιγράφεται στο παρόν πρότυπο. Εάν απελευθερωθεί κάτω από το σημείο ανάφλεξης, υπό ορισμένες συνθήκες, μπορεί να σχηματίσει ένα εύφλεκτο εκνέφωμα. Ακόμη και τα υγρά που μπορούν να θεωρηθούν ως μη επικίνδυνα σε θερμοκρασίες διεργασίας, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να σχηματίσουν εύφλεκτο εκνέφωμα που μπορεί στη συνέχεια να προκαλέσει κίνδυνο έκρηξης. Παραδείγματα υγρών που θεωρούνται συνήθως υπό αυτή την άποψη περιλαμβάνουν υγρά καύσιμα υψηλού σημείου ανάφλεξης, έλαια μεταφοράς θερμότητας και λιπαντικά έλαια.

- D.2. Στην πράξη, μια εκροή υγρού αποτελείται συνήθως από ευρύ φάσμα μεγεθών σταγονιδίων με μεγαλύτερα σταγονίδια που τείνουν να διαχωριστούν αμέσως, αφήνοντας μόνο ένα μικρό κλάσμα της απελευθέρωσης στον αέρα με τη μορφή εκνεφώματος. Η ευφλεκτότητα του εκνεφώματος εξαρτάται από τη συγκέντρωση στον αέρα (σταγονίδια συν ατμούς), την πτητικότητα και τα μεγέθη των σταγονιδίων μέσα στο νέφος. Το μέγεθος των σταγονιδίων εξαρτάται από την πίεση στην οποία απελευθερώνεται το υγρό, τις ιδιότητες του υγρού (κυρίως πυκνότητα, επιφανειακή τάση και ιξώδες) και το μέγεθος και το σχήμα του ανοίγματος απελευθέρωσης. Κανονικά, υψηλότερες πιέσεις και μικρότερα ανοίγματα θα συμβάλουν στο βαθμό ψεκασμού του πίδακα απελευθέρωσης δίνοντας έτσι την αύξηση του κινδύνου έκρηξης. Από την άλλη, τα μικρότερα ανοίγματα απελευθέρωσης συνεπάγονται μικρότερους ρυθμούς απελευθέρωσης, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο.
- D.3. Έχει αποδειχθεί ότι τα σταγονίδια μεγέθους αερολύματος (aerosol) θα είναι πιθανότατα το πιο εύκολα αναφλέξιμο τμήμα του εκνεφώματος. Ωστόσο, σταγονίδια μεγέθους αερολύματος θα είναι γενικά μόνο ένα μικρό κλάσμα της συνολικής απελευθέρωσης. Αυτό το κλάσμα μπορεί να αυξηθεί εάν ο πίδακας απελευθέρωσης προσκρούσει σε μια επιφάνεια που βρίσκεται σε κοντινή απόσταση.

Σημ. 1. Τα αερολύματα είναι μικρά σωματίδια (κάτω από μm έως $50 \mu\text{m}$) σε αιώρηση στην ατμόσφαιρα.

Σημ. 2. Τα σταγονίδια στην περιοχή αερολυμάτων μπορεί να είναι τόσο λίγα όσο το 1 % της συνολικής μάζας που απελευθερώνεται, ανάλογα με τις συνθήκες απελευθέρωσης.

Σημ. 3. Τα νέφη σταγονιδίων καυσίμου είναι γενικά δύσκολο να αναφλεγούν, εκτός εάν υπάρχει επαρκής μάζα ατμών ή πολύ μικρά σταγονίδια.
- D.4. Η πιθανότητα ότι η απελευθέρωση υγρού θα δημιουργήσει εύφλεκτο εκνέφωμα κατά την κανονική λειτουργία ή/και τις αναμενόμενες δυσλειτουργίες θα πρέπει να αξιολογείται προσεκτικά μαζί με την πιθανότητα συμβάντων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε τέτοια απελευθέρωση. Η αξιολόγηση μπορεί να υποδεικνύει ότι η απελευθέρωση υλικού είναι πολύ μικρής πιθανότητας ή ότι το νέφος ομίχλης θα μπορούσε να δημιουργηθεί μόνο κατά τη διάρκεια σπάνιων δυσλειτουργιών ή καταστροφικών βλαβών. Οι αξιολογήσεις θα πρέπει να συνοδεύονται από αναφορές ή επιχειρησιακή πείρα από παρόμοιες μονάδες. Ωστόσο, λόγω της θερμοδυναμικής πολυπλοκότητας των εκνεφωμάτων και ενός μεγάλου αριθμού παραγόντων που επηρεάζουν το σχηματισμό και την ευφλεκτότητα των εκνεφωμάτων, η αναφορά μπορεί να μην είναι διαθέσιμη για κάθε δεδομένη κατάσταση. Στις περιπτώσεις αυτές, θα πρέπει να εφαρμόζεται απόφαση βάσει σχετικών δεδομένων.
- D.5. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι δεν θα προκαλέσει κάθε διαρροή σχηματισμό εκνεφώματος, π.χ. οι διαρροές μέσω σπασμένων παρεμβυσμάτων στεγανοποίησης (φλάντζες, στυπιοθλήπτες) που είναι οι συνηθέστερες δευτερεύουσες πηγές διαρροών σε περίπτωση αερίων ή ατμών, θα είναι συνήθως αμελητέες στην περίπτωση ιξωδών υγρών και στις περισσότερες περιπτώσεις θα προκαλέσουν στάγδην ροή αντί για εκνέφωμα. Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα δημιουργίας εκνεφώματος μέσω διαρροών σε αρμούς σωλήνων, βαλβίδες κ.λπ. δεν πρέπει να υπερεκτιμάται. Οι εκτιμήσεις αυτές θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις φυσικές ιδιότητες του υγρού, τις συνθήκες χειρισμού του, τις

μηχανικές λεπτομέρειες του εξοπλισμού μέσω του οποίου υποβάλλεται σε επεξεργασία, την ποιότητα του εξοπλισμού και τα εμπόδια κοντά στην πηγή απελευθέρωσης.

Σημ. 1. Για υγρά που απελευθερώνονται πολύ κάτω από το σημείο ανάφλεξης, παραδείγματα εκρήξεων εκνεφωμάτων είναι σπάνια στις μεταποιητικές βιομηχανίες. Αυτό οφείλεται πιθανώς στη δυσκολία δημιουργίας αρκετά μικρού μεγέθους σταγονιδίων από τυχαία απελευθέρωση και στη σχετική δυσκολία ανάφλεξης.

Σημ. 2. Τα εύφλεκτα εκνεφώματα μπορούν να αναφλεγούν από σπινθήρες παρόμοιας ενέργειας όπως και για την ανάφλεξη ατμών, αλλά γενικά απαιτούν πολύ υψηλές επιφανειακές θερμοκρασίες για την ανάφλεξη. Η ανάφλεξη του εκνεφώματος με επαφή με θερμές επιφάνειες απαιτεί γενικά θερμοκρασίες υψηλότερες από ό,τι για την ανάφλεξη ατμών.

- D.6. Εάν θεωρείται πιθανός ο σχηματισμός εύφλεκτου εκνεφώματος, τότε η πηγή έκλυσης θα πρέπει κατά προτίμηση να περιορίζεται ή να διαχειρίζεται για τη μείωση του κινδύνου, π.χ. με πορώδη μέσα προκειμένου να προωθηθεί η συσσωμάτωση του εκνεφώματος, ανιχνευτών εκνεφώματος ή συστημάτων κατάπνιξης. Όταν δεν μπορούν να εξασφαλιστούν έλεγχοι περιορισμού ή παρόμοιοι έλεγχοι, τότε θα πρέπει να εξετάζεται η πιθανότητα χαρακτηρισμού του χώρου ως επικίνδυνης περιοχής. Ωστόσο, επειδή οι μηχανισμοί διασποράς και τα κριτήρια αναφλεξιμότητας των συγκεντρώσεων σταγονιδίων διαφέρουν από εκείνα των αερίων και των ατμών, δεν μπορεί να εφαρμοστεί η ίδια μεθοδολογία ταξινόμησης.

Σημ. 1. Οι συνθήκες που απαιτούνται για να σχηματιστεί ένα εύφλεκτο εκνεφώμα είναι τόσο περίπλοκες που μόνο μια ποιοτική προσέγγιση μπορεί να είναι κατάλληλη. Μπορεί να είναι χρήσιμο να προσδιοριστούν οι παράγοντες που σχετίζονται με το υγρό της διεργασίας που συμβάλλουν στο σχηματισμό και στην ευφλεκτότητα του εκνεφώματος. Αυτοί οι παράγοντες μαζί με την πιθανότητα συμβάντων που θα οδηγούσαν στην απελευθέρωση του υγρού μπορεί να επαρκούν για την αξιολόγηση του βαθμού του κινδύνου και να βοηθήσουν να αποφασιστεί εάν απαιτείται χαρακτηρισμός επικίνδυνης περιοχής.

Σημ. 2. Γενικά, το μόνο στοιχείο που έχει σημασία για τον προσδιορισμό του τύπου της ζώνης είναι ο βαθμός απελευθέρωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, θα είναι δευτερεύων βαθμός απελευθέρωσης. Οι συνεχείς ή πρωτογενείς βαθμοί απελευθέρωσης συνδέονται συνήθως με εξοπλισμό που προορίζεται για ψεκασμό, π.χ. βαφή με ψεκασμό.

Σημ. 3. Εάν έχει καθοριστεί επικίνδυνη περιοχή, θα πρέπει να γίνεται διάκριση μεταξύ της περιοχής από άλλες περιοχές που συνδέονται με αέρια και ατμούς, π.χ. με κατάλληλη σήμανση.

- D.7. Ακόμη και τα εκνεφώματα που δεν είναι αναφλέξιμα σύμφωνα με τα κριτήρια του μεγέθους των σταγονιδίων θα μπορούσαν τελικά να προσκρούσουν σε μια θερμή επιφάνεια, σε σχέση με τη θερμοκρασία ανάφλεξης των ατμών, προκαλώντας έτσι κίνδυνο πυρκαγιάς. Πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε να περιορίζονται πιθανές εκροές και να αποφεύγεται η επαφή με θερμές επιφάνειες.

- D.8. Το εκνεφώμα απαιτεί ελάχιστες συγκεντρώσεις για να είναι εύφλεκτο (κατά τρόπο παρόμοιο με τους εύφλεκτους ατμούς ή τις εύφλεκτες σκόνες). Για τα μη εύφλεκτα υγρά, αυτό συνήθως σχετίζεται με ένα νέφος που μειώνει την ορατότητα. Οι εκτιμήσεις θα πρέπει επίσης να λαμβάνουν υπόψη ότι το εκνεφώμα είναι συνήθως ορατό και, ως εκ τούτου, οι εκροές μπορούν συνήθως να μετρηστούν σε εύθετο χρόνο.

Σημ. Τα κατώτερα όρια αναφλεξιμότητας για αερολύματα καυσίμου έχουν αποδειχθεί ότι είναι παρόμοια ή μικρότερα από εκείνα που συνδέονται με τους ατμούς καυσίμου.

- D.9. Εύφλεκτα εκνεφώματα μπορεί να εμφανιστούν εσωτερικά στον εξοπλισμό λόγω συστημάτων λίπανσης με έλαιο, ή ανάδευσης ως μέρος των εργασιών της διαδικασίας. Τα εσωτερικά μέρη της μονάδας επεξεργασίας θα πρέπει στη συνέχεια να θεωρούνται επικίνδυνες περιοχές. Υπό ορισμένες συνθήκες, τέτοιο εκνέφωμα μπορεί επίσης να επελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, π.χ. εκνεφώματος λιπαντικού ελαίου μέσω εξαεριστικών στροφαλοθαλάμου, εξαεριστικών δεξαμενής ή κιβωτίου ταχυτήτων, προκαλώντας έτσι κίνδυνο πυρκαγιάς. Ο εξαερισμός τέτοιων συγκεντρώσεων πρέπει κατά προτίμηση να εξαλείφεται με απαγωγούς εκνεφωμάτων.
- D.10. Πρόσθετες εκτιμήσεις θα πρέπει να εφαρμόζονται για περιπτώσεις όπου τα υγρά ψεκάζονται σκόπιμα, π.χ. βαφή με ψεκάσμο. Η ταξινόμηση των περιοχών σε τέτοιες περιπτώσεις αποτελεί συνήθως αντικείμενο ειδικών βιομηχανικών κωδικών.

2.11. Διαδικασίες Υπολογισμού Εκροής Υγρού από Δοχείο

Πέραν της περίπτωσης εκροής ενός υγρού σε θερμοκρασία κοντά ή πάνω από τη θερμοκρασία βρασμού, υπάρχει και η περίπτωση εκροής υγρού σε θερμοκρασία χαμηλότερης της θερμοκρασίας βρασμού. Σε τέτοια περίπτωση, αυτό που αναζητείται είναι η δυνατότητα σχηματισμού εκνεφώματος από το υγρό.

2.11.1. Διαδικασία Υπολογισμών TNO

Η μοντελοποίηση της δυναμικής ενός δοχείου γεμάτου με υγρό εκτός περιοχής βρασμού (υπόψυκτο υγρό στοχεύει στην πρόβλεψη της μείωσης της μάζας του υγρού κατά την εκροή του από το δοχείο.

Η υδραυλική πίεση που καθοδηγεί τον ρυθμό ροής μάζας εξαρτάται από τη στάθμη του υγρού στη δεξαμενή· μπορεί να ληφθεί υπόψη σταθερή πίεση p με συμπίεση με αδρανές αέριο.

Η εφαρμογή του βασικού νόμου διατήρησης της μάζας και λαμβάνοντας υπόψη την υδραυλική πίεση μιας στήλης υγρού αρκεί για μια επαρκή περιγραφή της δυναμικής του δοχείου.

Το μοντέλο είναι βασικά μια επαναληπτική αριθμητική διαδικασία στην οποία η εκροή υγρού από ένα δοχείο περιγράφεται σε μικρά βήματα. Αυτά τα βήματα πρέπει να είναι αρκετά μικρά ώστε να θεωρούν ότι οι συνθήκες στο δοχείο είναι σταθερές κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος.

Πρώτον, θα δοθεί η αρχική συνθήκη και η συνθήκη τερματισμού της αριθμητικής διαδικασίας. Στη συνέχεια, δίνεται το μοντέλο με τη μορφή αριθμητικής διαδικασίας. Αυτή η αριθμητική διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθούν οι όροι τερματισμού.

Τέλος, δίνονται εξισώσεις που συσχετίζουν το ύψος του υγρού με τον όγκο του υγρού στο δοχείο για λίγα σχήματα δοχείων.

2.11.1.1 Αρχικές συνθήκες και διαδικασία τερματισμού εκροής (υπόψυκτου) υγρού από δοχείο

Η αρχική κατάσταση του δοχείου ($i=1$) δίνεται από το βαθμό πλήρωσης φ , τη σταθερή θερμοκρασία και τον όγκο του δοχείου. Η μάζα του υγρού στο δοχείο μπορεί εύκολα να υπολογιστεί δεδομένου του (αρχικού) βαθμού πλήρωσης φ , με

$$Q_{L,1} = \varphi \cdot V \cdot \rho_L(T) \quad (19)$$

όπου: $Q_{L,1}$ = μάζα υγρού αρχικά στο δοχείο, kg

φ = βαθμός πλήρωσης, m^3/m^3

V = όγκος δοχείου, m^3

ρ_L = πυκνότητα υγρού στη θερμοκρασία αποθήκευσης, kg/m^3

Ο αρχικός όγκος υγρού μπορεί να εκτιμηθεί από:

$$V_{L,1} = \frac{Q_{L,1}}{\rho_L}, m^3 \quad (20)$$

Το αρχικό ύψος υγρού μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας την αντίστροφη συνάρτηση μεταξύ όγκου υγρού και ύψους υγρού για τη δεδομένη γεωμετρία του δοχείου εκφραζόμενο ως:

$$h_{L,i} = F^{-1} \cdot (V_{L,i}), \text{ m} \quad (21)$$

Η διάρκεια του δt μπορεί να επιλεγεί ελεύθερα κατ' αρχήν και εξαρτάται από τον αριθμό των χρονικών βημάτων N_t . Η επιλογή $N_t = 50$ θα είναι κατάλληλη για τους περισσότερους υπολογισμούς. Αν κάποιος επιθυμεί να εκτιμήσει το ρυθμό ροής μάζας και τις συνθήκες του δοχείου στο χρόνο t_{end} , τότε το μέγεθος του χρονικού βήματος δt δίνεται από τον τύπο

$$\delta t = \frac{t_{end}}{N_t}, \text{ s} \quad (22)$$

Οι αριθμητικές διαδικασίες που δίνονται πρέπει να επαναλαμβάνονται για όσο διάστημα ισχύουν οι περιορισμοί

$$t_i < t_{end} \text{ και } h_L > h_{hole} \quad (23)$$

Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των βημάτων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια του μοντέλου, αλλά τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για τον υπολογισμό. Η επιλογή $N = 50$ θα είναι κατάλληλη, για τους περισσότερους υπολογισμούς.

2.11.1.2 Αριθμητική διαδικασία εκροής υπόψυκτου υγρού από δοχείο

Ξεκινώντας κάθε βήμα στο χρόνο t_i στην επανάληψη με μια συνθήκη στο δοχείο με δεδομένο $Q_{L,i}$ η ακόλουθη διαδικασία στοχεύει στον υπολογισμό της κατάστασης στο δοχείο στο τέλος του μικρού χρονικού βήματος δt , που είναι $Q_{L,i+1}$.

Θεωρώντας ότι ο ρυθμός εκροής $q_{s,i}$ δίνεται από μια γενικευμένη συνάρτηση f , ανάλογα με το αν η εκροή γίνεται μέσω οπής ή αγωγού

$$q_{s,i} = f(h_{L,i}, P, \dots), \text{ kg/s} \quad (24)$$

Η αρχή διατήρησης της μάζας δίνει πολύ απλά:

$$\delta Q = -q_{s,i} \cdot \delta t, \text{ kg} \quad (25)$$

Το υγρό του δοχείου θα μειώνεται κατά:

$$\delta V_L = \frac{\delta Q}{\rho_L}, \text{ m}^3 \quad (26)$$

επομένως:

$$V_{L,i+1} = V_{L,i} + \delta V_L, \text{ m}^3 \quad (27)$$

Για απλές γεωμετρίες υπάρχουν διαθέσιμες εξισώσεις για τον υπολογισμό του όγκου του υγρού V_L και του μεγέθους της επιφάνειας του υγρού A_L ως συνάρτηση της στάθμης του υγρού, που στη γενική τους μορφή εκφράζονται ως:

$$A_{L,i} = f(h_{L,i}), \text{ m}^2 \quad (28)$$

Στη συνέχεια, η νέας στάθμη του υγρού υπολογίζεται από:

$$\delta h_L = \frac{\delta V_L}{A_{L,i}}, \text{ m} \quad (29)$$

$$h_{L,i+1} = h_{L,i} + \delta h_L, \text{ m} \quad (30)$$

Ο χρόνος από την έναρξη της εκροής πρέπει να αυξάνεται κατά ένα χρονικό βήμα μετά από κάθε πέρασμα από αυτή την αριθμητική διαδικασία

$$t_{i+1} = t_i + \delta t, \text{ s} \quad (31)$$

Η νέα κατάσταση του δοχείου τη χρονική στιγμή t_{i+1} δίνεται από τον τύπο για το $Q_{L,i+1}$ ή $h_{L,i+1}$. Αυτή η αριθμητική διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθούν οι όροι τερματισμού.

Για απλές γεωμετρίες υπάρχουν διαθέσιμες εξισώσεις για τον υπολογισμό του όγκου του υγρού V_L και του μεγέθους της επιφάνειας του υγρού στο δοχείο A_L ως συνάρτηση της στάθμης υγρού h_L , στη γενικευμένη μορφή που εκφράζεται με

$$A_L = f(h_L), m^2 \quad (32)$$

$$V_L = f(h_L), m^3 \quad (33)$$

Για την περίπτωση παραλληλεπιπέδου (κατά προσέγγιση ο μετασχηματιστής) ισχύουν οι σχέσεις:

$$A_L = A_{base}, m^2 \quad (32a)$$

$$V_L = A_L \cdot h_L, m^3 \quad (32b)$$

όπου: A_L = επιφάνεια υγρού εντός του δοχείου, m^2

A_{base} = επιφάνεια στη βάση του δοχείου, m^2

h_L = στάθμη υγρού, m

V_L = όγκος υγρού εντός του δοχείου, m^3

2.11.1.3 Εκροή υγρού μέσω οπών και σωληνώσεων

Η μοντελοποίηση της εκροής υγρού μέσω οπών και σωληνώσεων στοχεύει στην πρόβλεψη του ρυθμού ροής μάζας ως συνάρτηση της πτώσης πίεσης.

Για υγρά που ρέουν μέσω ενός στομίου μπορεί να εφαρμοστεί η εξίσωση Bernoulli. Παραμελώντας την αρχική ταχύτητα υγρού στο δοχείο, ο ρυθμός ροής μάζας μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$q_s = C_d \cdot A_h \cdot \sqrt{2 \cdot (p - p_o) \cdot \rho_L}, kg/s \quad (34)$$

με

$$p = p_h + p_{oL}, Pa \quad (35)$$

και

$$p_h = \rho_L \cdot g \cdot h_L, Pa \quad (36)$$

όπου: A_h = διατομή της οπής, m^2

C_d = συντελεστής εκροής

g = επιτάχυνση βαρύτητας, m/s^2

h_L = (σχετική) στάθμη υγρού, m

p = ολική πίεση στην οπή, Pa

p_h = (υδραυλική) πίεση υγρού, Pa

p_{oL} = εξωτερική πίεση πάνω από το υγρό, Pa

p_o = ατμοσφαιρική πίεση, Pa

q_s = ρυθμός ροής μάζας, kg/s

ρ_L = πυκνότητα υγρού, kg/m^3

Προτεινόμενες τιμές: για απότομα ανοίγματα $C_d = 0,62$, για ευθύγραμμα ανοίγματα $C_d = 0,82$, για ομαλά (στρογγυλεμένα) ανοίγματα $C_d = 0,96$ και για ρήξη αγωγού $C_d = 1,00$.

2.11.2. Διαδικασία Υπολογισμών ADAM

Στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει γίνει η ανάπτυξη του λογισμικού ADAM (Accident Damage Analysis Module), που αναπτύχθηκε από το Joint Research Centre (JRC) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (EC) για την αξιολόγηση των φυσικών επιπτώσεων ενός βιομηχανικού ατυχήματος που προκύπτει από ακούσια απελευθέρωση μιας επικίνδυνης ουσίας.

Αυτό το λογισμικό προορίζεται ειδικά για να βοηθήσει τις αρμόδιες αρχές της ΕΕ, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την εφαρμογή της οδηγίας Seveso στις χώρες τους, στην αξιολόγηση των πιθανών συνεπειών ενός βιομηχανικού ατυχήματος με δομημένο και ολοκληρωμένο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, το ADAM έχει σχεδιαστεί για να εφαρμόσει τον υπολογισμό των φυσικών επιπτώσεων ενός βιομηχανικού ατυχήματος όσον αφορά τη θερμική ακτινοβολία, την υπερπίεση ή την τοξική συγκέντρωση που μπορεί να προκύψει από την απώλεια συγκράτησης μιας εύφλεκτης ή τοξικής ουσίας. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα μοντέλα και συνδυάστηκαν για να προσομοιώσουν την πιθανή εξέλιξη ενός ατυχήματος, από τη στιγμή της απελευθέρωσης μέχρι την τελική ζημιά. Το λογισμικό δεν είναι διαθέσιμο στο κοινό παρά μόνο σε εξουσιοδοτημένους φορείς. Ο οδηγός εφαρμογής

περιλαμβάνει αναφορές και σε φαινόμενα σχηματισμού πύρινης σφαίρας, και σε περίπτωση έκλυσης υγρού από δοχείο. Η προτεινόμενη διαδικασία που χρησιμοποιείται από το λογισμικό ADAM παρατίθεται στη συνέχεια.¹³

Το υγρό που περιέχεται στο δοχείο βρίσκεται σε κατάσταση υπόψυξης, δηλαδή η θερμοκρασία αποθήκευσης T είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία βρασμού T_b σε πίεση περιβάλλοντος p_o . Έτσι, δεν υπάρχει εκτόνωση κατά την απελευθέρωση και ο τύπος απελευθέρωσης είναι καθαρό υγρό. Σαφώς, η οπή του δοχείου ή η ρήξη του σωλήνα πρέπει να βρίσκεται κάτω από τη στάθμη του υγρού, διαφορετικά δεν υπάρχει εκροή υγρού (εκτός από το αέριο πάνω από αυτό).

Σε περίπτωση διαρροής ή οπής από το δοχείο, ο ρυθμός ροής απελευθέρωσης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση Bernoulli, δηλαδή:

$$q_{hole} = C_d \cdot A_h \cdot \sqrt{2 \cdot (p_h - p_o) \cdot \rho} \quad (37)$$

όπου: ρ = πυκνότητα του υγρού, kg/m³

p_h = άθροισμα της πίεσης αποθήκευσης (συνήθως η πίεση περιβάλλοντος p_o) και του όρου υδροστατικής πίεσης $\rho \cdot g \cdot \Delta h$, με Δh τη διαφορά μεταξύ της στάθμης του υγρού h_L και της απόστασης του κέντρου της οπής από τον πυθμένα του δοχείου h_{out} , Pa
 g = επιτάχυνση της βαρύτητας, m/s².

Για τις εκλύσεις από αγωγούς, εξετάζεται η ακόλουθη εξίσωση, με τις παραμέτρους να έχουν την ίδια έννοια με την περίπτωση που παρουσιάστηκε πιο πάνω:

$$q_{pipe} = A_h \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_h - p_o) \cdot \rho}{f_D \cdot \left(\frac{L_p}{D_p}\right) + \sum_i K_i}} \quad (38)$$

όπου: p_h = πίεση ηρεμίας (δηλαδή η πίεση του αερίου πάνω από το υγρό συν το μανομετρικό ύψος), Pa

p_o = πίεση η κατάντη στον αγωγό σε σχέση με τη ρήξη του αγωγού, Pa

f_D = συντελεστής τριβής Darcy

$\sum_i K_i$ = συντελεστές απωλειών. Ο όρος αντιπροσωπεύει όλες τις άλλες πηγές απωλειών τριβής στο σωλήνα, όπως η είσοδος του αγωγού, η έξοδος του αγωγού και όλα τα εξαρτήματα, δηλαδή γωνίες, διασταυρώσεις, βαλβίδες και μειωτήρες, αντιπροσωπεύοντας σημαντική απώλεια πίεσης στα περισσότερα συστήματα αγωγών.

Η εξάρτηση των f_D και K_i από τη ροή (q) μέσω του αριθμού Reynolds απαιτεί την επίλυση της εξίσωσης (36) μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, η οποία αφορούσε την εκτίμηση της πίεσης στο κατάντη σημείο p_e . Σαφώς, σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη εξίσωση για την απελευθέρωση ενός υγρού από μια οπή (δηλαδή τη χρήση της εξίσωσης (37)).

Η διαδικασία που ακολουθείται συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα:

1. Ορισμός των αρχικών συνθηκών και υπολογισμός της πυκνότητας του υγρού. Υπολογισμός του αρχικού ρυθμού ροής q_0 (χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (37) ή (38)).
2. Επιλογή του πρώτου χρονικού βήματος Δt_1 (s), το οποίο ορίζεται με βάση τον λόγο μεταξύ της αρχικής εκροής μάζας και της συνολικής μάζας που περιέχεται στο δοχείο (<0,2%). Από το βήμα αυτό και μετά αρχίζει η επαναληπτική διαδικασία.
3. Υπολογισμός της ανηγμένης μάζας m_1 (kg) εντός του δοχείου, του σχετικού όγκου V_1 και, με τη σειρά του, της ανηγμένης στάθμης υγρού (h_{L1}), ως συνέπεια της εκροής υγρού.

¹³ L. Fabbri, M. Binda, Y. Bruinen de Bruin: "Accident Damage Analysis Module (ADAM) – Technical Guidance", EUR 28732 EN, 2017, ISBN 978-92-79-71879-3, doi:10.2760/719457

4. Εάν το δοχείο είναι ατμοσφαιρικό και μη σφραγισμένο, η πίεση αποθήκευσης και η θερμοκρασία θεωρούνται σταθερές κατά τη διάρκεια της εκροής υγρού. Αντίθετα, εάν το δοχείο είναι σφραγισμένο, ενώ η στάθμη του υγρού πέφτει η εσωτερική πίεση μειώνεται, λόγω μερικού σχηματισμού κενού στο άνω μέρος του δοχείου και εκτιμάται με την παραδοχή ότι το αέριο πάνω από το υγρό υφίσταται αδιαβατική εξάτμιση. Όταν το άθροισμα αυτής της πίεσης και του υδροστατικού όρου είναι κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση, η πίεση αποθήκευσης ρυθμίζεται και πάλι στην ατμοσφαιρική πίεση, δεδομένου ότι θεωρείται ότι θα εισέλθει αέρας από την οπή, με αποτέλεσμα την εκροή επιπλέον ποσότητας υγρού.
5. Υπολογισμός του ρυθμού ροής q_1 με τη χρήση της ίδιας εξίσωσης όπως στο βήμα 1, χρησιμοποιώντας τις πρόσφατα υπολογισμένες παραμέτρους, και ενημέρωση του χρονικού βήματος.

Τα βήματα 3 έως 5 επαναλαμβάνονται επαναληπτικά έως ότου η πίεση εντός του δοχείου προσεγγίσει την πίεση περιβάλλοντος p_0 (το κατώτατο όριο του ρυθμού ροής που λαμβάνεται υπόψη στο ADAM είναι 0,002 kg/s).

Κεφάλαιο 3

3.1. Έλαια Μετασχηματιστών

Το έλαιο μετασχηματιστή είναι ένα κρίσιμο συστατικό στους ηλεκτρικούς μετασχηματιστές, καθώς χρησιμεύει τόσο ως μονωτικό μέσο όσο και ως ψυκτικό μέσο.

Το έλαιο μετασχηματιστών, γνωστό και ως μονωτικό έλαιο, είναι ένα διαφανές ανοιχτόχρωμο υγρό απαραίτητο για τη μόνωση και την ψύξη των μετασχηματιστών. Μια βασική κατηγορία που λειτουργεί και ως αναφορά σε σχέση με άλλους τύπους ελαίων αποτελούν τα ορυκτέλαια. Τα ορυκτέλαια, είναι προϊόντα επεξεργασίας του πετρελαίου και αποτελούνται κυρίως από κορεσμένους παραφινικούς και ναφθενικούς υδρογονάνθρακες και αρωματικούς υδρογονάνθρακες, με πυκνότητα περίπου 895 kg/m^3 και σημείο πήξης κάτω από $-45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Οι κύριες λειτουργίες που καλείται να επιτελέσει το έλαιο του μετασχηματιστή είναι:

- Μόνωση: Το έλαιο μετασχηματιστή προσφέρει ανώτερη διηλεκτρική αντοχή σε σύγκριση με τον αέρα, εξασφαλίζοντας αποτελεσματική μόνωση και αντοχή στην υγρασία για τα εσωτερικά εξαρτήματα του μετασχηματιστή.
- Διάχυση θερμότητας: Με υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα, το έλαιο μετασχηματιστή απορροφά και διαχέει τη θερμότητα που παράγεται κατά τη λειτουργία, διατηρώντας τις βέλτιστες θερμοκρασίες λειτουργίας μέσω συναγωγής.
- Προστασία από εκκενώσεις (ηλεκτρικό τόξο): Παίζει καθοριστικό ρόλο στην προστασία από το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται κατά τη διάρκεια των λειτουργιών εναλλαγής στο εσωτερικό των μετασχηματιστών, χάρη στην εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα και την ικανότητά του να αντέχει υψηλές θερμοκρασίες και πίεση αερίου.

Οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν τα έλαια μετασχηματιστών περιλαμβάνουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Πυκνότητα: Πρέπει να είναι σχετικά μικρή για να διευκολύνει την καταβύθιση της υγρασίας και των ακαθαρσιών.
- Ιξώδες: Το μέτριο ιξώδες εξασφαλίζει αποτελεσματική απαγωγή θερμότητας χωρίς να διακυβεύεται το σημείο ανάφλεξης.
- Σημείο ανάφλεξης: Ιδανικά πάνω από $136 \text{ }^\circ\text{C}$ για να διασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία υπό διαφορετικές συνθήκες.
- Σημείο πήξης: Προτιμώνται χαμηλότερα σημεία πήξης για τη διατήρηση της ρευστότητας σε ψυχρότερα περιβάλλοντα.
- Περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες: Χαμηλά επίπεδα προσμίξεων (π.χ. οξέα, αλκάλια, θείο, τέφρα) ελαχιστοποιούν τις διαβρωτικές επιδράσεις στα υλικά του μετασχηματιστή.
- Σταθερότητα και γήρανση: Βέλτιστη ισορροπία αντίστασης στην οξείδωση και σταθερότητας για τη διατήρηση της μακροχρόνιας απόδοσης.

Οι κύριοι τύποι ελαίων μετασχηματιστών είναι:

- Ορυκτέλαια: Χρησιμοποιούνται συνήθως στους παραδοσιακούς μετασχηματιστές, οι παραλλαγές ορυκτελαίων (25 cSt και 45 cSt) διαφέρουν με βάση τις διαδικασίες διύλισης και είναι κατάλληλες για διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Ωστόσο, περιορίζονται από υψηλά σημεία ροής, περιορίζοντας τη χρήση σε πολύ ψυχρά περιβάλλοντα.
- Φυτικά έλαια (φυσικοί εστέρες): Προερχόμενα από ανανεώσιμες πηγές, τα φυσικά εστερικά έλαια προσφέρουν ανώτερα περιβαλλοντικά οφέλη με βιοδιασπασιμότητα που υπερβαίνει το 97% σε 28 ημέρες. Παρέχουν υψηλότερα σημεία ανάφλεξης, πυρασφάλεια και παρατεταμένη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τα ορυκτέλαια, καθιστώντας τα κατάλληλα για περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές.
- Έλαια σιλικόνης: Τα έλαια σιλικόνης έχουν υψηλά σημεία ανάφλεξης, τουλάχιστον $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μετασχηματιστές που απαιτούν υψηλότερα επίπεδα πυραντίστασης, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους. Ωστόσο, έχουν το μειονέκτημα ότι δεν ενσωματώνεται καλά με άλλα υγρά και η τιμή του είναι

περίπου εξαπλάσια από εκείνη των ορυκτελαίων, γεγονός που αυξάνει το κόστος του μετασχηματιστή.¹⁴

3.2. Σημείο Ανάφλεξης

Η ιδιότητα που χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει εάν ένα υλικό αναφλέγεται εύκολα ή όχι, είναι το σημείο ανάφλεξης. Το σημείο ανάφλεξης είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία σε ατμοσφαιρική πίεση (760 mm Hg, 101,3 kPa) στην οποία η προσαγωγή μιας δοκιμαστικής φλόγας θα προκαλέσει την ανάφλεξη των ατμών ενός δείγματος υπό καθορισμένες συνθήκες δοκιμής. Το δείγμα θεωρείται ότι έχει φθάσει στο σημείο ανάφλεξης όταν εμφανιστεί μια εμφανής φλόγα και διαδοθεί ακαριαία στην επιφάνεια του δείγματος. Τα δεδομένα του σημείου ανάφλεξης χρησιμοποιούνται στους κανονισμούς μεταφοράς και ασφάλειας για τον προσδιορισμό των εύφλεκτων και αναφλέξιμων υλικών. Τα δεδομένα του σημείου ανάφλεξης μπορούν επίσης να υποδείξουν την πιθανή παρουσία ιδιαίτερα πτητικών και εύφλεκτων συστατικών σε ένα σχετικά μη πτητικό ή μη εύφλεκτο υλικό.

Το σημείο ανάφλεξης για μια ένωση ή ένα καύσιμο είναι η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία η τάση ατμών της ένωσης είναι επαρκής για την παραγωγή των ατμών που απαιτούνται για την αυθόρμητη ανάφλεξη του υδρογονάνθρακα με τον αέρα με την παρουσία εξωτερικής πηγής, δηλαδή σπινθήρα ή φλόγας. Από αυτόν τον ορισμό είναι σαφές ότι οι ενώσεις ή τα καύσιμα με υψηλότερες τάσεις ατμών (ελαφρύτερες ενώσεις) έχουν χαμηλότερα σημεία ανάφλεξης. Γενικά, το σημείο ανάφλεξης αυξάνεται με την αύξηση του σημείου ζέσης. Το σημείο ανάφλεξης αποτελεί σημαντική παράμετρο για λόγους ασφαλείας, ιδίως κατά την αποθήκευση και μεταφορά πτητικών προϊόντων αργού πετρελαίου σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος γύρω από μια δεξαμενή αποθήκευσης πρέπει να είναι πάντοτε μικρότερη από το σημείο ανάφλεξης του καυσίμου, ώστε να αποφεύγεται η πιθανότητα ανάφλεξης. Το σημείο ανάφλεξης χρησιμοποιείται ως ένδειξη της πιθανότητας εκδήλωσης πυρκαγιάς και έκρηξης ενός προϊόντος πετρελαίου (μέθοδος Pensky Martens, ASTM D93). Υπάρχει μια άλλη μέθοδος μέτρησης του σημείου ανάφλεξης γνωστή ως μέθοδος ανοιχτού δοχείου για έλαια με σημείο ανάφλεξης μεγαλύτερο από 80 °C (μέθοδος Cleveland, ASTM D92). Το σημείο ανάφλεξης δεν πρέπει να συγχέεται με το σημείο καύσης, το οποίο ορίζεται ως η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία ο υδρογονάνθρακας θα συνεχίσει να καίγεται για τουλάχιστον 5 δευτερόλεπτα μετά την ανάφλεξή του από φλόγα.¹⁵

3.3. Μονωτικά Υλικά Μετασχηματιστών – Σχηματισμός Αερίων

Η μόνωση των μετασχηματιστών ισχύος αποτελείται συνήθως από στερεή και υγρή μόνωση. Η στερεή μόνωση κατασκευάζεται από χαρτί Kraft, χαρτί manila και χαρτόνι. Σε ορισμένους τύπους μετασχηματιστών ισχύος, όπως οι ανεμογεννήτριες ή οι ηλιακά συστήματα, χρησιμοποιούνται φυσικοί εστέρες, ωστόσο, τα ορυκτέλαια εξακολουθούν να είναι μακράν τα έλαια που χρησιμοποιούνται ευρύτερα. Εργαστηριακές μελέτες έχουν δείξει ότι τα έλαια αυτά, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, παρουσιάζουν το σχηματισμό αέριων υδρογονανθράκων χαμηλού μοριακού βάρους, καθώς και μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Ο σχηματισμός αυτός είναι συνεχής σε χαμηλό όγκο κατά τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού ωστόσο, σε βλάβες ή άλλες μη φυσιολογικές συνθήκες, μπορεί να παρατηρηθεί ανισορροπία στο σχηματισμό και αύξηση της ποσότητας αυτών των αερίων. Τα θερμά σημεία με θερμοκρασίες άνω των 300 °C οδηγούν κατά κύριο λόγο στο σχηματισμό ακόρεστων υδρογονανθράκων. Επιπλέον, εάν υπερθερμανθεί και το κυτταρινούχο υλικό

¹⁴ C. C. Claiborne, H. A. Pearce: "Transformer Fluids", IEEE Electrical Insulation Magazine, 5, (1989), pp. 16-19, doi: 10.1109/57.35599

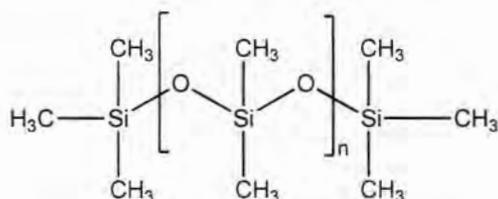
¹⁵ D.S.J. "Stan" Jones, P.R. Pujado (Editors): Handbook of Petroleum Processing, Springer, Dordrecht, 2006, ISBN-13 978-1-4020-2820-5

(χαρτί), παρατηρείται επίσης ο σχηματισμός μη φυσιολογικών συγκεντρώσεων CO και CO₂.¹⁶ Η ανάλυση των διαλυμένων αερίων (DGA) σε μετασχηματιστές ισχύος καταγράφεται ως ανάλυση του σχηματισμού αερίων υδρογονανθράκων και η πρώτη μελέτη σχετικά με το θέμα αυτό δημοσιεύθηκε τον Φεβρουάριο του 1919 στο περιοδικό "The Electric Journal". Στη μελέτη αυτή αναφέρθηκαν οι πρώτες παρατηρήσεις σχετικά με το πρότυπο σχηματισμού των αερίων και τα αέρια που σχηματίστηκαν αποτελούνταν από CO₂ (1,17%), βαρείς υδρογονάνθρακες (4,86%), O₂ (1,36%), CO (19,21%), H₂ (59,10%), N₂ (10,10%) και CH₄ (4,2%). Ο συγγραφέας υπογράμμισε το υψηλό ποσοστό του H₂ και την επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη και την ποσότητα των διαλυμένων αερίων. Το 1928, με βάση τη γνώση του προβλήματος, αναπτύχθηκε ο μηχανισμός αντιμετώπισης του σχηματισμού αερίων σε περίπτωση βλάβης του εξοπλισμού, το ρελέ Buchholz.¹⁷

Η ύπαρξη του προβλήματος του σχηματισμού αερίων στα έλαια μετασχηματιστών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου της ποιότητας και της καταλληλότητάς τους να παραμείνουν σε λειτουργία ή να αντικατασταθούν. Χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις απεικόνισης των αναλογιών συγκεκριμένων συστατικών όπως το τρίγωνο και το πεντάγωνο Duvall, το πεντάγωνο Mansour και το επτάγωνο DGA.^{18,19}

3.4. Έλαια Σιλικόνης

Τα έλαια σιλικόνης που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές είναι υγρά πολυδιμεθυλοσιλοξάνια, τα οποία διαφέρουν σημαντικά στη σύνθεση από τα ορυκτέλαια των μετασχηματιστών. Το Σχήμα 3.1 δείχνει μια τυπική χημική δομή. Αν και πολλά από τα αέρια που παράγονται υπό θερμική και ηλεκτρική καταπόνηση είναι τα ίδια για τα ορυκτέλαια και τα έλαια σιλικόνης, υπάρχουν διαφορές στις αναλογίες αυτών των αερίων.²⁰ Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι τυπικές συγκεντρώσεις αερίων στις διάφορες συνθήκες, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν αέρια λόγω σφάλματος σε μετασχηματιστές με έλαιο σιλικόνης. Έτσι, θα πρέπει να αναμένονται διαφορετικές συγκεντρώσεις αυτών των αερίων στο έλαιο σιλικόνης από ό,τι στο ορυκτέλαιο.



Σχήμα 3.1. Χημικός τύπος πολυδιμεθυλοσιλοξανίου

3.5. Αιτίες Σχηματισμού Αερίων σε Μετασχηματιστές

Οι δύο κύριες αιτίες σχηματισμού αερίων σε έναν μετασχηματιστή σε λειτουργία είναι οι θερμικές και οι ηλεκτρικές καταπονήσεις. Οι ασυνήθιστα υψηλές θερμοκρασίες του αγωγού

¹⁶ Bernd Christian, Armin Gläser: "The behavior of different transformer oils relating to the generation of fault gases after electrical flashovers", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **84**, (2017), pp. 261-266, doi:10.1016/j.ijepes.2016.06.007

¹⁷ Alcebiádes Rangel Bessa, Jussara Farias Fardin, Patrick Marques Ciarelli and Lucas Frizera Encarnação: "Conventional Dissolved Gases Analysis in Power Transformers: Review", *Energies*, **16**, (2023), 7219, doi:10.3390/en16217219

¹⁸ Michel Duval: "The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **24**, 6, (2008), pp. 22-29, doi:10.1109/MEI.2008.4665347

¹⁹ Osama E. Gouda, Salah H. El-Hoshy, Hassan H. El-Tamaly: "Proposed heptagon graph for DGA interpretation of oil transformers", *IET Generation, Transmission & Distribution*, **12**, 2, (2018), pp. 490-498, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.0826

²⁰ C. Schütt, I. Atanasova-Höhlein: "Solubility Coefficients and Their Importance for the Analysis of Dissolved Gases in Insulating Liquids", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **38**, (2021) pp. 24-29, doi:10.1109/MEI.2022.9648266

παράγουν αέρια από τη θερμική αποσύνθεση του ελαίου σιλικόνης και του στερεού (κυταρινούχου) μονωτικού. Αέρια παράγονται επίσης από την αποσύνθεση του ελαίου σιλικόνης και του στερεού μονωτικού που εκτίθενται σε δραστηριότητα μερικής εκκένωσης και στις υψηλές θερμοκρασίες που σχετίζονται με ηλεκτρικό τόξο.

Πίνακας 3.1. Συντελεστές διαλυτότητας Ostwald για έλαια σιλικόνης και ορυκτέλαια

	Έλαιο Σιλικόνης	Ορυκτέλαιο
Υδρογόνο (H ₂)	0,057	0,0429
Άζωτο (N ₂)	0,143	0,0745
Μονοξείδιο Άνθρακα (CO)	0,096	0,102
Οξυγόνο (O ₂)	0,175	0,138
Μεθάνιο (CH ₄)	0,514	0,337
Διοξείδιο Άνθρακα (CO ₂)	1,401	0,900
Ακετυλένιο (C ₂ H ₂)	⁽¹⁾	0,938
Αιθυλένιο (C ₂ H ₄)	⁽¹⁾	1,35
Αιθάνιο (C ₂ H ₆)	⁽¹⁾	1,99

⁽¹⁾ Δεν έχει προσδιοριστεί πειραματικά

3.5.1. Θερμική Αποσύνθεση του Ελαίου

Η υπερθέρμανση του ελαίου σιλικόνης έχει ως αποτέλεσμα τη μερική αποσύνθεση του ρευστού και την παραγωγή αερίων χαμηλού μοριακού βάρους. Η σύνθεση των αερίων εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε διαλυμένο οξυγόνο στο έλαιο σιλικόνης, την εγγύτητα του γυμνού χαλκού και τη θερμοκρασία. Καθώς η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου αυξάνεται, η παραγωγή μεθανίου (CH₄) μειώνεται και παράγονται επίσης μικρές ποσότητες υδρογόνου (H₂), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και αιθυλενίου (C₂H₄). Εάν το έλαιο σιλικόνης περιέχει υψηλή συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, παράγονται μεγάλες ποσότητες τόσο μονοξειδίου του άνθρακα όσο και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Στα δευτερεύοντα συστατικά περιλαμβάνονται το μεθάνιο και το αιθυλένιο. Το έλαιο σιλικόνης εν λειτουργία περιέχει συνήθως διαλυμένο οξυγόνο. Παρόλο που υπάρχει διαλυμένο οξυγόνο, η υπερθέρμανση των ελαίων σιλικόνης παρουσία γυμνού χαλκού έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή κυρίως μεθανίου.

3.5.2. Χημική Αποσύνθεση του Ελαίου

Η χημική αποσύνθεση του ελαίου σιλικόνης έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό αερίων, συμπυκνώσιμου υλικού και στερεού ιζήματος. Με βάση τις συνθήκες των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, η ένταση μιας εκκένωσης περιγράφεται ως ήπια στην περίπτωση μεγέθους 10⁻⁸ Cb ανά εκκένωση και ως ισχυρή στην περίπτωση 10⁻⁵ Cb ανά εκκένωση. Οι μερικές εκκενώσεις AC θεωρούνται επίσης ήπιες. Το μέσο ύψος παλμού, όπως προσδιορίστηκε με τον ανιχνευτή PD, ήταν περίπου 10⁻⁹ Cb.

Η ποσότητα του συμπυκνώματος μειώθηκε με την αύξηση της έντασης της εκκένωσης και οι διαφορές λόγω της μοριακής σύνθεσης του ελαίου εξαφανίστηκαν σε υψηλότερες εντάσεις εκκένωσης. Παράλληλα, η εμφάνιση του ελαίου άλλαξε από ένα άχρωμο ίζημα που παρατηρείται μετά από ήπιες εκκενώσεις (μερική εκκένωση) σε ένα γκριζο έως μαύρο ίζημα μετά από ισχυρές εκκενώσεις. Αν συσχετιστεί ο αριθμός των μορίων αερίου που παράγονται ανά μονάδα φορτίου, διαπιστώνεται ότι κάθε στοιχειώδες φορτίο που διέρχεται από την εκκένωση παράγει περίπου 2000 μόρια αερίου. Υποθέτοντας μια ενέργεια 5 - 10 eV απαραίτητη για τον ιονισμό ενός μορίου ή τη διάσπαση ενός δεσμού προκύπτει μια συνολική απώλεια ενέργειας 10-20 keV ανά φορτίο, η οποία είναι της τάξης μεγέθους της εφαρμοζόμενης τάσης.

Παρατηρήθηκε ότι η σύσταση του αερίου καθορίζεται από την ένταση της εκκένωσης. Το αέριο που παράγεται με μερική εκκένωση χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο ποσοστό

υδρογόνου και ακετυλενίου σε σύγκριση με το αέριο που παράγεται με πλήρεις εκκενώσεις. Από την άλλη πλευρά, οι μερικές εκκενώσεις παρήγαγαν περισσότερο μεθάνιο και αιθάνιο. Το ίδιο ισχύει και αν συγκριθούν οι συνθέσεις των αερίων μετά από ήπια και ισχυρή εκκένωση DC.

Για την ερμηνεία αυτών των αποτελεσμάτων έγινε η υπόθεση ότι οι χημικές αντιδράσεις εξελίσσονται μέσω δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο παράγεται πλάσμα από την ηλεκτρική εκκένωση. Συμβαίνει αποσύνθεση των μορίων του ελαίου και στο τέλος της εκκένωσης υπάρχει μια ορισμένη συγκέντρωση διαφόρων ιόντων, ριζών και ατόμων. Το δεύτερο στάδιο λαμβάνει χώρα μετά τον τερματισμό της ροής ρεύματος. Η θερμοκρασία στο κανάλι εκκένωσης μειώνεται γρήγορα και οι ρίζες, τα άτομα και τα ιόντα αρχίζουν να αντιδρούν μεταξύ τους και με τα μόρια του ελαίου. Σε μια ισχυρή εκκένωση όχι μόνο επιτυγχάνεται υψηλότερη θερμοκρασία, αλλά και η τοπική συγκέντρωση ριζών και ιόντων είναι επίσης υψηλότερη λόγω της υψηλότερης ροής ενεργειακών φορτίων. Το αποτέλεσμα είναι η πληρέστερη αποσύνθεση των μορίων στο κανάλι της εκκένωσης και τελικά ο σχηματισμός υδρογόνου αφενός και ακετυλενίου αφετέρου στο δεύτερο στάδιο. Σε μια μερική εκκένωση η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη και σχηματίζονται περισσότερες ρίζες μεθυλίου (CH_3), οι οποίες τελικά δίνουν μεθάνιο ή σε συνδυασμό δίνουν αιθάνιο.

Η χημική δομή του ελαίου επηρεάζει ελάχιστα τη σύνθεση του αερίου. Υπάρχει, ωστόσο, αξιοσημείωτη επίδραση του ιξώδους του ελαίου στη σύνθεση του αερίου. Η ποσότητα υδρογόνου και ακετυλενίου αυξάνεται με την αύξηση του ιξώδους, ενώ η μετατροπή προς μεθάνιο και αιθάνιο γίνεται μικρότερη.

Αυτή είναι η ίδια τάση που παρατηρείται με την αύξηση της έντασης της εκκένωσης. Ως εξήγηση υποτέθηκε ότι στο έλαιο υψηλότερου ιξώδους παρεμποδίζεται η διαστολή του καναλιού διάθεσης φορτίου, περιορίζοντας έτσι την ενέργεια σε μικρότερο όγκο με αποτέλεσμα την ισχυρότερη αποσύνθεση του υλικού. Όσον αφορά την επίδραση του ιξώδους του ελαίου, διαπιστώθηκε ότι για την ίδια ένταση εκκένωσης με τη μείωση του ιξώδους οι αναλογίες αερίων μετατοπίζονται προς την περιοχή της ηπιότερης εκκένωσης. Αντίθετα, με την αύξηση του ιξώδους η μετατόπιση γίνεται προς μια περιοχή ακόμη σκληρότερων συνθηκών εκκένωσης.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αποσύνθεσης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Υπάρχει μικρή επίδραση της μοριακής δομής στην αποσύνθεση του ελαίου υπό συνθήκες μερικής και πλήρους εκφόρτισης.
2. Αν και το υδρογόνο είναι το κύριο αέριο προϊόν, υπάρχει σαφής επίδραση της έντασης της εκκένωσης (που δίνεται από την ποσότητα του φορτίου που διέρχεται από το υγρό) στη δημιουργία μεθανίου, αιθανίου, αιθυλενίου και ακετυλενίου. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι η συγκέντρωση του ακετυλενίου είναι ένας δείκτης για την ένταση της εκκένωσης.
3. Η σύγκριση της σύστασης του αερίου που λαμβάνεται σε έλαια διαφορετικού ιξώδους δείχνει ότι υπό συγκρίσιμες εντάσεις φορτίου διάσπασης η αύξηση του ιξώδους έχει το ίδιο αποτέλεσμα με την αύξηση της έντασης της εκκένωσης.²¹

3.5.3. Θερμική Αποσύνθεση Κυτταρινούχου Υλικού

Η υπερθέρμανση της κυτταρινούχου μόνωσης σε έναν μετασχηματιστή με έλαιο σιλικόνης έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή τόσο μονοξειδίου του άνθρακα όσο και διοξειδίου του άνθρακα. Ο λόγος του μονοξειδίου του άνθρακα προς το διοξείδιο του άνθρακα εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Αέριοι υδρογονάνθρακες δεν παράγονται συνήθως σε σημαντικές ποσότητες μόνο από την κυτταρινούχο μόνωση και, επομένως, η απουσία αυτών των αερίων

²¹ J.G. Rabe, W.F. Schmidt, W. Klein: "Physico-Chemical Investigation of the Behavior of Silicone Oils Under the Influence of High Voltage Stress", *Journal of Electrostatics*, **7**, (1979), pp. 253-266, doi:10.1016/0304-3886(79)90078-0

μπορεί να βοηθήσει στη διάκριση μεταξύ της υπερθέρμανσης του ελαίου σιλικόνης και της υπερθέρμανσης της κυτταρινούχου μόνωσης.

Τα προϊόντα αποικοδόμησης της κυτταρίνης, όπως η 2-φουρφουραλδεΐδη και άλλα παράγωγα φουρανίου, τα οποία είναι διαλυτά στο έλαιο σιλικόνης, μπορούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την αποσύνθεση της κυτταρίνης. Η ανάλυση αυτή μπορεί να καθορίσει πότε η στερεή ή η ρευστή μόνωση, ή και τα δύο, έχουν υποστεί υπερθέρμανση.

3.5.4. Αποσύνθεση λόγω Μερικής Εκφόρτισης

Το υδρογόνο και το μεθάνιο είναι τα κυρίαρχα αέρια που παράγονται από τις μερικές εκκενώσεις σε έναν μετασχηματιστή με έλαιο σιλικόνης. Μπορούν επίσης να παραχθούν μικρές ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα, ακετυλενίου και αιθανίου.

3.5.5. Διάσπαση από Ηλεκτρικό Τόξο

Τα κυριότερα αέρια που παράγονται κατά την ηλεκτρική εκκένωση (τόξο) σε μετασχηματιστή εμβαπτισμένο σε έλαιο σιλικόνης είναι υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα και μικρές ποσότητες ακετυλενίου. Τα αέρια που παράγονται από το έλαιο σιλικόνης περιέχουν πολύ μεγαλύτερη αναλογία υδρογόνου προς ακετυλένιο σε σύγκριση με τα αέρια που παράγονται από έναν μετασχηματιστή γεμάτο ορυκτέλαιο. Με βάση τις τιμές συντελεστών κατανομής αερίων μεταξύ αέριας και υγρής φάσης, φαίνεται ότι η διαλυτότητα υδρογόνου και μεθανίου είναι υψηλότερη στα έλαια σιλικόνης σε σχέση με τα ορυκτέλαια (Πίνακας 3.1). Αυτό σημαίνει ότι σε ένα έλαιο σιλικόνης υπάρχουν διαλυμένες μεγαλύτερες ποσότητες αυτών των αερίων σε σχέση με τα ορυκτέλαια. Η παρουσία οποιασδήποτε ποσότητας ακετυλενίου σε έναν μετασχηματιστή με έλαιο σιλικόνης μπορεί να αποτελεί ένδειξη ενός δυνητικά σοβαρού προβλήματος.²² Υπάρχουν αρκετές δημοσιευμένες εργασίες οι οποίες αναφέρονται σε αυτό το θέμα. Σε αρκετές από αυτές πραγματοποιείται ανάλυση για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των αερίων στο έλαιο του μετασχηματιστή. Ο κύριος λόγος για τον οποίο πραγματοποιείται αυτή η ανάλυση είναι για τον έλεγχο της κατάστασης του μετασχηματιστή, και μπορεί να λειτουργήσει ως μια διαδικασία πρόβλεψης (και πρόληψης) πιθανής αποτυχίας του μετασχηματιστή. Εξαιρουμένου του διοξειδίου του άνθρακα, όλα τα υπόλοιπα αέρια που ανιχνεύονται από την αποσύνθεση και τη διάσπαση των ελαίων (και των ελαίων σιλικόνης είναι αναφλέξιμα.

Όσον αφορά την ποσότητα των παραγόμενων αερίων κατά τη διάρκεια της εφαρμογής ηλεκτρικού τόξου, αυτή εκτιμήθηκε σε 0,05 – 0,08 l/kW·s, που αντιστοιχεί σε 0,16 – 0,45 l/kW·s (κανονική πίεση, θερμοκρασία 2.000 K). Επίσης, παρατηρήθηκαν βλάβες από τήγμα στις άκρες των ηλεκτροδίων από ανοξείδωτο χάλυβα, από τις οποίες συνάγεται ότι η μέση θερμοκρασία του αερίου κατά τη διάρκεια του τόξου ήταν στην πραγματικότητα στο σημείο τήξης ή υψηλότερη από αυτό. Επίσης, παρατηρήθηκαν ζημιές από τήγμα στις άκρες των ηλεκτροδίων από ανοξείδωτο χάλυβα, από τις οποίες συνήχθη ότι η μέση θερμοκρασία του αερίου κατά τη διάρκεια του τόξου ήταν στην πραγματικότητα στο σημείο τήξης του ανοξείδωτου χάλυβα, (1.700 K), ή υψηλότερη από αυτή. Αναφορικά με τη σύσταση των παραγόμενων αερίων, το κύριο συστατικό ήταν το υδρογόνο, και στη συνέχεια το μεθάνιο και το ακετυλένιο.²³

Αναφορικά με τον υπολογισμό της ποσότητας του παραγόμενου αερίου, στοιχεία υπολογισμού βρέθηκαν σε μία μόνο εργασία, στην οποία αναφέρεται πως λαμβάνοντας υπόψη τον διαχωρισμό των επαφών ανοίγματος, άρα και το κατά προσέγγιση μήκος τόξου, η ισχύς του τόξου μπορεί να προκύψει από την υπολογιζόμενη κλίση 45 έως 48 kV/m. Με 40 kJ

²² IEEE Std C57.146-2005, IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Silicone-Immersed Transformers, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, 2005, ISBN 0-7381-4831-8

²³ Hideyuki Miyahara, Akira Yamagishi, Hiroyuki Sarnpei, Yukiyasu Shirasaka: "Recent Trends of Low-viscosity Silicone Liquid Immersed Transformers", IEEE 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, July 19-23, 2009, Harbin, China, pp. 212-215, doi:10.1109/ICPADM.2009.5252470

ανά λίτρο ιονισμένου αερίου, σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (STP), μπορεί έτσι να εκτιμηθεί ο ρυθμός παραγωγής εκρηκτικού αερίου (όπως το αναφέρει ο συντάκτης της εργασίας).²⁴ Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με έλαιο σιλικόνης 100 cSt, και από την ανάλυση της σύστασης του αερίου βρέθηκε κατά κύριο λόγο υδρογόνο (78,1%) και ελαφροί υδρογονάνθρακες (μεθάνιο 9,7%, ακετυλένιο 3,5%, αιθυλένιο 2,0%, αιθάνιο 0,9%). Το μονοξειδίο του άνθρακα ήταν 5,7% και το διοξειδίο του άνθρακα 0,1%. Σε συγκριτική μελέτη σχετικά με την ποσότητα του παραγόμενου αερίου από έλαια σιλικόνης και ορυκτέλαιο, ο όγκος των αερίων ήταν συγκρίσιμος, και υπό τις συνθήκες της δοκιμής (σύστημα μετασχηματιστή διανομής 25 kVA, με τάση 0 – 13,8 kV προς αυτομετασχηματιστή 0 – 120 V με διάκενο ηλεκτροδίου 0,020" (0,508 mm), θερμοκρασία 25 °C), ο παραγόμενος όγκος αερίου για το ορυκτέλαιο μετρήθηκε 375 ml/h και για το έλαιο σιλικόνης 50 cSt 350 ml/h.²⁵ Σημειώνεται πως σε καμία από τις εργασίες αυτές δε γίνεται αναφορά στο σημείο ανάφλεξης του χρησιμοποιημένου ελαίου του μετασχηματιστή.^{26,27,28,29,30,31} Στις περισσότερες από αυτές τις εργασίες γίνεται επίσης αναφορά πως από τα αέρια που μετρήθηκαν, αυτό που βρέθηκε σε υψηλότερες συγκεντρώσεις ήταν το υδρογόνο. Σε αρκετές δε περιπτώσεις η συγκέντρωση των ελαφρών υδρογονανθράκων εκφράζεται ως λόγος ως προς τη συγκέντρωση υδρογόνου. Γενικά, το επίπεδο υδρογόνου και μεθανίου για τα ορυκτέλαια είναι υψηλότερο από το έλαιο σιλικόνης, αλλά το επίπεδο μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα είναι χαμηλότερο. Επίσης, το επίπεδο αιθανίου, αιθυλενίου και ακετυλενίου είναι χαμηλό στο και στις δύο περιπτώσεις. Το κατώτατο επίπεδο διαλυμένων αερίων των ορυκτελαίων και των ελαίων σιλικόνης παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2.³²

3.6. Αναφλεξιμότητα Ελαίων Σιλικόνης

Τα έλαια σιλικόνης θεωρούνται ως δύσφλεκτα, καθώς στην αρχική τους κατάσταση εμφανίζουν πολύ υψηλά σημεία ανάφλεξης και πολύ υψηλά σημεία καύσης. Οι ενώσεις αυτές θεωρούνται αναφλέξιμες, αλλά δεν έχουν πραγματικά σημεία καύσης. Η καύση μπορεί να διατηρηθεί εάν η θερμότητα που παρέχεται στην ένωση είναι επαρκής για να προκαλέσει αποπολυμερισμό ή αποσύνθεση. Έτσι, μόνο τα πολυμερή μικρής αλυσίδας καίγονται πραγματικά.³³

²⁴ Herbert F. Vogel: "Some Considerations on Silicone Oil in High-Current and Energy-Disconnecting Mechanisms", LA-10035-MSUC-20, Los Alamos, March 1984, <https://inis.iaea.org/records/9e1ck-0t627>

²⁵ R.F. Burow, G.A. Vincent, W.T. Brooks: "Methods for Evaluating New Dielectric Liquids for Use in High Voltage Electrical Equipment", IEEE 1973 Electrical Insulation Conference, Chicago, 30 September 1973 - 04 October 1973, doi: 10.1109/EIC.1973.7468674

²⁶ Fuhimiro Endo, Shinpei Yamamoto, Takayuki Sadakane, Akira Yamagishi, Katsunori Miyagi, Hitoshi Okubo: "Analysis of Gasses Generated by Electrical Discharges in Low Viscosity Silicone Oil", IEEE 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008, doi:10.1109/CMD.2008.4580279

²⁷ Suwarno Harjo, Ishak Nasution: "Effects of electric arc on the dielectric properties, partial discharge patterns and dissolved gases in silicone oil", International Conference on Electrical Engineering and Informatics, ICEEI 2011, Bandung, Indonesia, 17-19 July 2011, doi:10.1109/ICEEI.2011.6021535

²⁸ Ruobing Zhang, Zhichun Qiu, Jun Wu, Xin Li, Shanshan Wang: "Study on Gaseous Products in the Aging Process of Silicone Oil in Cable Terminals", 2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena – Cancun – Mexico, 21-24 October 2018, doi:10.1109/CEIDP.2018.8544876

²⁹ Ian L. Hosier Alun. S. Vaughan, Oliver Cwikowski: "Electrical aging of silicone oil", 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Knoxville, Tennessee, USA, 22 June-3 July 2020, doi:10.1109/EIC47619.2020.9158574

³⁰ W. J. Chatterton and J. L. Goudie, "An update on silicone transformer fluid: Specification, manufacturing, maintenance and end of life options", 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA USA, April 2-5, 2000, pp. 412-416, doi:10.1109/ELINSL.2000.845537

³¹ A.J. Amalanathan, R. Sarathi, M. Zdanowski, R. Vinu, Z. Nadolny: "Review on Gassing Tendency of Different Insulating Fluids towards Transformer Applications", *Energies*, **16**, (2023), 488. doi:10.3390/en16010488

³² Jong-Fil Moon, Jae-Chul Kim, Tae-Hoon Im: "Expert System for Diagnosing Silicone Oil-Filled Transformers", *IFAC Proceedings Volumes*, **36**, 20, September 2003, pp. 905-909, doi:10.1016/S1474-6670(17)34588-3

³³ D.B. Miller, V.E. Bower, M.M. Birky, C.M. Huggett, A.Macek: "An Appraisal of Tests and Standards for the Evaluation of Electrical Insulating Fluids", NBSIR 76-1054 Final Report, 1976,

Πίνακας 3.2. Κατώφλι συγκέντρωσης διαλυμένων αερίων (ppm) για ορυκτέλαια και έλαια σιλικόνης

Αέριο	Ορυκτέλαιο	Έλαιο Σιλικόνης
Υδρογόνο (H ₂)	1800	200
Μεθάνιο (CH ₄)	1000	100
Αιθάνιο (C ₂ H ₆)	150	30
Αιθυλένιο (C ₂ H ₄)	200	30
Ακετυλένιο (C ₂ H ₂)	80	1
Μονοξείδιο Άνθρακα (CO)	1400	3000
Διοξείδιο Άνθρακα (CO ₂)	10000	30000

Για την αξιολόγηση της καύσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος θερμιδομέτρου κώνου του σύμφωνα με τη μέθοδο IEC60695-8-3. Σύμφωνα με τη μέθοδο, τα δείγματα θερμαίνονται με κωνικό θερμαντήρα μεταφοράς θερμότητας στην πειραματική διάταξη της μεθόδου και η ανάφλεξη προκαλείται με την εφαρμογή σπινθήρα στους παραγόμενους ατμούς. Μελετήθηκαν οι μεταβολές στην ποσότητα του δείγματος, στην προσδιδόμενη θερμότητα, την ποσότητα των εκλυόμενων αερίων, του βάρους και των αερίων προϊόντων καύσης με την πάροδο του χρόνου, και ο ρυθμός απώλειας βάρους κατά την καύση κάθε δείγματος όταν επιβλήθηκε ένα συγκεκριμένο φορτίο θερμικής ακτινοβολίας για τον προσδιορισμό της ροής θερμότητας. Τα δείγματα μονωτικού υγρού ήταν έλαια σιλικόνης κινηματικού ιξώδους 20 cSt και 50 cSt που αντιστοιχούν στα μονωτικά υγρά υψηλού σημείου ανάφλεξης του προτύπου IEC-60076-14. Συγκρίθηκαν με δύο άλλα πυράντοχα μονωτικά υγρά - συνθετικός εστέρας και φυσικός εστέρας - και με το συμβατικά χρησιμοποιούμενο ορυκτέλαιο.

Όσον αφορά τον μέγιστο ρυθμό παραγωγής καπνού, η κατάταξη από αυτή τη δοκιμή ήταν: ορυκτέλαιο > φυσικός εστέρας > έλαιο σιλικόνης 20 cSt > έλαιο σιλικόνης 50 cSt > συνθετικός εστέρας. Τα έλαια σιλικόνης έχουν χαμηλό μέγιστο ρυθμό παραγωγής καπνού σε σύγκριση με τα άλλα μονωτικά υγρά. Η καύση του ελαίου σιλικόνης είναι μικρότερης έκτασης από τα άλλα έλαια επειδή ένα στρώμα υπολειμματικού διοξειδίου του πυριτίου που σχηματίζεται από την καύση καλύπτει την επιφάνεια του ελαίου σιλικόνης και διακόπτει την παροχή οξυγόνου στο υγρό σιλικόνης κάτω από τη φλόγα. Ωστόσο, αυτές οι ιδιότητες μπορεί να είναι λιγότερο σημαντικές όταν το έλαιο διαρρέει πάνω σε κατακόρυφη επιφάνεια, η οποία θα διέλυε το στρώμα διοξειδίου του πυριτίου. Όσον αφορά το μέγιστο ρυθμό έκλυσης θερμότητας, η κατάταξη ήταν: ορυκτέλαιο > φυσικός εστέρας > συνθετικός εστέρας > έλαιο σιλικόνης 20 cSt > έλαιο σιλικόνης 50 cSt.^{34,35}

3.7. Θερμική Αποικοδόμηση των Πολυδιμεθυλοσιλοξανίων

3.7.1. Αποπολυμερισμός

Στη βιβλιογραφία υπάρχει μεγάλος αριθμός εργασιών που έχουν ασχοληθεί με το θέμα της αποικοδόμησης των πολυδιμεθυλοσιλοξανίων. Από τις εργασίες αυτές έχει διαπιστωθεί ότι οι διαφορές στη συμπεριφορά αποικοδόμησης των πολυσιλοξανίων οφείλονται σε δύο κύριους παράγοντες: (i) τον τύπο και τη συγκέντρωση των ακραίων ομάδων του πολυμερούς και (ii) την παρουσία καταλυτικών ποσοτήτων προσμίξεων στο πολυμερές. Κύρια προϊόντα

<https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-431cc2195dd1d9739ab785a9cb8fd279/pdf/GOVPUB-C13-431cc2195dd1d9739ab785a9cb8fd279.pdf>

³⁴ CIGRE Working Group A2.33. Guide for Transformer Fire Safety Practices; CIGRE Technical Brochure TB 537: Paris, France, 2013, https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Guide_for_Transformer_Fire_Safety_Practices.pdf

³⁵ Kuniko Suzuki, Osami Sugawa, Akira Yamagishi, Katsunori Miyagi, Kyoko Kamiya: "Experimental Study on Ignition and Combustion Behaviors of Insulation Fluids for Transformer using Cone Calorimeter", *IEEE Transactions on Power and Energy*, 127, (2007), pp. 797-802, doi:10.1541/ieejpes.127.797



των αντιδράσεων θερμικής αποικοδόμησης είναι κυκλικά διμεθυλοσιλοξάνια.^{36,37} Η διαδικασία αποπολυμερισμού είναι, επομένως, ένας συνδυασμός τριών διαφορετικών μηχανισμών αντίδρασης, οι οποίοι ονομάζονται μηχανισμοί "αποσυμπίεσης", "τυχαίας διάσπασης" και "εξωτερικά καταλυόμενοι". Για τα έλαια σιλικόνης που οι ακραίες ομάδες είναι αδρανείς (μεθύλια), ο κύριος μηχανισμός θερμικής διάσπασης είναι αυτός της τυχαίας διάσπασης.

3.7.2. Αντίδραση Τυχαίας Διάσπασης

Τα πολυδιμεθυλοσιλοξάνια με αδρανείς ομάδες ως άκρα αποικοδομούνται είτε με αντιδράσεις δια- ή ενδομοριακής ανακατανομής που συμβαίνουν τυχαία μεταξύ των δεσμών σιλοξανίων της πολυμερικής ραχοκοκαλιάς. Ο μηχανισμός θερμικής αποικοδόμησης του πολυδιμεθυλοσιλοξανίου οδηγεί στο σχηματισμό του μικρότερου κυκλικού προϊόντος, του εξαμεθυλοκυκλοτρισιλοξανίου. Η τυχαία διάσπαση απαιτεί επαρκή ευκαμψία των τμημάτων της πολυμερικής αλυσίδας, υψηλή πολικότητα των δεσμών σιλοξανίου και υψηλότερη θερμοδυναμική σταθερότητα των προϊόντων αποικοδόμησης από εκείνη των αρχικών (δηλαδή μακρομόρια ανοικτής αλυσίδας). Η αντίδραση αυτή είναι πάντα δυνατή όταν τα πολυμερή εκτίθενται σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες. Σε σαφή αντίθεση με την αποκόλληση, ο μηχανισμός τυχαίας διάσπασης οδηγεί σε δραματική μείωση του μοριακού βάρους του πολυμερούς από την αρχή της αποικοδόμησης και σε ταυτόχρονη διεύρυνση της κατανομής του μοριακού βάρους. Και τα δύο αποτελέσματα αποδίδονται στην πιο πιθανή θέση για την εμφάνιση της τυχαίας διάσπασης προς το μέσο της πολυμερικής αλυσίδας. Η μεταβατική κατάσταση μπορεί να σχηματιστεί σε οποιοδήποτε σημείο της πολυμερικής αλυσίδας και η διάσπαση των αλυσίδων του πολυδιμεθυλοσιλοξανίου προχωρεί έως ότου η εναπομένουσα γραμμική δομή είναι πολύ μικρή για να σχηματίσει νέους κύκλους ή/και η εξάτμιση των θραυσμάτων της βραχυκυκλωμένης αλυσίδας ανταγωνίζεται ευνοϊκά την κυκλοποίηση.³⁸ Η σχηματική απεικόνιση της διάσπασης των πολυδιμεθυλοσιλοξανίων προς σχηματισμό κυκλικών δομών απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2. Η θερμική οξειδωση του PDMS καταλύει την αποσύνθεση σε κυκλικά ολιγομερή που συμβαίνει σε χαμηλότερη θερμοκρασία σε περιβάλλον αέρα από ό,τι σε περιβάλλον άζωτου. Αυτή η διαδικασία ανταγωνίζεται την οξειδωτική διασταύρωση που σταθεροποιεί το υλικό. Περαιτέρω αποσύνθεση σε κυκλικά ολιγομερή συμβαίνει πάνω από 400 ° C όπως σε άζωτο, το οποίο ωστόσο επιταχύνεται από ανταγωνιστική οξειδωση. Σε υψηλό ρυθμό θέρμανσης (π.χ. 100 °C/min), η θερμική αποσύνθεση σε άζωτο και σε αέρα τείνει να επικαλύπτεται, επειδή ο ρυθμός αντίδρασης μεταξύ του υλικού και του οξυγόνου μειώνεται σημαντικά από τη χαμηλή διαλυτότητα οξυγόνου και τον υψηλό ρυθμό θερμικής υποβάθμισης.³⁹

3.7.3. Κυκλικά Διμεθυλοσιλοξάνια

Όπως έχει αναφερθεί, τα έλαια σιλικόνης είναι πολυμερή υλικά που έχουν μοριακή δομή που περιέχει τον δεσμό $-Si-C-$, σιλοξάνιο, με ομάδες μεθυλίου CH_3 . Σε γενικές γραμμές, τα χαμηλού μοριακού βάρους κυκλικά ολιγομερή σιλοξανίων (κυκλικά διμεθυλοσιλοξάνια) μπορούν να παραχθούν όταν το έλαιο σιλικόνης $[-Si-(CH_3)_2-O-]$, αποσυντίθεται θερμικά. Μεταξύ των κυκλικών διμεθυλοσιλοξανίων όπως τα D3, D4 και D5, ειδικά τα D3 και D4 έχουν

³⁶ T. Howard Thomas, T. C. Kendrick: "Thermal Analysis of Polydimethylsiloxanes. I. Thermal Degradation in Controlled Atmospheres", *Journal of Polymer Science: Part A-2*, **7**, (1969), pp. 537-549, doi:10.1002/pol.1969.160070308

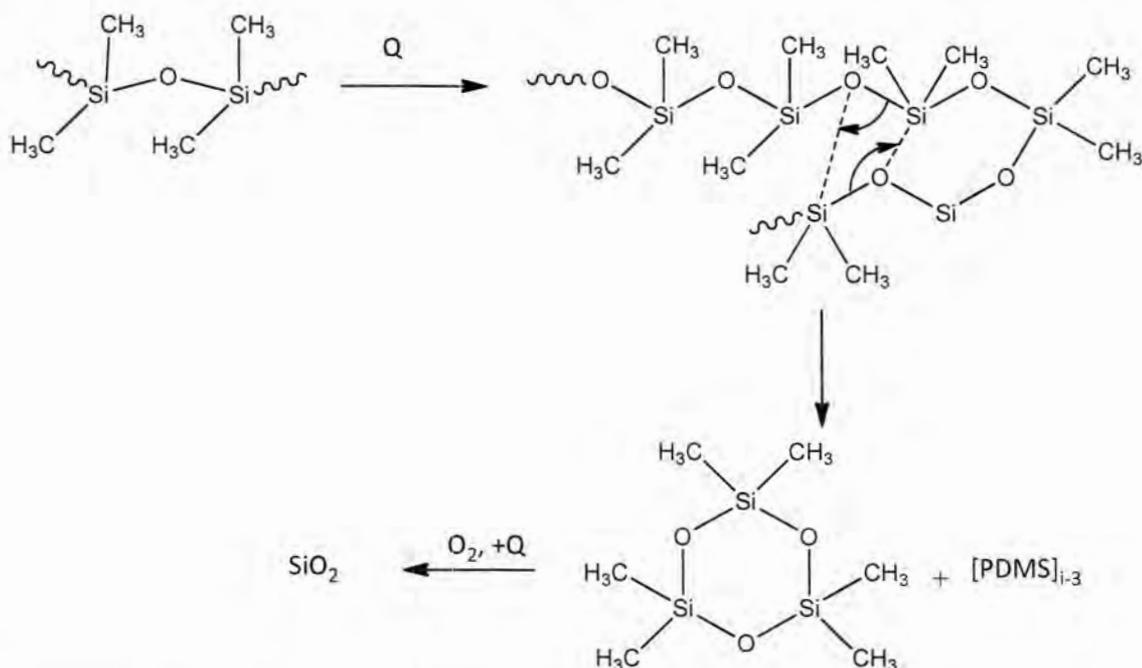
³⁷ G. Camino, S.M Lomakin, M. Laguard: "Thermal polydimethylsiloxane degradation. Part 2. The degradation mechanisms", *Polymer*, **43**, 7, (2002), pp. 2011-2015, doi:10.1016/S0032-3861(01)00785-6

³⁸ Siska Hamdani, Claire Longuet, Didier Perrin, José-Marie Lopez-Cuesta, François Ganachaud: "Flame retardancy of silicone-based materials", *Polymer Degradation and Stability*, **94**, No 4, (2009), pp. 465-495, doi:10.1016/j.polymdegradstab.2008.11.019

³⁹ G. Camino, S.M Lomakin, M. Laguard: "Thermal polydimethylsiloxane degradation. Part 2. The degradation mechanisms", *Polymer*, **42**, 6, (2001), pp. 2395-2402, doi:10.1016/S0032-3861(00)00652-2

χαμηλό σημείο βρασμού και ενδέχεται να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη μείωση του σημείου ανάφλεξης του ελαίου σιλικόνης. Θεωρείται ότι κυκλικά διμεθυλοσιλοξάνια έχουν χαμηλότερα σημείο βρασμού από εκείνα των συνήθων υδρογονανθράκων λόγω της χημικής τους δομής του δεσμού $-Si-O-Si-$ που είναι η ενδιάμεση μοριακή κατάσταση μεταξύ ιοντικού δεσμού και ομοιοπολικού δεσμού. Επομένως, αυτός θα ήταν ένας λόγος για τη μείωση του σημείου ανάφλεξης των γηρασμένων ελαίων σιλικόνης. Οι βασικές ιδιότητες των κύριων κυκλικών διμεθυλοσιλοξανίων δίνονται στον Πίνακα 3.3.

Σε πειράματα θερμικής καταπόνησης ελαίων σιλικόνης σε θερμοκρασίες 180, 220 και 250 °C για διάστημα έως 5000 h, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του σημείου ανάφλεξης και του σημείου καύσης του ελαίου σιλικόνης, ιδίως για τις υψηλότερες θερμοκρασίες θερμικής καταπόνησης. Ειδικότερα, η μείωση του σημείου ανάφλεξης ήταν έντονη στο πρώτο στάδιο της θερμικής γήρανσης στους 250°C, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των σημείων ανάφλεξης και καύσης άνω των 100°C. Αυτή η συμπεριφορά υποδεικνύει ότι κατά τη διάρκεια της θερμικής γήρανσης σχηματίστηκαν υλικά χαμηλού μοριακού βάρους ή, με άλλα λόγια, υλικά με χαμηλό σημείο βρασμού. Η μείωση στα σημεία ανάφλεξης σχετίστηκε με το σχηματισμό κυκλικών διμεθυλοσιλοξανίων.⁴⁰



Σχήμα 3.2. Σχηματισμός κυκλικών διμεθυλοσιλοξανίων από την αποδόμηση πολυδιμεθυλοσιλοξανίων

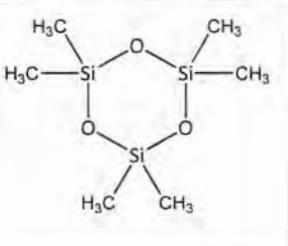
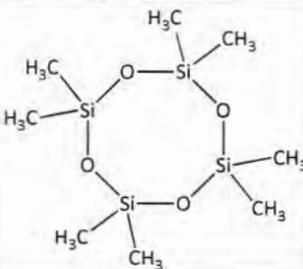
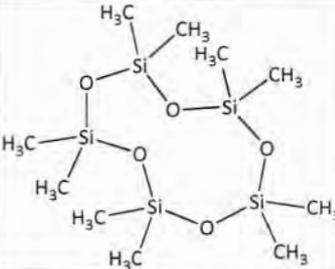
Σε πειράματα σύγκρισης θερμικής καταπόνησης και εφαρμογής ηλεκτρικού τόξου σε σύστημα ελαίου σιλικόνης 20 cSt/χαρτιού Kraft φάνηκε ότι η αναλογία του D3 ήταν η υψηλότερη μετά από θερμικά επιταχυνόμενη αποικοδόμηση, ενώ από την άλλη πλευρά, η αναλογία του D5 ήταν η υψηλότερη μετά από επίδραση ηλεκτρικού τόξου. Στην περίπτωση συστήματος ελαίου σιλικόνης/αρωματικού πολυαμιδικού χαρτιού η αναλογία του D3 ήταν επίσης η υψηλότερη μετά από θερμικά επιταχυνόμενη αποικοδόμηση σε υψηλές θερμοκρασίες και όσο υψηλότερη ήταν η θερμοκρασία θέρμανσης, τόσο υψηλότερη ήταν η αναλογία του D4. Στη συνθήκη χαμηλής θερμοκρασίας, η αντίδραση διάσπασης του

⁴⁰ K. Abe, M. Hamaguchi, T. Umemura, M. Umeda: (1998) "Thermal aging of silicone oil aromatic polyamide insulation systems", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 5, (1998), 578-582, doi:10.1109/94.708275

πολυδιμεθυλοσιλοξανίου θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα στο τέλος της πολυμερικής αλυσίδας, επομένως παράγεται κυρίως D3 χαμηλού μοριακού βάρους, από την άλλη πλευρά, στη συνθήκη σχετικά υψηλής θερμοκρασίας ή στη συνθήκη εφαρμογής τόξου, η διάσπαση της πολυμερικής αλυσίδας θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα πιο τυχαία, επομένως ο λόγος των D4 και D5 σχετικά υψηλού μοριακού βάρους ήταν αυξημένος.

Οι αναλογίες συγκέντρωσης των κυκλικών διμεθυλοσιλοξανίων μετά την επιταχυνόμενη από τη θερμότητα αποικοδόμηση ήταν διαφορετικές από εκείνες μετά από την εφαρμογή ηλεκτρικού τόξου.⁴¹ Τα αποτελέσματα αυτά σημαίνουν ότι η διάγνωση βλαβών μέσω της ανάλυσης των αναλογιών συγκέντρωσης των κυκλικών σιλοξανίων D3, D4 και D5 με υγρό σιλικόνης θα πρέπει να είναι δυνατή με τον ίδιο τρόπο όπως με τις αναλογίες των αερίων αποσύνθεσης.⁴²

Πίνακας 3.3. Ιδιότητες κυκλικών διμεθυλοσιλοξανίων

Όνομασία	Εξαμεθυλο κυκλο τρι σιλοξάνιο (D3)	Οκταμεθυλο κυκλο τρι σιλοξάνιο (D4)	Δεκαμεθυλο κυκλο τρι σιλοξάνιο (D5)
Χημικός Τύπος	$C_6H_{18}O_3Si_3$	$C_8H_{24}O_4Si_3$	$C_{10}H_{30}O_5Si_5$
Χημική Δομή			
Μοριακό Βάρος	222,46	296,64	370,80
Σημείο Πήξης (°C)	64,5	17,5	-38
Σημείο Βρασμού (°C)	134	175	210
Σημείο Ανάφλεξης (°C)	39	69	93

Σε άλλη εργασία, που εξετάστηκε η θερμική καταπόνηση ελαίου σιλικόνης 50 cSt, όταν το έλαιο σιλικόνης θερμάνθηκε σε συνθήκες ερμητικής σφράγισης, δηλαδή σε κατάσταση χωρίς παροχή οξυγόνου, τα μόρια του ελαίου σιλικόνης, δηλαδή τα πολυδιμεθυλοσιλοξάνια, διασπάστηκαν προς παραγωγή κυκλικών διμεθυλοσιλοξανίων όπως τα D3, D4, D5 κλπ. με σημαντικότερο εξ αυτών το D4. Όπως αναφέρεται σε αυτήν την εργασία, η αύξηση των πτητικών συστατικών στο έλαιο σιλικόνης μείωσε σημαντικά το σημείο ανάφλεξης του ελαίου. Το επιτρεπόμενο όριο της περιεκτικότητας πτητικών ουσιών σε μετασχηματιστές ηλεκτραμαξών που χρησιμοποιούν έλαια σιλικόνης ορίζεται κάτω από 1,5%. Επειδή το σημείο ανάφλεξης του ελαίου σιλικόνης που περιέχει πάνω από 2,5% πτητικές ουσίες είναι σχεδόν ίσο με εκείνο του ορυκτελαίου, προστίθεται ένα περιθώριο 1 % για λόγους ασφαλείας, δεδομένου ότι οι μετασχηματιστές ηλεκτραμαξών που χρησιμοποιούν έλαια σιλικόνης εφαρμόζονται ερμητικά και χωρίς στεγανοποίηση πίεσης με μεταλλικά ελάσματα (bellows) με σκοπό την αποφυγή απορρόφησης υγρασίας και αερίων από το έλαιο σιλικόνης.

⁴¹ T. Suzuki, S. Murakami, S. Kobayashi, K. Kiyotaki, M. Umeda: "Decomposition Products of Silicone Liquid Due to Electric Discharge", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **EI-18**, No.2, (1983), pp. 152-157, doi:10.1109/tei.1983.298660

⁴² Hisashi Morooka, Akira Yamagishi, Hideyuki Miyahara, Hiroyuki Sampei, Investigation into Degradation Properties of Low-viscosity Silicone Liquid/Paper Insulation Systems for Diagnosis in Liquid-immersed Transformers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **24**, No. 6; December 2017, pp. 3916 – 3921, doi:10.1109/TDEI.2017.006736

Όταν το έλαιο σιλικόνης θερμάνθηκε στους 200 °C περίπου σε περιβάλλον αέρα, τα μόρια του ελαίου σιλικόνης οξειδώθηκαν και παρήχθησαν διασταυρούμενοι δεσμοί μεταξύ των μορίων, έτσι ώστε να αυξάνεται το ιξώδες του ελαίου σιλικόνης. Αυτό έχει επιβλαβή επίδραση στην κυκλοφορία του ψυκτικού ελαίου.⁴³

Σε μελέτη σχετικά με το σχηματισμό κυκλικών διμεθυλοσιλοξανίων βρέθηκε ότι στο αρχικό στάδιο της θερμικής καταπόνησης σε 240, 300 και 350 °C βρέθηκε ότι στο αρχικό στάδιο της θερμικής καταπόνησης παράγεται κυρίως D3. Όμως το D4 αυξήθηκε σταδιακά με το χρόνο γήρανσης και έγινε περισσότερο από το D3. Η τάση ήταν η ίδια ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας θερμικής καταπόνησης. Επίσης, παρατηρήθηκε συσχέτιση του σημείου ανάφλεξης του ελαίου με την απώλεια εξάτμισης λόγω της θερμικής καταπόνησης και προτάθηκε ότι ο χρόνος θερμικής καταπόνησης που απαιτείται για την επίτευξη απώλειας εξάτμισης 1,0% μπορεί να θεωρηθεί ως η θερμική διάρκεια ζωής του ελαίου σιλικόνης. Στην ίδια εργασία αναφέρεται ότι η συνολική ποσότητα των κύριων κυκλικών διμεθυλοσιλοξανίων έχει γραμμική σχέση με την απώλεια εξάτμισης, ανεξάρτητα από τις θερμοκρασίες καταπόνησης κι έτσι, ο βαθμός υποβάθμισης του ελαίου σιλικόνης μπορεί να εκτιμηθεί με τη μέτρηση των ποσοτήτων των κυκλικών διμεθυλοσιλοξανίων αντί της απώλειας εξάτμισης. Επειδή η συνολική ποσότητα των κυριότερων διμεθυλοσιλοξανίων καταλαμβάνει περίπου 0,7% στην απώλεια εξάτμισης 1,0%, η θερμική διάρκεια ζωής του ελαίου σιλικόνης ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει η συνολική ποσότητα των κυριότερων κυκλικών ενώσεων σιλοξανίων στο 0,7%, οπότε και θα πρέπει να επιθεωρείται ο μετασχηματιστής. Η ανάλυση των κυκλικών διμεθυλοσιλοξανίων με αέρια χρωματογραφία είναι πολύ πιο εύκολη και γρήγορη σε σύγκριση με τη μέτρηση της απώλειας εξάτμισης. Και η απαιτούμενη ποσότητα υγρού που λαμβάνεται σε δείγμα είναι μόνο μερικά μικρόλιτρα (μl). Η ανάλυση των διαλυμένων αερίων δεν είναι κατάλληλη για την περιοδική επιθεώρηση, διότι απαιτείται πολύς χρόνος για την εξαγωγή των αερίων από το υγρό και μεγάλη ποσότητα υγρού. Ωστόσο, η ανάλυση των αερίων παρέχει πληροφορίες για τη διερεύνηση της αιτίας της υποβάθμισης και μπορεί να αποτελέσει μέθοδο λεπτομερούς διάγνωσης.⁴⁴

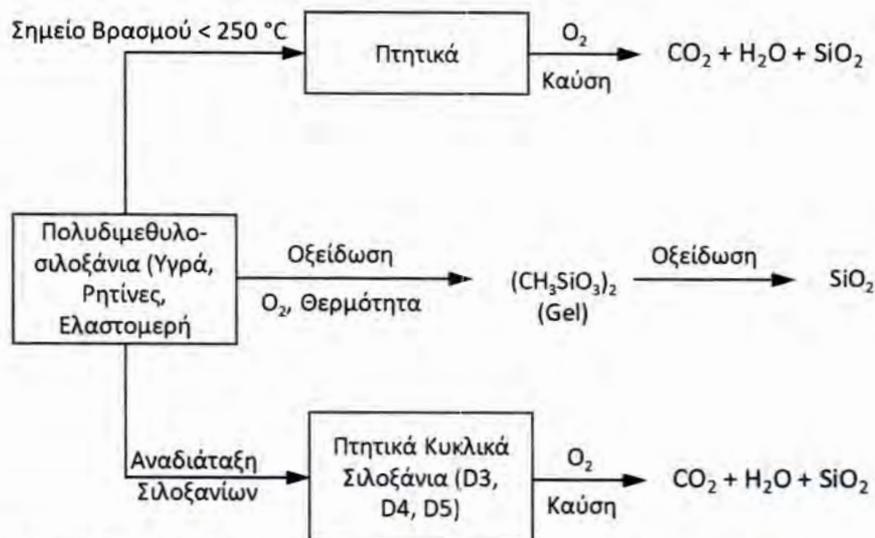
3.7.4. Καύση Πολυδιμεθυλοσιλοξανίων

Οι αναφορές στα μοντέλα καύσης των πολυδιμεθυλοσιλοξανίων αναφέρονται στις εργασίες της ομάδας του Lipowitz (Dow Corning), οι οποίες δεν κατέστη δυνατόν να βρεθούν, καθώς το περιοδικό έχει σταματήσει να εκδίδεται και δεν υπάρχουν αντίγραφα σε ηλεκτρονική μορφή. Υπάρχουν όμως αναφορές σε άλλους ερευνητές. Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου καύσης απεικονίζονται στο Σχήμα 3.3.

Τα oligομερή (κυκλικά είδη και γραμμικά αλυσίδας μικρού μήκους) με σημεία βρασμού κάτω από 250 °C εξατμίζονται και υφίστανται καύση. Τα είδη υψηλότερου μοριακού βάρους υφίστανται τόσο οξείδωση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη διασύνδεση της μήτρας σιλικόνης, όσο και αποικοδόμηση μέσω αναδιάταξης σιλοξανίων, για να σχηματίσουν κυρίως κυκλικά μόρια χαμηλού μοριακού βάρους, τα οποία εξατμίζονται και παρέχουν καύσιμο για τη διαδικασία καύσης. Η τελευταία διαδικασία είναι η κυρίαρχη οδός για την ενδεχόμενη πλήρη καύση του πολυμερούς. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του μοντέλου είναι εφαρμόσιμα και σε άλλα σιλοξάνια που μπορεί να περιέχουν υποκαταστάτες αρυλίου ή αλκυλίου εκτός από μεθύλιο.

⁴³ S. Isobe, T. Morito, S. Miura, T. Uchiyama, F. Ohya, M. Fukuoka, M., H. Tsukioka, E. Ohe, M. Yamaguchi: "Silicone oil filled transformers and its silicone oil characteristics", 1975 EIC 12th Electrical/Electronics Insulation Conference, Boston 11-14 November 1975, doi:10.1109/eic.1975.7458540

⁴⁴ K. Urabe, T. Masuda, H. Yamaguchi: "Thermal degradation in silicone liquid/aramid paper insulation system", 1980 IEEE International Conference on Electrical Insulation, Boston 09-11 June 1980, doi:10.1109/icei.1980.7470859



Σχήμα 3.3. Μοντέλο καύσης πολυδιμεθυλοσιλοξανίων

Η θερμότητα καύσης και η θερμότητα που ακτινοβολείται από τη φλόγα προς το καιόμενο υλικό είναι σημαντικά χαμηλότερες για τα πολυδιμεθυλοσιλοξάνια από εκείνες για τους υδρογονάνθρακες (ορυκτέλαια). Επιπλέον, η ενέργεια που απαιτείται για τον αποπολυμερισμό του και την εξάτμιση των πολυδιμεθυλοσιλοξανίων είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ό,τι για τα κοινά οργανικά πολυμερή. Αυτές οι παράμετροι υποδηλώνουν ότι τα πολυδιμεθυλοσιλοξάνια καίγονται και διατηρούν την καύση δυσκολότερα από άλλα οργανικά υλικά. Ένα πρόσθετος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την καύση των σιλοξανίων είναι ο σχηματισμός και η επακόλουθη εναπόθεση άμορφου διοξειδίου του πυριτίου στην επιφάνεια της καιόμενης σιλικόνης. Αυτή η εναπόθεση λειτουργεί ως μονωτικό (και σε αγωγή και σε ακτινοβολία) προς το εναπομείναν πολυμερές. Συνοπτικά, με βάση τις συγκριτικά χαμηλές θερμότητες καύσης τους, υψηλές θερμότητες εξάτμισης, τη χαμηλή μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από τη φλόγα, και την εναπόθεση τέφρας (διοξείδιο πυριτίου), η συμπεριφορά καύσης των σιλοξανίων διαφέρει σημαντικά από εκείνη των συνηθών οργανικών υλικών.^{45,46}

Έχει γίνει προσπάθεια συσχέτισης των σημείων ανάφλεξης και καύσης ελαίων σιλικόνης με την πτητικότητα και την τάση ατμών τους. Οι καμπύλες τάσης ατμών των μη καταπονημένων ελαίων συμφωνούσαν με τα σημεία καύσης τους, δηλαδή, υψηλότερη τάση ατμών αντιστοιχεί σε χαμηλότερο σημείο καύσης. Το ορυκτέλαιο είχε υψηλότερη καμπύλη τάσης ατμών και χαμηλότερο σημείο καύσης από τα έλαια σιλικόνης, ωστόσο η τάση ατμών κάθε ελαίου στο σημείο καύσης του ήταν περίπου 0,1 atm. Κατά τη θέρμανση, οι καμπύλες τάσης ατμών για τα έλαια σιλικόνης μετατοπίζονταν προς αυξημένες πιέσεις και γίνονταν σχεδόν πανομοιότυπες· οι τιμές του σημείου καύσης τους ήταν οι ίδιες. Η τάση ατμών στο σημείο καύσης παρέμενε περίπου σε 0,1 atm. Η καμπύλη τάσης ατμών του ορυκτελαίου παρέμενε ανεπηρέαστη και το σημείο καύσης του επηρεαζόταν ελάχιστα, όπως και η τάση ατμών στο σημείο καύσης. Συνεπώς, θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει ότι η φύση των εύφλεκτων ατμών και για τα τρία ρευστά δεν επηρεάζεται από τη θέρμανση του ρευστού, παρόλο που τα ίδια τα ρευστά σιλικόνης έχουν επηρεαστεί. Μετά από ηλεκτρική καταπόνηση, τα έλαια σιλικόνης παρουσιάζουν πολύ μικρή αλλαγή στις καμπύλες της τάσης ατμών τους, ωστόσο τα σημεία καύσης τους μειώνονται αισθητά. Αυτό υποδηλώνει ότι δημιουργούνται πιο εύφλεκτοι ατμοί. Η τάση ατμών στο σημείο καύσης μειώνεται σε 0,05 atm για κάθε έλαιο

⁴⁵ R.R Buch: "Rates of heat release and related fire parameters for silicones", *Fire Safety Journal*, **17**, (1991), pp. 1-12, doi:10.1016/0379-7112(91)90009-N

⁴⁶ Fu-Yu Hshieh, C. J. Julien: "Experimental Study on the Radiative Ignition of Silicones", *Fire and Materials*, **22**, (1998), pp. 179-185, doi:10.1002/(SICI)1099-1018(199809/10)22:5<179::AID-FAM650>3.0.CO;2-U

σιλικόνης. Αντίθετα, το ορυκτέλαιο παρουσιάζει σημαντικά αυξημένη καμπύλη τάσης ατμών και μέτρια μείωση στο σημείο καύσης. Με το ηλεκτρικό τόξο που εμφανίστηκε, σχηματίστηκαν σημαντικές ποσότητες υδρογόνου και μικρού μοριακού βάρους υδρογονανθράκων. Αυτό θα μπορούσε να εξηγήσει αυτό το αποτέλεσμα, δεδομένου ότι στη διαδικασία ανοικτού δοχείου, το υδρογόνο θα διαχέονταν γρήγορα από την περιοχή της πηγής ανάφλεξης, μειώνοντας την επίδραση του υδρογόνου στο σημείο καύσης. Επιπλέον, καθώς μειώνεται η περιεκτικότητα του μορίου σε άνθρακα, απαιτείται υψηλότερο ποσοστό όγκου για να επιτευχθεί το κάτω όριο αναφλεξιμότητας. Η τάση ατμών στο σημείο καύσης αυξήθηκε επίσης σε περίπου 0,13 atm. Η πρόταση της ομάδας ήταν να ξεκινήσουν μελέτες πεδίου σε μετασχηματιστές εν χρήσει για τον προσδιορισμό της το μέγεθος του προβλήματος για τις συνθήκες χρήσης.⁴⁷

3.8. Εργασίες Δοκιμών Καύσης Ελαίων Σιλικόνης

Στα μέσα της δεκαετίας του 1970 είχαν γίνει πειραματικές μελέτες σχετικά με την καύση ελαίων σιλικόνης, καθώς και άλλων συμβατικών ελαίων (κυρίως ορυκτέλαια) κι επιχειρήθηκε σύγκριση των ευρημάτων με αυτά που ήταν γνωστά για τα ορυκτέλαια. Επειδή το θέμα της καύσης των ελαίων σιλικόνης είναι κρίσιμο για τη διερεύνηση του δυστυχήματος, θα παρουσιαστούν κάποιες από αυτές τις εργασίες σε μεγαλύτερη έκταση, επειδή δίνουν πολύ χρήσιμα στοιχεία σχετικά με τη δυνατότητα καύσης των ελαίων σιλικόνης.

3.8.1. Δοκιμές Ανάφλεξης με Φρέσκο Έλαιο

Σε εργασία της ομάδας του Lipowitz της Dow Corning αναφέρεται ότι αν και τόσο τα έλαια σιλικόνης όσο και τα συνθετικά έλαια με βάση υδρογονάνθρακες παρέχουν καλή ηλεκτρική απόδοση, αναπτύσσουν εύφλεκτα αέρια υπό την επίδραση ηλεκτρικού τόξου και επομένως μπορεί να προκαλέσουν ανάφλεξη ή πύρινη σφαίρα σε καταστροφική βλάβη του μετασχηματιστή. Έχει αναφερθεί ότι ακόμη και πολυχλωριωμένα διφαινύλια πιο χαμηλής περιεκτικότητας σε χλώριο από τα συνήθη είχαν μετρήσιμα σημεία ανάφλεξης (αλλά όχι σημεία καύσης) και μπορούσαν να δημιουργήσουν συνθήκες πύρινης σφαίρας σε δοκιμές καταστροφικής αστοχίας. Τα σημαντικότερα αέρια που παράγονται λόγω της επίδρασης ηλεκτρικού τόξου των ελαίων σιλικόνης και των ορυκτελαίων είναι υδρογόνο, με μικρότερες ποσότητες ακετυλενίου, μεθανίου, αιθυλενίου και άλλων αέριων υδρογονανθράκων. Όλα τα ανωτέρω αέρια είναι εύφλεκτα και πιστεύεται ότι συμβάλουν στο σχηματισμό πύρινης σφαίρας που έχει παρατηρηθεί σε δοκιμές καταστροφικής αστοχίας ηλεκτρικού εξοπλισμού. Στην έρευνα αυτή, διερευνήθηκε το σενάριο καταστροφικής αστοχίας για τρεις τύπους ελαίων: συνθετικός υδρογονάνθρακας υψηλού μοριακού βάρους (HMW), έλαιο σιλικόνης (PDMS) και συνθετικό έλαιο (πολυ αλφα ολεφίνη – PAO). Τα ερωτήματα που τέθηκαν ως προς το χειρότερο σενάριο ήταν τα ακόλουθα:

1. Εάν συμβεί μια καταστροφική αστοχία μετασχηματιστή να ποιες θα είναι οι συνέπειες της χειρότερης περίπτωσης;
2. Υποθέτοντας ότι παράγεται μια πύρινη σφαίρα κατά την καταστροφική αστοχία, ποιες θα είναι οι πιθανές βλάβες εξαιτίας της; Εξετάστηκαν το μέγεθος, η διάρκεια, η ενέργεια ακτινοβολίας, η ποσότητα και την επικινδυνότητα του καπνού και των τοξικών αερίων.
3. Υποθέτοντας ότι το περίβλημα του μετασχηματιστή σπάει και χύνεται υγρό, ποιες θα είναι οι συνέπειες της χειρότερης περίπτωσης μιας προκύπτουσας λίμνης φωτιάς; Εξετάστηκε ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας, τόσο συναγωγής όσο και ακτινοβολίας, και την ποσότητα και η επικινδυνότητα του καπνού και των τοξικών αερίων.

Οι δοκιμές καταστροφικής αστοχίας, με επαρκείς ενέργειες για την παραγωγή πύρινων σφαιρών, είναι δαπανηρές στη διεξαγωγή και δύσκολες στη μελέτη και την ερμηνεία. Η ποσότητα και η σύνθεση των αερίων λόγω επιβολής ηλεκτρικού τόξου και η ενέργεια του

⁴⁷ R.G. Gann, M.J. Manka: "Ignitability of decomposed transformer fluids", *Fire Technology*, **18**, (1982), pp. 251–258, doi:10.1007/BF02473137

παραγόμενου κρουστικού κύματος εξαρτώνται από τις ιδιότητες του ελαίου και από την ενέργεια του τόξου (μήκος τόξου, τάση, ρεύμα, διάρκεια και άλλοι παράγοντες). Η ποσότητα και η κατανομή μεγέθους των σταγονιδίων εύφλεκτου υγρού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ενέργειας και της διάρκειας του κρουστικού κύματος καθώς και από τις φυσικές ιδιότητες (ιξώδες, επιφανειακή τάση, κλπ.) του υγρού. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τη φύση της πύρινης σφαίρας. Εάν εκδηλωθεί πυρκαγιά λίμνης, οι μέθοδοι μελέτης και εκτίμησης της σχετικής επικινδυνότητας είναι καλύτερα κατανοητές.

Κίνδυνος πυρκαγιάς

Οι πιο αξιόπιστες δοκιμές πυρκαγιάς είναι εκείνες που αξιολογούν ένα σύστημα υπό συνθήκες που προσομοιάζουν στενά την πραγματική χρήση με ρεαλιστικούς, αλλά σοβαρούς τρόπους αστοχίας. Οι ακόλουθες δοκιμές κινδύνου πυρκαγιάς θεωρούνται εφαρμοστέες στα έλαια μετασηματιστών:

1. Αέρια λόγω τόξου
 2. Ευκολία ανάφλεξης
 3. Ανάπτυξη πυρκαγιάς/διάδοση φλόγας
 4. Απελευθέρωση θερμότητας
 5. Καπνός
 6. Αέρια πυρκαγιάς
 7. Εξάντληση οξυγόνου
 8. Κατάσβεση
1. Αέρια τόξου. Τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών δεν συμφωνούν ως προς την ακριβή σύνθεση των αερίων λόγω τόξου εξαιτίας διαφορετικών πειραματικών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν: σύνθεση των αερίων πάνω από το ρευστό, γεωμετρία ηλεκτροδίων, μήκος τόξου, ρεύμα και τάση.
 2. Ευκολία ανάφλεξης. Οι ιδιότητες ανάφλεξης με φλόγα μπορούν να μετρηθούν με δοκιμές μικρής κλίμακας όπως το σημείο ανάφλεξης και το σημείο καύσης. Ωστόσο, οι θερμοκρασίες αυτανάφλεξης μειώνονται καθώς αυξάνεται ο όγκος των αερίων.
 3. Ανάπτυξη της καύσης/διάδοση της φλόγας. Οι ιδιότητες αυτές είναι δύσκολο να μετρηθούν για έλαια χαμηλής πτητικότητας με υψηλό σημείο ανάφλεξης και καύσης. Η διάδοση της φλόγας, φυσικά, θα είναι ταχεία εάν ένα έλαιο προθερμανθεί στο σημείο καύσης του ή κοντά σε αυτό. Κανένα από αυτά τα έλαια, που διατηρούνται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος ή κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας (έως 105 °C), δεν θα αναφλεγεί εάν εμφανιστεί μια έντονη φλόγα πάνω σε ένα τμήμα της επιφάνειας του ρευστού, επειδή τα ρεύματα συναγωγής θα διαλύσουν γρήγορα τη θερμότητα σε όλο το ρευστό. Η ανάπτυξη της πυρκαγιάς και η εξάπλωση της φλόγας μετρήθηκαν ποιοτικά σε δοκιμές καύσης λίμνης μεγάλης κλίμακας και μπορούν να θεωρηθούν ως ο χρόνος που απαιτείται, μετά την ανάφλεξη του ρευστού, για να αναπτυχθεί πλήρως μια πυρκαγιά από την άποψη του ύψους της φλόγας, του ρυθμού έκλυσης θερμότητας και του ρυθμού καύσης μάζας του ελαίου.
 4. Έκλυση θερμότητας. Οι πυρκαγιές εκλύουν την ενέργεια καύσης τους σε τρεις τρόπους:
 - α. Συναγωγή: Η ενέργεια των θερμών αερίων που παράγονται σε μια πυρκαγιά, τα οποία τείνουν να ανεβαίνουν και μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στην οροφή, και άλλες υπερκείμενες κατασκευές· συχνά ο κύριος τρόπος απελευθέρωσης ενέργειας.
 - β. Ακτινοβολία: Εκπομπή ακτινοβολούμενης ενέργειας, κυρίως στο υπέρυθρο, από τη θερμή φλόγα, η οποία τείνει να απελευθερώνεται περισσότερο ή λιγότερο ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η απελευθέρωση ακτινοβολούμενης ενέργειας από μια μεγάλη πυρκαγιά μπορεί να είναι σημαντική, προκαλώντας ανάφλεξη παρακείμενων κατασκευών και εμποδίζοντας την κοντινή προσέγγιση των πυροσβεστών.

γ. Αγωγή: Η ροή ενέργειας από το καυτό, φλεγόμενο υλικό προς το δοχείο, έδαφος ή το δάπεδο· συνήθως μια μικρή διαδρομή της απελευθέρωση ενέργειας από μεγάλες πυρκαγιές.

Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας (RHR) είναι πιο σημαντικός για τον κίνδυνο πυρκαγιάς, ή το ενδεχόμενο βλάβης, παρά η συνολική εκλυόμενη θερμότητα. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό σε ένα απλό παράδειγμα. Ένα γαλόνι βενζίνης (3,7 λίτρα) ή 2,7 κιλά λιθάνθρακα θα απελευθερώσουν 36.800 kJ κατά τη συνολική καύση. Ωστόσο, η βενζίνη θεωρείται πιο επικίνδυνη επειδή θα απελευθερώσει την ενέργειά της πολύ πιο γρήγορα.

Μια μεγάλη, φλεγόμενη λίμνη μονωτικού ελαίου θεωρείται ότι είναι το αποτέλεσμα του χειρότερου σεναρίου για μια καταστροφική αστοχία μετασχηματιστή. Ως εκ τούτου, μεγάλη προσπάθεια έχει αφιερωθεί στη μέτρηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας, που θεωρείται ένα σημαντικό χαρακτηριστικό κινδύνου πυρκαγιάς των μεγάλων, φλεγόμενων λιμνών υγρών.

Η μέγιστη ποσότητα θερμότητας που μπορεί να εκλυθεί κατά την πλήρη καύση ενός υλικού δίνεται από την τυπική θερμότητα καύσης του. Η μέγιστη θεωρητική έκλυση θερμότητας (Q , σε kJ) σε μια πυρκαγιά είναι το γινόμενο της θερμότητας καύσης (ΔH_c° σε kJ/g) και της καιόμενης μάζας (m , σε γραμμάρια).

$$Q = m \cdot \Delta H_c^\circ$$

Ο μέγιστος ρυθμός έκλυσης θερμότητας (σε kW) καθορίζεται από τον ρυθμό καύσης της μάζας (\dot{m} , σε g/s) και τη ΔH_c° .

$$RHR_{\max} = \dot{m} \cdot \Delta H_c^\circ$$

Οι λίμνες φωτιάς διαμέτρου 4 ft (1,2 m) και μεγαλύτερες έχουν λάβει πρωταρχική προσοχή για δύο λόγους:

- Οι μεγάλες πυρκαγιές, φυσικά, παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο.
- Μια λίμνη υδρογονανθράκων διαμέτρου περίπου 4 ft είναι η μικρότερη που μοντελοποιεί κατά πολύ τον ρυθμό καύσης σε σταθερή κατάσταση ανά μονάδα επιφάνειας ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) και το ρυθμό έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kW/m^2) των μεγάλων πυρκαγιών.

Μια σημαντική δυσκολία στη μοντελοποίηση των πυρκαγιών υγρών είναι ότι οι μικρές, εύκολα μελετώμενες πυρκαγιές λιμνών τείνουν να ελέγχονται από διάχυση. Η καύση λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες στρωτής ροής με χαμηλό ρυθμό καύσης που ελέγχεται από τη διάχυση του αέρα και του καυσίμου στην αέρια φάση. Η απώλεια θερμότητας από την επιφάνεια της λεκάνης και από την ακτινοβολία της φλόγας που δεν επιστρέφει στο καύσιμο είναι σημαντική.

Οι μεγάλες πυρκαγιές ελέγχονται από την ακτινοβολία. Η ροή αερίου (και η ίδια η φλόγα) είναι ιδιαίτερα τυρβώδης. Η τύρβη είναι ένα σημαντικό μέσο ανάμιξης καυσίμου-αέρα. Οι απώλειες θερμότητας από το δοχείο και από την ακτινοβολία είναι μικρές. Ο ρυθμός καύσης ανά μονάδα επιφάνειας είναι υψηλός και είναι σχεδόν ανεξάρτητος από το μέγεθος της δεξαμενής. Οι πολύ μεγάλες δεξαμενές παρουσιάζουν μικρή μείωση του ρυθμού καύσης λόγω της μειωμένης πρόσβασης του αέρα.

Έγινε προσπάθεια να μοντελοποιηθούν πυρκαγιές σε μεγάλες δεξαμενές μετρώντας το ρυθμό έκλυσης θερμότητας καιόμενων δεξαμενών 4 in (10 cm) ως συνάρτηση της ροής θερμότητας ακτινοβολίας από θερμικές λυχνίες. Το PAO και το HMW συμπεριφέρθηκαν όπως οι τυπικοί υδρογονάνθρακες, παρουσιάζοντας απότομη αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας με την αύξηση της ενέργειας ακτινοβολίας στην επιφάνεια του ρευστού. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας του ελαίου σιλικόνης παρουσίασε μικρή εξάρτηση από τη ροή θερμότητας προς την επιφάνεια, επειδή κατά την καύση σχηματίζεται γρήγορα στην επιφάνεια μια μονωτική, ανακλαστική τέφρα από οξειδίο πυριτίου.