

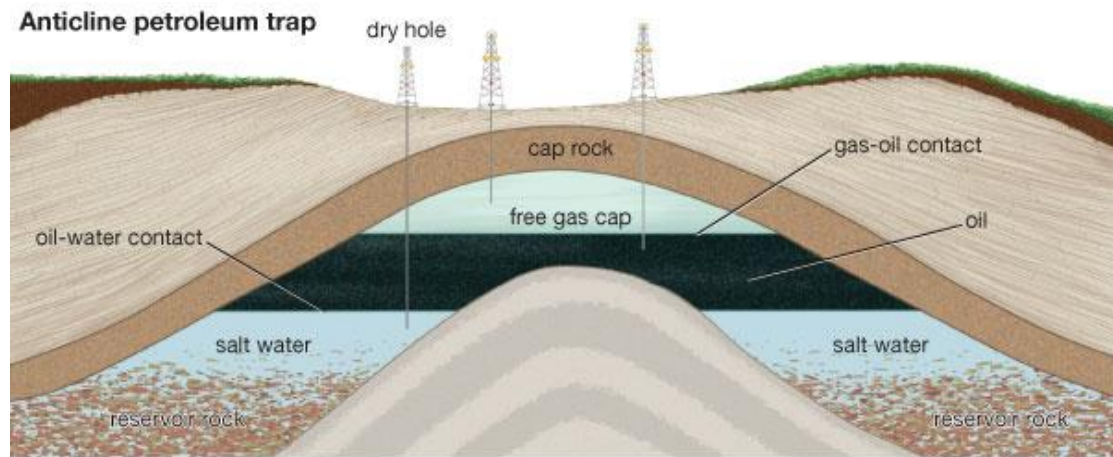


ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ Α.Π.Θ



ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕ ΘΕΜΑ:

ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΜΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ



ΑΚΡΙΒΟΠΟΥΛΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
ΑΕΜ: 5076

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	3
Ταμιευτήρες πετρελαίου πετρώματα και ρευστά.....	5
Δημιουργία των ταμιευτήρων πετρελαίου.....	6
Τυπικά χαρακτηριστικά των πετρελαιοειδών.....	8
Σημασία των ταμιευτήρων πετρελαίου - ιδιότητες πετρωμάτων και ρευστών.....	10
Μηχανικές ιδιότητες των ρευστών των ταμιευτήρων πετρελαίου.....	12
Μηχανικές ιδιότητες	14
Τάση	15
Παραμόρφωση	16
Σχέση τάσης – παραμόρφωσης	18
Αντοχή πετρώματος	19
Ηλεκτρικές ιδιότητες	20
Θεμελιώδεις έννοιες και η εξίσωση του Archie	20
Συντελεστής σχηματισμού	21
Στρέβλωση	22
Παράγοντας τσιμεντοποίησης	23
Δείκτης Ανθεκτικότητας	23
Επίδραση της διαβρεξιμότητας στις ηλεκτρικές ιδιότητες	24
Εισαγωγή στα ρευστά των πετρελαϊκών ταμιευτήρων	28



Χημεία του πετρελαίου	29
Στέρεα συστατικά πετρελαίου	30
Υδρατμοί αερίου	31
Κεριά	32
Ασφαλτίνες	33
Διαμαντοειδή	35
Κατάταξη των αερίων και των πετρελαϊκών αποθεμάτων	35
Τα πέντε ρευστά του ταμιευτήρα	36
Άλλα ρευστά υδρογονανθράκων ενδιαφέροντος	38
Σχηματισμός νερών	39
Ανάλυση ρντ και ιδιότητες ρευστών ταμιευτήρα	40
Ιδιότητες των ρευστών των πετρελαϊκών ταμιευτήρων	41
Αέρια και υγρά	42
Μαύρα πετρέλαια και πτητικά πετρέλαια	43
Ιδιότητες σχηματισμού των υδάτων	45
Χαρακτηριστικά σύνθεσης διαμόρφωσης των υδάτων	47
Βιβλιογραφία	50

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι υδρογονάνθρακες είναι ένας από τους σημαντικότερους ενεργειακούς πόρους της Γης. Η κυρίαρχη χρήση των υδρογονανθράκων είναι η χρήση τους ως καυσίμου για παραγωγή ενέργειας. Το μεθάνιο [1C] και το αιθάνιο [2C] είναι υδρογονάνθρακες που βρίσκονται σε αέρια κατάσταση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και δεν μπορούν εύκολα να υγροποιηθούν μόνο με μεταβολή της πίεσης. Το προπάνιο [3C] αντίθετα υγροποιείται εύκολα και συνήθως διατίθεται σε “φιάλες προπανίου”, ως επί το πλείστον σε υγρή μορφή. Το βουτάνιο [4C] υγροποιείται πολύ εύκολα και παρέχει ένα ασφαλές, πτητικό καύσιμο για τους μικρούς αναπτήρες τσέπης. Το πεντάνιο [5C] είναι ένα διαυγές υγρό σε θερμοκρασία δωματίου, που χρησιμοποιείται συνήθως στη χημεία αλλά και τη βιομηχανία ως ένα ισχυρό, σχεδόν άοσμο διαλυτικό των κηρών (waxes) και των υψηλού μοριακού βάρους οργανικών ενώσεων. Το εξάνιο [6C] είναι επίσης ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος μη-πολικός, μη αρωματικός διαλύτης, ενώ αποτελεί και σημαντικό συστατικό της κοινής βενζίνης. Τα αλκάνια, αλκένια και ισομερή κυκλοαλκάνια με 6 έως 10C βρίσκονται στην κορυφή των συστατικών της βενζίνης, της νάφθας, της κηροζίνης (που είναι το εύφλεκτο μείγμα υδρογονανθράκων που προέρχεται από την κλασματική απόσταξη του πετρελαίου και χρησιμοποιείται κυρίως ως καύσιμο των αεροπλάνων και ως διαλύτης) και άλλων ειδικών βιομηχανικών διαλυτών. Σημειώνεται ότι η “νάφθα” είναι ενδιάμεσο προϊόν διύλισης του πετρελαίου, δεν αποτελεί δηλαδή τελικό εμπορεύσιμο καύσιμο, αλλά προϊόν της πρώτης απόσταξης του αργού, ή και προϊόν άλλων διεργασιών όπως η καταλυτική πυρόλυση και άλλες, το οποίο τυγχάνει κατόπιν περαιτέρω επεξεργασίας για να δώσει καύσιμα προϊόντα επιθυμητών προδιαγραφών όπως η βενζίνη. Ο όρος νάφθα είναι ένας αρκετά γενικός και όχι αρκετά ακριβής όρος, διότι κάθε ένα διυλιστήριο δεν είναι ποτέ ακριβώς το ίδιο με κάποιο άλλο και η “νάφθα” που παράγει κάποια μονάδα δεν είναι η ίδια με τη “νάφθα” κάποιας άλλης. Ωστόσο, γενικά, μπορούμε να πούμε ότι πρόκειται για μείγμα υδρογονανθράκων που έχει αρχικό σημείο βρασμού περίπου 35 °C και τελικό σημείο βρασμού περίπου 200°C και αποτελείται κυρίως από παραφίνες, ναφθένια και αρωματικούς υδρογονάνθρακες τεσσάρων ως και δέκα ή έντεκα ατόμων άνθρακα. Νάφθα δηλαδή αποκαλείται γενικά, αλλά όχι μόνο, το κλάσμα της απόσταξης του αργού πετρελαίου που βρίσκεται μεταξύ του LPG (δηλαδή των αερίων της κορυφής της απόσταξης) και της κηροζίνης. Το κλάσμα αυτό αποτελείται κυρίως από αλκάνια με 5 έως 9 άτομα άνθρακα. Η νάφθα ως παράγωγο του πετρελαίου ανήκει στα πετροχημικά προϊόντα.

Με το όνομα **νάφθα** χαρακτηρίζεται και το ακάθαρμο πετρέλαιο καθώς και διάφορα κλάσματα λιθανθρακόπισσας τα οποία περιέχουν κυρίως ξυλένιο και άλλα ανώτερα ομόλογα. Με τη σταδιακή αύξηση των ατόμων του άνθρακα στη δομή των υδρογονανθράκων, οι απλά δομημένοι, μη κυκλικοί υδρογονάνθρακες παρουσιάζουν υψηλότερο ιξώδες, υψηλότερο σημείο βρασμού, υψηλότερη θερμοκρασία στερεοποίησης και πιο σκούρο χρώμα. Στο αντίθετο άκρο από το μεθάνιο [1C] βρίσκονται λοιπόν οι βαριές πίσσες (tars) που απομένουν ως το τελευταίο κλάσμα στους αποστακτήρες διύλισης του αργού πετρελαίου. Οι πίσσες συλλέγονται και χρησιμοποιούνται ευρέως ως μονωτικό στεγών, ως συντηρητικό ξύλου, στην οδοποιία και σε άλλες χρήσεις. Η στερεά μορφή των υδρογονανθράκων είναι η άσφαλτος. Διάφορα μείγματα πτητικών υδρογονανθράκων χρησιμοποιούνται σήμερα κατά προτίμηση αντί των χλωροφθορανθράκων (chlorofluorocarbons) ως προωθητικό υλικό των σπρέι, κυρίως λόγω των επιπτώσεων των χλωροφθορανθράκων στη στιβάδα του όζοντος.

ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΡΕΥΣΤΑ

Ο όρος "petroleum" είναι ένας συνδυασμός δύο διαφορετικών λέξεων, "petra" που σημαίνει πέτρα και "oleum" που σημαίνει λάδι, από την ελληνική και τη λατινική γλώσσα αντίστοιχα. Μερικές φορές η λέξη " πετρέλαιο" χρησιμοποιείται επίσης για να περιγράψει το πετρέλαιο από τη στιγμή που βρίσκεται μέσα στο πέτρωμα. Σε πολύ γενική ορολογία, το πετρέλαιο μπορεί να αναφέρεται σε υδρογονάνθρακες (ενώσεις του άνθρακα και του υδρογόνου) στις αεριώδεις και υγρές καταστάσεις (πιο συχνές), οι οποίες είναι Που βρίσκονται στη φύση σε ακατέργαστες ή μη επεξεργασμένες (εξού και η λέξη αργό πετρέλαιο) μορφές και διαχωρίζονται σε διαφορετικά κλάσματα για την παραγωγή μιας ποικιλίας καυσίμων μεταφοράς (φυσικό αέριο, βενζίνη, ντίζελ, κηροζίνη, καύσιμα αεροπλάνων, λιπαντικά έλαια κ.λπ.) και τα πετροχημικά προϊόντα (πολυμερή, πλαστικά, κλπ.).

Ο όρος "ταμιευτήρας" γενικά σημαίνει μια συσσώρευση πετρελαίου σε πορώδεις σχηματισμούς βράχου θάφτηκαν αρκετά πόδια υπόγεια ή υπόγεια.

Ο όρος "πέτρωμα" από την άποψη μιας δεξαμενής σημαίνει το φυσικό δοχείο που περιέχει ή κρατά το πετρέλαιο απλωμένο σε μικροσκοπικούς πόρους των πετρωμάτων.

Ο όρος "ρευστό" σημαίνει γενικά οτιδήποτε ρέει από το σημείο Α (υπόγεια θέση) στο Β (επιφάνεια) κάτω από μια συγκεκριμένη κλίση και περιλαμβάνει αέρια ή υγρά υδρογονανθράκων. Ο ταμιευτήρας πετρελαίου μαζί με τα υγρά αποτελεί ένα σύστημα, το οποίο έχει μια ορισμένη έκταση και βάθος, και υπάρχει σε δεδομένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Το σύστημα αυτό διερευνάται και αξιοποιείται εμπορικά για την παραγωγή πετρελαίου.

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Ο σχηματισμός των δεξαμενών πετρελαίου είναι ένα θέμα που καλύπτεται εκτεταμένα από τη βιβλιογραφία γεωλογίας του πετρελαίου. Ο αναγνώστης αναφέρεται στους Bjorlykke ¹, Selley ², και Tissot και Welte ³. Επομένως, μόνο αυτή η βασική συζήτηση για το θέμα αυτό περιλαμβάνεται σε αυτό το κεφάλαιο.

Υπάρχουν δύο διαφορετικές θεωρίες όσον αφορά τον σχηματισμό πετρελαίου, δηλαδή οι οργανικές (βιογενείς) και οι ανόργανες (αβιογενείς). Μεταξύ των δύο, η οργανική θεωρία είναι ίσως πιο δημοφιλής και γενικά αποδεκτή. Οι Tissot και Welte³ δηλώνουν ότι η παραγωγή, η συσσώρευση και η διατήρηση της οργανικής ύλης αποτελούν προϋπόθεση για την ύπαρξη πετρωμάτων πηγής πετρελαίου. Οι γεωχημικές μελέτες ως βάση για τη βιογενική προέλευση του πετρελαίου είναι επίσης ευρέως αποδεκτές. Επιπλέον, το πετρέλαιο περιέχει ενώσεις οι οποίες είναι χημικά παρόμοιες με τη βιογενή ύλη

¹ Bjorlykke, K., *Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2011, p. 518.

² Selley, R.C., *Elements of Petroleum Geology*, Academic Press, London, U.K., 1998, p. 470.

³ Tissot, B.P. and Welte, D.H., *Petroleum Formation and Occurrence*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1984, p. 699.

όπως φυτά και ζώα⁴. Σύμφωνα με τους Archer και Wall⁵, πιστεύεται ότι το πετρέλαιο προέρχεται από αναερόβια αποσύνθεση λιπών, πρωτεϊνών και υδατανθράκων σε φυτικά και ζωικά ύδατα θαλάσσιων και ποτάμιων, πλαγκτόν και άλγη. Ο Glasby⁶ παρέχει μια ιστορική επισκόπηση των δύο θεωριών του αβιογενούς σχηματισμού πετρελαίου.

Η διαδικασία σχηματισμού πετρελαίου ή συνήθως αναφερόμενη σε γενικευμένους όρους ως αργό πετρέλαιο και φυσικό αέριο, αρχίζει με την υποεπιφανειακή παραγωγή «κηρογόνου» μέσω αποσύνθεσης φυτικών και ζωικών οργανισμών σε ιζηματογενή πετρώματα υπό την επίδραση μεταβλητών, όπως είναι η πίεση (βάθος ταφής), η θερμοκρασία (γεωθερμική κλίση) και οι γεωλογικές κλίμακες. Το κηρογόνο, η ιζηματογενής οργανική ύλη που παράγει πετρέλαιο, έχει πρωταρχική σημασία ως πηγή αργού πετρελαίου και φυσικού αερίου⁷. Ο βράχος που περιέχει το οργανικό υλικό, κηρογόνο, που τελικά μετατρέπεται σε πετρέλαιο, ονομάζεται μητρικό πέτρωμα.

Το κηρογόνο, το οποίο αποτελεί πρόδρομο υλικό του πετρελαίου, μπορεί να θεωρηθεί ως πρώτη ύλη που μετατρέπεται σε αργό πετρέλαιο και φυσικό αέριο μέσω τριών διαφορετικών διεργασιών, δηλαδή μέσω (1) διαγένεσης, (2) καταγένεσης και (3) μεταγένεσης. Η διαγένεση πιστεύεται ότι συμβαίνει σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (μέχρι 150 ° F) και βάθη από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως περίπου χιλιάδες μέτρα^{3,5} με αποτέλεσμα κυρίως το βιοχημικό μεθάνιο. Η δεύτερη διαδικασία εμφανίζεται σε πολύ μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών και βάθους από 150 ° F έως 300 ° F και 1000 έως περίπου 4000 m αντίστοιχα, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή πιο υγρών υδρογονανθράκων (πετρελαιοειδών) και υγρών αερίων (βαθύτερα)^{3,5}. Η μεταγένεση, που ονομάζεται τελευταίο στάδιο της μετατροπής κηρογόνου, συμβαίνει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 300 ° F έως 400 ° F και βάθη άνω των 4000 m που καταλήγουν σε ξηρά αέρια.

Μετά τον σχηματισμό πετρελαίου όπως περιγράφηκε προηγουμένως, οι υδρογονάνθρακες αφήνουν το μητρικό πέτρωμα και μεταναστεύουν προς τα πάνω μέσα από διαπερατά στρώματα μέχρι να

⁴ Tiab, D. and Donaldson, E.C., *Theory and Practice of Measuring Reservoir Rocks and Fluid Transport Properties*, Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1996.

⁵ Archer, J.S. and Wall, C.G., *Petroleum Engineering: Principles and Practice*, Graham and Trotman, London, U.K., 1986, p. 350.

⁶ Glasby, G.P., Abiogenic origin of hydrocarbons: An historical overview, *Resource Geology*, 56(1), 85–98, 2006.

⁷ Vandenbroucke, M. and Largeau, C., Kerogen origin, evolution and structure, *Organic Geochemistry*, 38(5), 719–833, 2007.

φτάσουν σε Δομή Παγίδευσης (trap) υδρογονανθράκων όπου συσσωρεύονται, σχηματίζοντας έναν υδρογονάνθρακα ή ταμιευτήρα πετρέλαιου, η οποία καθορίζεται κατά κύριο λόγο από πλευστότητα και υδροδυναμική ροή (αυξημένη αύξηση των υδρογονανθράκων σε πορώδη πετρώματα που έχουν κορεστεί με νερό) ^{4,8}. Με άλλα λόγια, όπως αναφέρει ο Tiab⁴, οι υδρογονάνθρακες δεν προέρχονται γενικά από τα δομικές και στρωματογραφικές δομές παγίδευσης στις οποίες βρίσκονται, αλλά μάλλον σχηματίζονται στα μητρικά πετρώματα από τα οποία μεταναστεύουν σε παγίδες που σχηματίζουν τους ταμιευτήρες πετρελαίου. Ωστόσο, οι διεργασίες με τις οποίες οι υδρογονάνθρακες μεταναστεύουν από τα μητρικά πετρώματα σε ένα πορώδες, διαπερατό ταμιευτήρα δεν είναι πλήρως κατανοητές^{4,5}. Παρ' όλα αυτά, τα πετρώματα μέσα στα οποία βρίσκεται το πετρέλαιο, ονομάζονται πετρώματα - ταμιευτήρες. Τέλος, τα πετρώματα - ταμιευτήρες σφραγίζονται από αυτό που είναι γνωστό ως ένα σχετικά αδιαπέραστο πέτρωμα (cap rock) που λειτουργεί ως φράγμα και διατηρεί τους υδρογονάνθρακες παγιδευμένους στον ταμιευτήρα, αποτρέποντας τη μετανάστευσή τους ή τη διαρροή τους στην επιφάνεια. Αποδεδειγμένες συσσωρεύσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου ή ταμιευτήρες πετρελαίου βρίσκονται σε όλες τις έξι από τις επτά ηπείρους στον κόσμο και περιλαμβάνουν τόσο παράκτιες όσο και χερσαίες αποθέσεις. Οι επαρχίες του πετρελαίου και του φυσικού αερίου περιλαμβάνουν τοποθεσίες τόσο διαφορετικές όσο και απομακρυσμένες όπως οι αρκτικές στην Βόρεια Πλευρά της Αλάσκας, στα υπεράκτια βαθιά ύδατα του Κόλπου του Μεξικού, Δυτική Αφρική, Βόρεια Θάλασσα, και ερήμους της Μέσης Ανατολής.

ΤΥΠΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΕΙΔΩΝ

Ωστόσο, η πλειονότητα των ταμιευτήρων πετρελαίου βρίσκονται εντός του εύρους βάθους του 1.600-13.000 ft ⁵. Γενικά, για τους ταμιευτήρες πετρελαίου, οι τιμές της θερμοκρασίας και της πίεσης είναι σχετικά χαμηλές ενώ για βαθύτερους ταμιευτήρες είναι σχετικά υψηλές. Για παράδειγμα, οι συσσωρεύσεις αργού πετρελαίου στην αρκτική (βόρεια πλαγιά της Αλάσκας), τα οποία είναι πολύ πιο ρηχά και βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με το παγωμένο νερό, έχουν

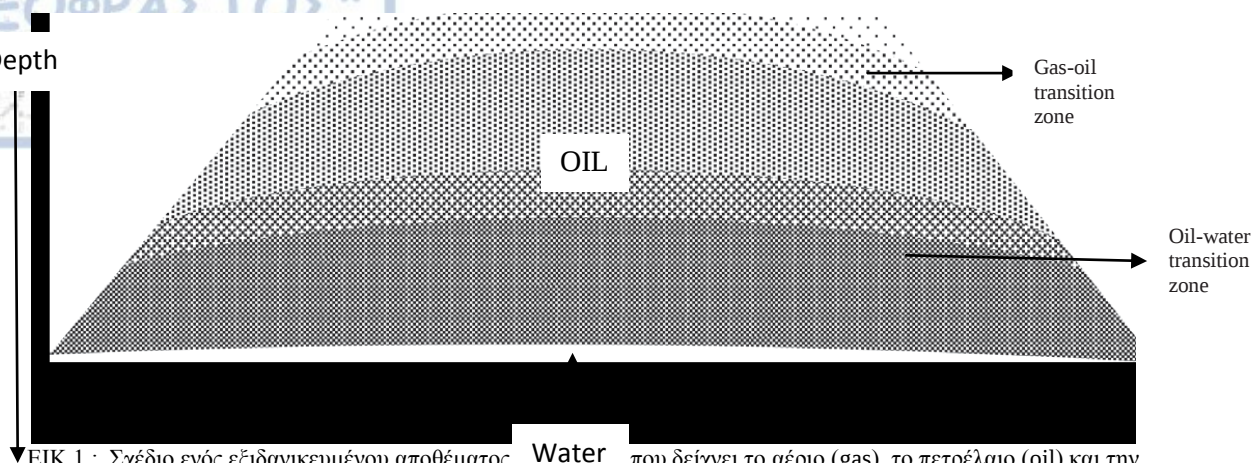
θερμοκρασίες τόσο χαμηλές περίπου 80°F - 85°F και πιέσεις μικρότερες από 1500 psia. Σε αντίθεση με αυτό, οι βαθιά υπεράκτιες συσσωρεύσεις στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας και στον Κόλπο του Μεξικού έχουν θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 250°F και 450°F και πιέσεις που κυμαίνονται μεταξύ 15.000 και 30.000 psia.

Παρόμοια με τα βάθη των ταμιευτήρων πετρελαίου, ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του περιλαμβάνει την έκταση και το πάχος της πετρελαϊκής στήλης, η οποία μπορεί να ποικίλει σημαντικά.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των ταμιευτήρων πετρελαίου είναι οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των υδρογονανθράκων που υπάρχουν σε αυτά. Αν και όλα τα ρευστά των ταμιευτήρων πετρελαίου αποτελούνται κυρίως από άνθρακα και υδρογόνο, κάθε ρευστό του ταμιευτήρα υδρογονάνθρακα είναι μοναδικό στη φύση του λόγω μιας ευρέως διαφορετικής χημικής ουσίας και τα παρόντα συστατικά, τα οποία επίσης με τη σειρά τους έχουν ως αποτέλεσμα παραλλαγές στις φυσικές ιδιότητες. Μη αποτελούμενα συστατικά των υδρογονανθράκων όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το άζωτο και το υδρόθειο επίσης συσχετίζονται αρκετά συχνά με τους υδρογονάνθρακες. Οι Tissot και Welte³ παρείχαν εκτεταμένη κάλυψη σε αυτό θέμα. Οι συσσωρεύσεις πετρελαίου και αερίου συνδέονται πάντοτε με τα ύδατα σχηματισμού (αλατούχα ύδατα), τα οποία μπορεί να συνιστούν εκτεταμένους υδροφορείς υποκείμενους ή συνεχόμενους στους υδρογονάνθρακες ή που μπορεί να υπάρχουν μόνο μέσα στο διάστημα μεταφοράς του υδρογονάνθρακα ως μολυσμένο νερό⁵. Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά από αυτά τα ύδατα σχηματισμού επίσης διαφέρουν σημαντικά από τη μία συσσώρευση στην άλλη.

Τα πετρώματα ταμιευτήρες που περιέχουν συσσωρεύσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι ευρέως ψαμμίτες και ανθρακικά άλατα. Σύμφωνα με τον Tissot και τον Welte, περίπου το 10% του πετρελαίου, εντοπίζονται περιστατικά σε θραυσμένους σχιστόλιθους και πυριγενείς και μεταμορφωμένους βράχους. Εκτός από την ύπαρξη επαρκών όγκων υδρογονανθράκων, για τη συσσώρευση που να είναι εμπορικά βιώσιμα, δύο βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το πέτρωμα ταμιευτήρας, είναι το πορώδες και η διαπερατότητα, το πρώτο και το τελευταίο σημαίνουν την αποθήκευση και ροή πετρελαίου, αντίστοιχα. Με άλλα λόγια, το πετρέλαιο και το αέριο που περιέχονται στο ο πόρος ή ο ενδιάμεσος χώρος του βράχου των δεξαμενών πρέπει να διαπραγματεύονται μικροσκοπικά και θραύσματα περάσματα μέσω του βράχου για να ταξιδέψουν από τη δεξαμενή στο φρεάτιο παραγωγής και στην επιφάνεια.

Depth



ΕΙΚ.1.: Σχέδιο ενός εξιδανικευμένου αποθέματος που δείχνει το αέριο (gas), το πετρέλαιο (oil) και την κατανομή του νερού (water). Σημειώστε ότι λόγω των τριχοειδών δυνάμεων, που αντιστέκονται στον πλήρη διαχωρισμό βαρύτητας, το νερό βρέθηκε επίσης (σε μικρές ποσότητες) σε όλες τις ζώνες της δεξαμενής, συμπεριλαμβανομένου του καλύμματος αερίου (gas cap)

Ανάλογα με τους παράγοντες που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, τα διάκενα πόρων των ταμιευτήρων πετρελαίου μπορεί να περιέχουν υδρογονανθρακικό αέριο-νερό ή πετρέλαιο-νερό, είναι γνωστά ως ταμιευτήρας δύο φάσεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να περιέχει αέριο-πετρέλαιο-νερό, γνωστό ως ταμιευτήρας τριών φάσεων. Αν και, από θερμοδυναμική άποψη, τόσο το πετρέλαιο όσο και το νερό μπορούν να ονομαστούν υγρή φάση. Κατ'αρχήν, αν το αέριο, το πετρέλαιο και το νερό τοποθετούνται σε ανοικτό περιέκτη, ο διαχωρισμός λόγω βαρύτητας ή οι διαφορές στην πυκνότητα τα χωρίζουν σε ξεχωριστές στρώσεις με αέριο στην κορυφή, ακολουθούμενο από το πετρέλαιο και το νερό στο κάτω μέρος. Ωστόσο, λόγω των μικροσκοπικών χώρων των ενδιάμεσων πόρων, η τάση να κινηθούν θα αντισταθμίσει τη δύναμη της βαρύτητας και θα περιορίσει τον πλήρη διαχωρισμό βαρύτητας των υγρών φάσεων, με αποτέλεσμα έναν ισορροπημένο ταμιευτήρα πετρελαίου. Το σχήμα ενός ιδεατού ταμιευτήρα πετρελαίου εμφανίζεται στο ΕΙΚ.1.1.

ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΡΕΥΣΤΩΝ

Οι ιδιότητες των πετρωμάτων και των ρευστών των ταμιευτήρων πετρελαίου αποτελούν τη ραχοκοκαλιά σχεδόν όλων των εφαρμογών της μηχανικής πετρελαίου και είναι ιδιαίτερα σημαντικές στη μηχανική των

ταμιευτήρων. Ωστόσο, η γνώση των διαφόρων ιδιοτήτων πετρωμάτων και ρευστών μπορεί μόνο να ληφθεί με τη σύλληψη ή την ανάκτηση φυσικών δειγμάτων και αργότερα με την υποβολή τους σε διαφορετικούς τύπους σχετικών εργαστηριακών πειραμάτων. Η αρχική διαδικασία της συλλογής φυσικών δειγμάτων από πετρώματα και ρευστά συνήθως αρχίζει με τη γεωλογική (μελέτη εκτάσεων) και γεωφυσική (σεισμικές έρευνες) ανάλυση μιας μελλοντικής συσσώρευσης υδρογονανθράκων. Αν αυτή η ανάλυση υποδεικνύει μια πιθανή εμπορική προοπτική, στη συνέχεια, αποφασίζεται να διενεργηθεί διερευνητική έρευνα. Έπειτα, σε μια διαδικασία που ονομάζεται αξιολόγηση του σχηματισμού, συλλέγονται δείγματα πετρωμάτων και ρευστών από τον ταμιευτήρα και μελετώνται από τις μηχανικές και εμπορικές εκτιμήσεις. Λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τον τύπο και τη φυσική ιδιότητες των πετρωμάτων του ταμιευτήρα, τα ρευστά του ταμιευτήρα πετρελαίου που υπάρχουν και η αλληλεπίδραση του πρώτου και του τελευταίου είναι απαραίτητη για την κατανόηση και την αξιολόγηση της δυνητικής απόδοσης ή παραγωγικότητας ενός δεδομένου ταμιευτήρα πετρελαίου.

Το πέτρωμα ταμιευτήρας (συνήθως ονομάζεται πυρήνας) και τα δείγματα ρευστών που ανακτήθηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αξιολόγησης σχηματισμού, είναι τα μόνα πραγματικά φυσικά δείγματα της ενδεχόμενης συσσώρευσης. Επομένως, αυτά είναι μια άμεση πηγή πολύτιμων δεδομένων, όπως τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων και των ρευστών, για παράδειγμα, η χωρητικότητα του πετρώματος να αποθηκεύει τα ρευστά και να τα επιτρέπει να ρέουν μέσα από αυτά, την ταυτοποίηση των διαφόρων χημικών ειδών και των αντίστοιχων ποσών τους στα ρευστά, η κατάσταση κάτω από τις οποίες υφίστανται υπό συνθήκες ταμιευτήρα (αέριο ή υγρό ή και τα δύο) και τη συμπεριφορά που παρουσιάζουν. Ως εκ τούτου, οι βασικές μελέτες ρευστών του ταμιευτήρα είναι απαραίτητα στοιχεία ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη νέων συσσωρεύσεων πετρελαίου και φυσικού αερίου, την αξιολόγηση των τεχνικών παραγωγής και τον σχεδιασμό, την επιλογή των μεταδόσεων και τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας.

Εκτός από τη μελέτη ανεξάρτητων χαρακτηριστικών πετρωμάτων - ταμιευτήρων και ρευστών, εξίσου σημαντικές είναι οι ιδιότητες που βασίζονται σε αλληλεπιδράσεις πετρώματος-ρευστού. Τα διακεκριμένα παραδείγματα αυτών περιλαμβάνουν τη διαβρεξιμότητα (συγγένεια ενός πετρώματος με ένα συγκεκριμένο τύπος ρευστού με παρουσία άλλου ρευστού), η οποία εξαρτάται από τις ιδιότητες και των δύο το βράχο δεξαμενής και τα διάφορα ρευστά με τα οποία είναι κορεσμένα. Ως εκ τούτου, η γνώση της διαβρεξιμότητας του βράχου της δεξαμενής είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της θέσης όπου το φυσικό αέριο, το

πετρέλαιο και το νερό θα υπήρχαν στο χώρο του πορώδους πετρώματος του ταμιευτήρα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ρευστά του ταμιευτήρα πετρελαίου (και το συνοδευτικό ρευστό στις περισσότερες περιπτώσεις) κατοικούν στους μικροσκοπικούς πόρους των πετρωμάτων των ταμιευτήρων. Αν και οι διαφορές βαρύτητας υπάρχουν μεταξύ του φυσικού αερίου, του πετρελαίου και του νερού, δεν διαχωρίζονται εντελώς σε διακριτά στρώματα στον ταμιευτήρα λόγω τριχοειδούς πίεσης. Αυτή η λεγόμενη τριχοειδής πίεση είναι βασικά αποτέλεσμα των μικροσκοπικών χώρων μεταξύ των πόρων που αποθηκεύουν τα ρευστά του ταμιευτήρα πετρελαίου. Λόγω αυτού του πολύ σημαντικού χαρακτηριστικού πετρώματος-ρευστού (τριχοθυμία) ή της ισορροπίας της βαρύτητας και του τριχοειδούς, λόγω της θέσης των επαφών μεταξύ των διαφόρων φάσεων ρευστού, όπως η επαφή αερίου-πετρελαίου ή η επαφή πετρελαίου-νερού, και οι αντίστοιχες ζώνες μετάβασης σε ένα ταμιευτήρα πετρελαίου θα ποικίλουν. Αυτό είναι και πάλι ένα θέμα μεγάλης πρακτικής σημασίας από την άποψη εξερεύνησης και παραγωγής.

Βάσει των προαναφερθέντων, η σημασία των χαρακτηριστικών των πετρωμάτων και των ρευστών των ταμιευτήρων στην έρευνα και παραγωγή ταμιευτήρων πετρελαίου είναι σαφώς εμφανής. Επομένως, η λεπτομερής γνώση των ιδιοτήτων των ταμιευτήρων και των ρευστών είναι η σπονδυλική στήλη σχεδόν από όλες τις δραστηριότητες εξερεύνησης και παραγωγής, όπως η μηχανική ταμιευτήρων, ο ταμιευτήρας προσομοίωσης, δοκιμές άντλησης, μηχανική παραγωγής, ενισχυμένο ή βελτιωμένο πετρέλαιο (EOR και IOR) και ούτω καθεξής. Με άλλα λόγια, ο ταμιευτήρας πετρελαίου μπορεί να περιγραφεί και να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά μόνο όταν υπάρχουν κατάλληλα δεδομένα που διατίθεται σε όλα τα επίπεδα, όπως επίπεδα πεδίου, άντληση, πυρήνα και πόρων. Το επίπεδο και η ποιότητα των δεδομένων υπαγορεύει επίσης τον βαθμό στον οποίο μπορούν να εκτιμηθούν σωστά τα αποθεματικά. Ο επιτυχία του καθορισμού ενός βέλτιστου σχεδίου ανάπτυξης πεδίων και η στρατηγική διαχείρισης του ταμιευτήρα για κάθε τομέα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις γνώσεις και την κατανόησή μας τις ιδιότητες του πετρώματος και των ρευστών του ταμιευτήρα.

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Τα πετρώματα των πετρελαϊκών ταμιευτήρων που είναι θαμμένα σε βάθος υποβάλλονται σε εσωτερικές καταπονήσεις που ασκούνται από ρευστά (π.χ. αέριο, έλαιο και νερό) που υπάρχουν στους χώρους των πόρων και οι εξωτερικές τάσεις που ασκούνται εν μέρει από τα υπερκείμενα πετρώματα⁸. Ωστόσο, Οι ταμιευτήρες πετρελαίου είναι δυναμικά συστήματα που αλλάζουν συνεχώς καθώς τα ρευστά έχουν εξαντληθεί από τους χώρους πόρων ως μέρος της παραγωγής. Αυτή η εξάντληση προκαλεί την αλλαγή στην εσωτερική καταπόνηση, με αποτέλεσμα το πέτρωμα να υποβληθεί σε διαφορετικό αποτέλεσμα τάσης (stress)⁸. Ομοίως, κατά τη διάρκεια της πλημμύρας ή της έγχυσης αερίου στο πέτρωμα ισορροπίας, οι πιέσεις μπορούν επίσης να μεταβληθούν δυναμικά. πραγματοποιείται έγχυση εξωτερικών ρευστών ώστε να αυξηθεί η πίεση πόρων και να μειωθεί αποτελεσματικά η καθαρή τάση. Η γνώση των αλλαγών της καθαρής αποτελεσματικής τάσης είναι ένα σημαντικό στοιχείο της διαχείρισης των ταμιευτήρων επειδή η μεταβολή της καθαρής αποτελεσματικής πίεσης κατά τη διάρκεια της παραγωγής μπορεί να έχει σημαντική επίδραση επιπτώσεις ιδιαίτερα στους ταμιευτήρες ευαίσθητους στη τάση. Προβλέποντας τη μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων των ταμιευτήρων, είναι απαραίτητη για την ολοκλήρωση και τα προγράμματα τόνωσης⁹. Επιπλέον, συμπύκνωση ταμιευτήρα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε καθίζηση επιφάνειας, είναι ένας κρίσιμος παράγοντας όσον αφορά τον σχεδιασμό των πλατφορμών του περιβλήματος και της συνολικής επίδοσης¹⁰. Οι τύποι αυτών των χαρακτηριστικών των πετρωμάτων συνήθως αξιολογούνται με τη μέτρηση διάφορων μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των ταμιευτήρων. Οι Tiab και Donaldson⁹ έχουν καλύψει αυτό το θέμα σε εκτεταμένες λεπτομέρειες.

Πετροφυσικές ιδιότητες όπως πορώδες, διαπερατότητα, τριχοειδής πίεση, ειδική αντίσταση, και σχετική διαπερατότητα επηρεάζονται από την κατάσταση της τάσης που ενεργεί πάνω σε ένα πέτρωμα. Αυτές οι ιδιότητες θα πρέπει να μετρηθούν σε κατάσταση τάσης που μοιάζει με την επί τόπου τάση. Επομένως, γενικά, η πρακτική είναι να διεξάγονται βασικές αναλύσεις για τις πετρογραφικές ιδιότητες κάτω από υπερυψωμένες περιορισμένες πιέσεις που συνήθως παράγονται από υδροστατικά ή τύπου Hassler κύτταρα.

⁸ Amyx, J.W., Bass, D.M., Jr., and Whiting, R.L., *Petroleum Reservoir Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1960.

⁹ Tiab, D. and Donaldson, E.C., *Theory and Practice of Measuring Reservoir Rocks and Fluid Transport Properties*, Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1996.

¹⁰ Holt, R.M., Ingsoy, P., and Mikkelsen, M., Rock mechanical analysis of North Sea reservoir formations, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 16796.

Για τις ηλεκτρικές ιδιότητες των βράχων των ταμιευτήρων, η σημαντικότερη ιδιότητα είναι η ηλεκτρική και η ειδική αντίσταση που εξαρτάται γενικά από τη γεωμετρία του χώρου πόρων και τα ρευστά που καταλαμβάνουν το χώρο πόρων. Ο χώρος του πορώδους του ταμιευτήρα είναι κανονικός και καταλαμβάνεται από φυσικό αέριο, πετρέλαιο και νερό, από τα οποία το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο είναι μη-αγώγιμα και το νερό είναι το μόνο αγώγιμο υγρό αν περιέχει διαλυμένα άλατα. Το ενδιάμεσο ή μολυσμένο νερό που περιέχει διαλυμένα άλατα, αποτελεί έναν ηλεκτρολύτη ικανό να διεξάγει ρεύμα, καθώς αυτά τα άλατα διαχωρίζονται σε θετικά φορτισμένα κατιόντα όπως Na^+ και Ca^{++} και αρνητικά φορτισμένα ανιόντα όπως Cl^- και SO_4^{--} . Οι παράγοντες αυτοί δείχνουν ότι η ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων του ταμιευτήρα είναι, η συνάρτηση της αλατότητας του νερού σχηματισμού, το αποτελεσματικό πορώδες και ο κορεσμός των υδρογονανθράκων και το νερό που παγιδεύεται στον χώρο των πόρων ¹¹. Ως εκ τούτου, η αντίσταση των πετρωμάτων του κορεσμένου ταμιευτήρα με διάμεσα ρευστά τέτοια καθώς το αέριο, το πετρέλαιο και το νερό χρησιμεύει ως δείκτης υγρών κορεσμών, καθιστώντας το πολύτιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της παραγωγικότητας ενός σχηματισμού.

Είναι σαφές ότι, με βάση τα προαναφερθέντα, είναι πολύ σημαντικό να μελετήσουμε τις μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων των ταμιευτήρων. Ο κύριος σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να εισάγουν μια πολύ βασική συζήτηση για τις διάφορες μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων των ταμιευτήρων. Για μια πιο ολοκληρωμένη συζήτηση αυτών των ιδιοτήτων, ο αναγνώστης παραπέμπεται σε άλλα εξειδικευμένα κείμενα για το θέμα αυτό.

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων ταμιευτήρα εμπίπτει σε μια εξειδικευμένη περιοχή που ονομάζεται μηχανική πετρωμάτων, η οποία περιλαμβάνει τη μελέτη των ιδιοτήτων αντοχής από πετρώματα. Συγκεκριμένα, η μηχανική πετρωμάτων είναι το πεδίο σπουδών που αφιερώνεται στην κατανόηση τις βασικές διεργασίες παραμόρφωσης του πετρώματος και την τεχνολογική τους σημασία ¹².

¹¹ Pirson, S.J., *Handbook of Well Log Analysis: For Oil and Gas Formation Evaluation*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1963, 326 p.

¹² Fairhurst, C., *Rock Mechanics*, Pergamon Press, London, U.K., 1963.

Ωστόσο, για να κατανοήσουμε τις ιδιότητες αντοχής των πετρωμάτων, είναι πρώτα απαραίτητο να επανεξετάσουμε τις θεμελιώδεις έννοιες, όπως η τάση και το στέλεχος επειδή οι μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων αξιολογούνται με βάση τις σχέσεις τάσης - παραμόρφωσης.

ΤΑΣΗ

Η τάση, που συνήθως υποδηλώνεται από σ , αναφέρεται στη δύναμη που εφαρμόζεται σε ένα πέτρωμα που τείνει να αλλάξει τις διαστάσεις του. Η εξωτερική δύναμη που εφαρμόζεται σε ένα πέτρωμα αναφέρεται κανονικά ως φορτίο. Μαθηματικά, Η τάση είναι η συγκέντρωση δύναμης ανά μονάδα επιφάνειας, που ορίζεται ως:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

ΕΙΚ.2

όπου

σ είναι η τάση, συνήθως μετριέται σε Pa ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$)

F είναι η δύναμη σε N

A είναι η επιφάνεια και μετριέται σε m^2

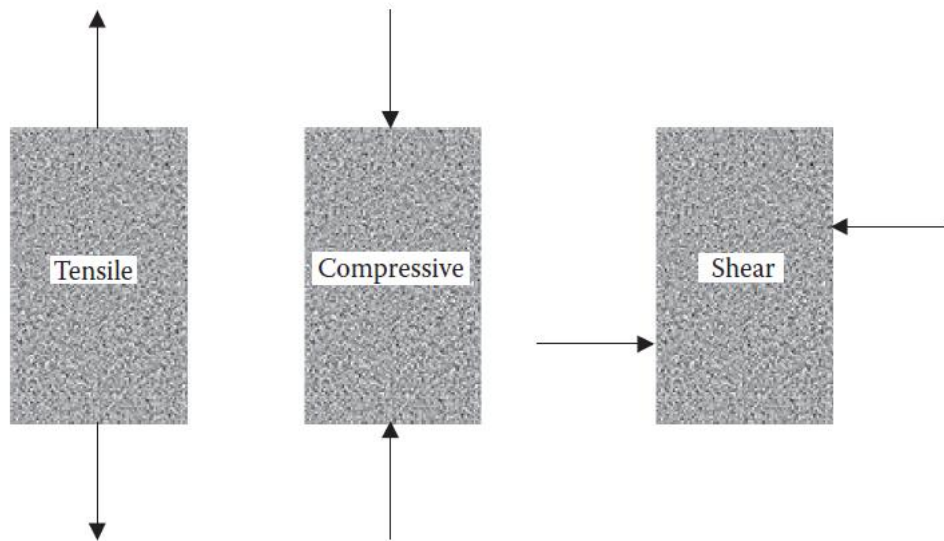
Οι τάσεις των πετρωμάτων του ταμιευτήρα είναι συνήθως στην περιοχή των μεγαπασκαλ ($\text{MPa} = 10^6 \text{ Pa}$).

Οι τρεις βασικές αναγνωρισμένες συνθήκες τάσης είναι

1. Εφελκυστική (Tensile)
2. Συμπιεστική (Compressive)
3. Διατρητική (Shear)

όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3. Η τάση εφελκυσμού ή η αντίσταση ενάντια στην αποσύνδεση είναι ένας τύπος της τάσης στην οποία δύο τμήματα του υλικού εκατέρωθεν ενός επιπέδου τάσεων τείνουν να επιμηκύνουν. Η συμπιεστική τάση είναι ακριβώς το αντίθετο της τάσης εφελκυσμού. Γειτονικά τμήματα του υλικού τείνουν να πιέζουν το ένα το άλλο, ή οι εξωτερικές δυνάμεις κατευθύνονται προς το ένα στο άλλο κατά μήκος του ίδιου επιπέδου. Η διατμητική τάση συμβαίνει όταν οι

εξωτερικές δυνάμεις είναι παράλληλες και κατευθύνονται σε αντίθετες διευθύνσεις αλλά σε διαφορετικά επίπεδα.



ΕΙΚ.3

Η αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των ταμιευτήρων πραγματοποιείται με τη διεύθυνση των τριών βασικών τύπων πίεσης. Η ικανότητα ενός βράχου να αντιδράσει σε θλιπτική καταπόνηση ή η πίεση ονομάζεται συμπιεστότητα πετρώματος.

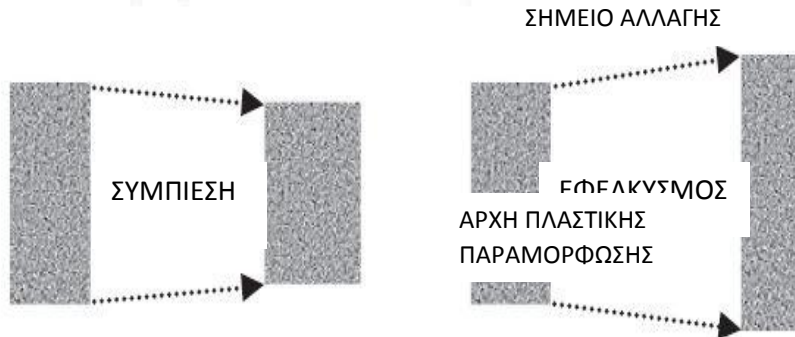
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

Η επίδραση της τάσης που εφαρμόζεται στα πετρώματα μελετάται με τη μέτρηση της καταπόνησης που παράγεται από την εφαρμογή της τάσης. Το στέλεχος, που συνήθως υποδηλώνεται από το ϵ , είναι η σχετική αλλαγή του σχήματος ή το μέγεθος ενός πετρώματος λόγω εξωτερικών εφαρμοζόμενων δυνάμεων (δηλ. τάσεων). Με άλλα λόγια, το στέλεχος είναι ένα μέτρο της παραμόρφωσης ενός υλικού όταν εφαρμόζεται σε ένα φορτίο. Το σχήμα 4 δείχνει την επίδραση της τάσης στο μήκος και τη διάμετρο του δείγματος κυλινδρικού πυρήνα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, η συμπίεση κάνει το δείγμα πυρήνα μικρότερο και ευρύτερο. Η επέκταση (τράβηγμα εκτός) κάνει το δείγμα πυρήνα



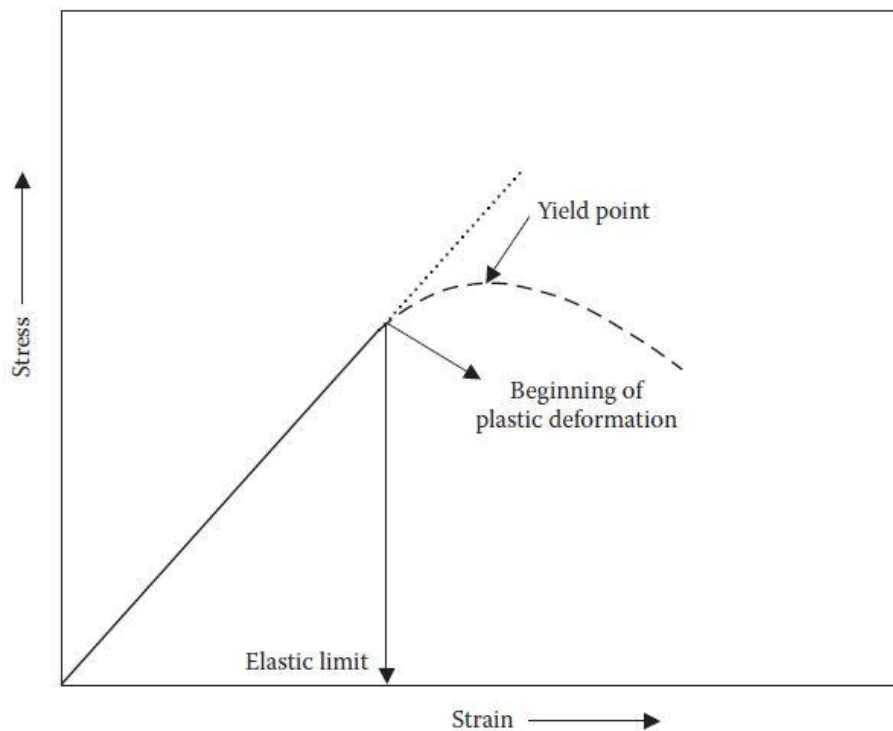
μικρότερο σε διάμετρο και περισσότερο. Το στέλεχος υπολογίζεται ως a αναλογία μεταβολής του μήκους προς το αρχικό μήκος ή ως λόγο μεταβολής της διαμέτρου προς την αρχική διάμετρο και ως εκ τούτου είναι αδιάστατη. Για παράδειγμα, εξετάστε ένα κεντρικό βύσμα του αρχικού μήκος L_0 που έχει υποβληθεί σε τάση εντάσεως. Μετά την εφαρμογή της τάσης, αν το αρχικό μήκος αυξάνεται σε L , τότε η αξονική καταπόνηση ορίζεται ως:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$



ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΟΡΙΟ

ΕΙΚ.4 Παραμόρφωση ενός δείγματος πυρήνα με εφαρμογή της τάσης



ΕΙΚ.5 Εικόνα της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης για ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις (stress = τάση , strain = παραμόρφωση)

ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στα περισσότερα υλικά, για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, η αύξηση της τάσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του στελέχους και, στη συνέχεια, αν αφαιρεθεί η τάση, η καταπόνηση επιστρέφει στο μηδέν. Σε άλλο λέξεις, εάν αποσυρθεί η τάση, το υλικό επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα και μέγεθος. Αυτό ονομάζεται ελαστική παραμόρφωση ή ελαστική καταπόνηση. Ωστόσο, αν η τάση συνεχίζει να αυξάνεται, φτάνει στο σημείο απόδοσης, που ορίζεται ως αλλαγή από ελαστικό όριο σε πλαστική παραμόρφωση, η οποία είναι μόνιμη και μη ανακτήσιμη. Προφανώς, σε αυτή την περίπτωση εάν η τάση αφαιρείται, η καταπόνηση δεν επιστρέφει στο μηδέν. Το σχήμα 5 απεικονίζει το σχέδιο τάσης-παραμόρφωσης για τις ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5, πέρα από το ελαστικό όριο, το υλικό αρχίζει να συμπεριφέρεται μη αναστρέψιμα στην περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης όπου η καμπύλη τάσης-καταπόνησης αποκλίνει από τη γραμμικότητα. Ωστόσο, η ακριβής φύση της σχέσης τάσης - παραμόρφωσης θα εξαρτηθεί τα χαρακτηριστικά του βράχου, όπως η ολκιμότητα και η ευθραυστότητα του.

ΑΝΤΟΧΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η αντοχή ενός στερεού υλικού είναι η ικανότητά του να αντιστέκεται στην τάση χωρίς να υποχωρεί ή να αντιστέκεται στην παραμόρφωση. Λαμβάνοντας υπόψη τις τρεις βασικές συνθήκες τάσης, η δύναμη ενός υλικού καθορίζεται πάντα από τον τύπο τάσης, όπως η αντοχή σε εφελκυσμό (αντίσταση κατά την απομάκρυνση), αντοχή στη θλίψη (αντοχή στη συμπίεση), και αντοχή διατμήσεως (αντοχή σε διατμητική τάση). Για τα πετρώματα - ταμιευτήρες, η δύναμη είναι αποτέλεσμα των διαφόρων διαδικασιών εναπόθεσης που σχημάτιζαν το πέτρωμα στην πρώτη θέση. Η αντοχή του πετρώματος βασικά αντικατοπτρίζει τη γεωλογική προέλευση του.

Η αντοχή στη θλίψη είναι η σημαντικότερη αντοχή για τα πετρώματα - ταμιευτήρες. Για παράδειγμα, ο προσδιορισμός της αντοχής στη θλίψη είναι κρίσιμη για την κατανόηση της σταθερότητας μιας καλής οπής ειδικά κατά τη διάρκεια της γεώτρησης. Η αντοχή στη θλίψη προσδιορίζεται από δύο συνήθεις εργαστηριακές τεχνικές: μονοαξονική δοκιμή αντοχής σε θλίψη και τριαξονική δοκιμή αντοχής σε θλίψη. Αυτά τα τεστ καθορίζουν βασικά την τελική ισχύ του ενός δεδομένου

πετρώματος ταμιευτήρα, δηλαδή της μέγιστης τιμής της τάσης που επιτυγχάνεται πριν από την αποτυχία.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Όλα τα πετρώματα των ταμιευτήρων αποτελούνται από στερεούς κόκκους και κενούς χώρους που καταλαμβάνονται από τα ρευστά που μας ενδιαφέρουν σε ταμιευτήρες πετρελαίου (δηλαδή αέριο και πετρέλαιο υδρογονάνθρακα και νερό). Τα στερεά που συνθέτουν τα πετρώματα του ταμιευτήρα, με εξαίρεση ορισμένα αργιλικά ορυκτά, είναι μη-αγώγιμα. Ομοίως, οι δύο φάσεις υδρογονανθράκων, το αέριο και πετρέλαιο, είναι επίσης μη αγώγιμα. Ωστόσο, το νερό είναι αγωγός όταν περιέχει διαλυμένα άλατα όπως το NaCl , το MgCl_2 και το KCl που βρίσκονται κανονικά στο σχηματισμό νερού του ταμιευτήρα. Το ηλεκτρικό ρεύμα διεξάγεται στο νερό με κίνηση ιόντων και μπορεί συνεπώς να ονομάζεται ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων ταμιευτήρων εξαρτώνται από τη γεωμετρία των κενών και των ρευστών με τα οποία γεμίζουν αυτά τα κενά. Λόγω των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του σχηματισμού του νερού των ταμιευτήρων, η τεχνική των ηλεκτρικών διαγραφιών έχει γίνει ένα σημαντικό εργαλείο στον προσδιορισμό του κορεσμού του νερού σε σχέση με το βάθος και ως εκ τούτου έναν αξιόπιστο πόρο για την αξιολόγηση *in situ* υδρογονανθράκων.

ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΟΥ ARCHIE

Η ειδική αντίσταση ενός συγκεκριμένου υλικού μπορεί να οριστεί από την ακόλουθη απλή γενικευμένη εξίσωση:



$$R = \frac{rA}{L}$$

ΕΙΚ.6

όπου

R είναι η ειδική αντίσταση που εκφράζεται σε $\Omega \cdot m$

r είναι η αντίσταση σε Ω

Το A είναι η διατομή σε m^2

L είναι το μήκος σε m

Στην εξίσωση 6, η ηλεκτρική αντίσταση r ενός στοιχείου ή συσκευής κυκλώματος ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς τάσεως ΔV προς το ηλεκτρικό ρεύμα I, το οποίο ρέει μέσα από αυτό. Ωστόσο, για ένα πολύπλοκο σύστημα όπως ένα πέτρωμα ταμιευτήρα που περιέχει υδρογονάνθρακες και νερό, η αντίσταση του πετρώματος εξαρτάται από παράγοντες όπως η αλατότητα του νερού, η θερμοκρασία, το πορώδες, η γεωμετρία των πόρων, το στρες σχηματισμού, και τη σύνθεση του πετρώματος.

Η θεωρία της τεχνικής καταγραφής της ηλεκτρικής αντίστασης που εφαρμόζεται στη μηχανική πετρελαίου αναπτύχθηκε από τον Archie το 1942 και ονομάζεται επισήμως εξίσωση Archie. Αυτή η εμπειρική εξίσωση προέκυψε καθαρά για ηλιόλιθους σε ένα εύλογο εύρος κορεσμού νερού και πορώδους. Στην πράξη, η εξίσωση Archie θα πρέπει να τροποποιηθεί σύμφωνα με τις ιδιότητες των πετρωμάτων: περιεχόμενο αργίλου, τη διαβρεξιμότητα, την κατανομή μεγέθους πόρων και ούτω καθεξής. Τα παρακάτω είναι μια σύντομη παρουσίαση των κύριων ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων δεξαμενής και των σχετικών παραμέτρων.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

Η πιο θεμελιώδης ιδέα που αφορά τις ηλεκτρικές ιδιότητες των πετρωμάτων είναι ο συντελεστής σχηματισμού F, ο οποίος ορίζεται από τον Archie ως:

$$F = \frac{R_o}{R_w}$$

EIK.7

Όπου:

R_o είναι η αντίσταση (αντίθετη από την αγωγιμότητα) του βράχου όταν κορεσθεί στο 100% με άλμη που εκφράζεται σε $\Omega \text{ m}$

R_w είναι η αντίσταση (αντίθετη της αγωγιμότητας) της άλμης κορεσμού σε $\Omega \text{ m}$

Όπως φαίνεται στην Εξίσωση 7, ο συντελεστής σχηματισμού δείχνει μια σχέση μεταξύ της αγωγίμης ροής κορεσμένη με νερό ή άλμη και της αγωγιμότητας νερού. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα του χώρου πόρου του πετρώματος ταμιευτήρα, ο παράγοντας σχηματισμού που ορίζεται από την Εξίσωση 7 δεν εφαρμόζεται άμεσα σε πετρώματα ταμιευτήρων.

ΣΤΡΕΒΛΩΣΗ

Οι Wyllie και Spangler¹³ ανέπτυξαν τη σχέση μεταξύ του συντελεστή σχηματισμού και άλλων ιδιοτήτων των πετρωμάτων, όπως το πορώδες και τη στρέβλωση. Μια σχέση μεταξύ του συντελεστή σχηματισμού, του πορώδους και της ελικοειδούς δύναμης μπορεί να αναπτυχθεί με βάση τον απλό πόρο.

$$F = \frac{\tau}{\phi}$$

EIK.8

¹³ Wyllie, M.R.J. and Spangler, M.B., Application of electrical resistivity measurements to problem of fluid flow in porous media, *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 36, 159, 1952.



Οπου:

τ είναι η στρέβλωση και ορίζεται ως $(\frac{L_a}{L})^2$

L_a είναι το πραγματικό μήκος διαδρομής μέσω των

L είναι το μήκος του πυρήνα

ϕ είναι το πορώδες

Παράγοντας τσιμεντοποίησης

$$F = \frac{R_o}{R_w} = a\phi^{-m}$$

EIK.8

Στην Εξίσωση 8, οι σωστές επιλογές των a και m καθορίζονται καλύτερα από τις μετρήσεις¹⁴ εργαστηρίου. Σαφώς, η εξίσωση 8 έχει ως αποτέλεσμα μια απεριόριστη ειδική αντίσταση σχηματισμού όταν $\phi = 0$ και 1 όταν $\phi = 1$. Εναλλακτικά, αν οι τιμές συντελεστή σχηματισμού και οι τιμές πορώδους είναι γνωστές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια γραφική παράσταση $\log (F)$ έναντι $\log (\phi)$ για την εκτίμηση των παραμέτρων a και m , για ένα δεδομένο τύπο πετρώματος. Η αντίσταση του κορεσμένου πυρήνα είναι κορεσμένη με 100% αλατόνερο και μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας μια γέφυρα αγωγιμότητας

Δείκτης Ανθεκτικότητας

Σε ένα χώρο πόρων που περιέχει υδρογονάνθρακες (αέριο ή πετρέλαιο), και τα δύο από τα οποία είναι μη-αγώγιμα του ηλεκτρισμού, με μια ορισμένη ποσότητα νερού, η αντίσταση είναι συνάρτηση του νερού ή κορεσμός άλμης S_w . Για το δεδομένο πορώδες, στους μερικούς

κορεσμούς άλμης, η ειδική αντίσταση από ένα πέτρωμα είναι υψηλότερο από ότι όταν το ίδιο το πέτρωμα είναι 100% κορεσμένο με άλμη. Ο Archie¹⁴ προσδιόρισε πειραματικά ότι ο συντελεστής αντίστασης ενός σχηματισμού που είναι εν μέρει κορεσμένος με άλμη μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{R_o}{R_t} = (S_w)^n$$

ΕΙΚ.9

Όπου:

R_o είναι η αντίσταση του ίδιου του πετρώματος όταν είναι πλήρως κορεσμένο με άλμη που εκφράζεται σε $\Omega \text{ m}$

R_t είναι η ειδική αντίσταση του πετρώματος όταν είναι εν μέρει κορεσμένο με άλμη και εκφράζεται σε $\Omega \text{ m}$

n είναι ο εκθέτης κορεσμού

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Η ηλεκτρική αντίσταση ενός πορώδους μέσου μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από σημαντικούς παράγοντες όπως η διαβρεξιμότητα και το ιστορικό κορεσμού, επειδή ελέγχουν την τοποθεσία και τη διανομή των ρευστών. Η πιο ολοκληρωμένη ανασκόπηση της επίδρασης της διαβρεξιμότητας για τις ηλεκτρικές ιδιότητες πορώδους μέσου παρουσιάστηκε από τον Anderson¹⁵ ως μέρος μιας σειράς δημοσιεύσεων σχετικά με την επίδραση της διαβρεξιμότητας

¹⁴ Anderson, W.G., Wettability literature survey—Part 3: The effects of wettability on the electrical properties of porous media, *Journal of Petroleum Technology*, 38, 1371–1378, 1986.

¹⁵ Mungan, N. and Moore, E.J., Certain wettability effects on electrical resistivity in porous media, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 7, 20–25, 1968.

σε διάφορες ιδιότητες των πετρωμάτων. Στην πραγματικότητα, η παράμετρος που επηρεάζεται σημαντικά από τη διαβρεξιμότητα είναι ο κορεσμός του εκθέτη n λόγω της εξάρτησής του από τη διανομή της αγωγίμης φάσης στο πορώδες μέσο, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από τη διαβρεξιμότητα του συστήματος. Η αβεβαιότητα στον εκθέτη κορεσμού μπορεί να επηρεάσει άμεσα τον υπολογισμό του κορεσμού του νερού και να οδηγήσει σε σφάλματα στον υπολογισμό των υδρογονανθράκων που υπάρχουν.

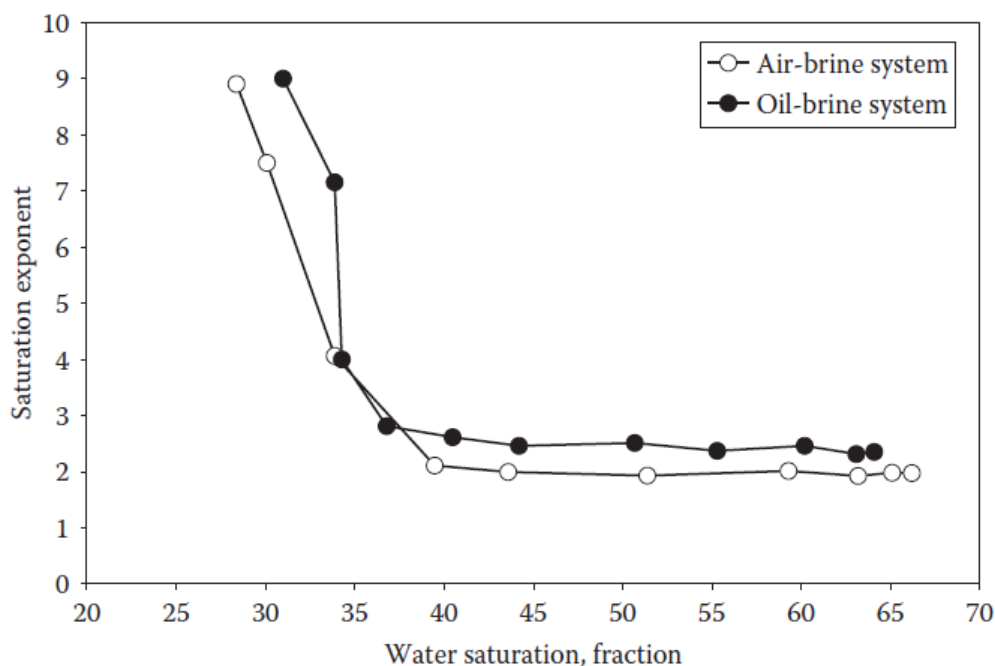
Η εξέταση της επίδρασης της διαβρεξιμότητας του Anderson¹⁵ στον εκθέτη κορεσμού βασικά οδήγησε στα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα:

1. Ο εκθέτης κορεσμού είναι ουσιαστικά ανεξάρτητος από τη διαβρεξιμότητα του συστήματος όταν ο κορεσμός άλμης είναι αρκετά υψηλός για να σχηματίσει ένα συνεχές φιλμ επιφανειών κόκκων του πορώδους μέσου. Η ταινία παρέχει μια συνεχή διαδρομή για ροή ρεύματος
2. Αυτός ο τύπος συνέχειας φιλμ είναι κοινός σε καθαρά και ομοιόμορφα υγρά συστήματα. Ο εκθέτης κορεσμού σε τέτοια συστήματα είναι κοντά στο 2 και παραμένει ουσιαστικά σταθερός καθώς το δείγμα πυρήνα είναι ακόρεστο στον μη αγωγίμο κορεσμό του νερού
3. Αυτές οι δύο παρατηρήσεις, ωστόσο, δεν ισχύουν για ομοιόμορφα συστήματα με υγρό πετρέλαιο. Ο εκθέτης κορεσμού παραμένει κοντά στην τιμή 2 έως ένα ορισμένο ελάχιστο κορεσμό νερού. Ωστόσο, καθώς ο πυρήνας γίνεται ακόρεστος από αυτόν τον ελάχιστο κορεσμό νερού, παρατηρείται ταχεία αύξηση στον κορεσμό. Οι τιμές του n είναι τόσο υψηλές όσο 9 σε μη αναγώγιμες ο κορεσμός του νερού δεν είναι ασυνήθιστο.
4. Η ταχεία αύξηση του εκθέτη κορεσμού με μειωμένο κορεσμό άλμης για υγρά συστήματα πετρελαίου αποδίδεται σε αύξηση της αντίστασης του συστήματος. Η αύξηση της ειδικής αντίστασης οφείλεται στην αποσύνδεση και την παγίδευση του τμήματος του αλατόνευρου από το πετρέλαιο. Το αποσυνδεδεμένο τμήμα της άλμης προφανώς δεν συνεισφέρει πλέον στη ροή του ρεύματος επειδή περιβάλλεται από πετρέλαιο που δεν είναι αγωγίμο, τελικά με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης του συστήματος

Οι Mungan και Moore¹⁶ μελετούσαν τις επιδράσεις της διαβρεξιμότητας στην ειδική αντίσταση χρησιμοποιώντας Teflon® πυρήνα. Τα δύο ζεύγη

¹⁶ Moore, J., Laboratory determined electric logging parameters of the Bradford Third sand, *Producers Monthly*, 22, 30–39, 1958.

ρευστών χρησιμοποιήθηκαν είναι αέριο-άλμη και πετρέλαιο-άλμης. Η άλμη είναι τότε σε μη αγωγίμη φάση, χωρίς να αναμιχθεί με το νερό, συμπεριφέροντας με τρόπο παρόμοιο με την άλμη σε έναν υγρό πυρήνα πετρελαίου. Ο κορεσμός Οι εκθέτες για τα δύο συστήματα φαίνονται στο Σχήμα 11. Μια εξέταση του Mungan και τα δεδομένα του Moore που φαίνονται στο Σχήμα 11 δείχνουν τι συμβαίνει συνήθως ένα σύστημα υγρού-πετρελαίου καθώς ο κορεσμός άλμης μειώνεται. Πάνω από μια συγκεκριμένη φάση ο κορεσμός είναι αρκετά σταθερός και είναι κοντά στο 2. Ωστόσο, κάτω από αυτόν τον κορεσμό, ο εκθέτης αρχίζει να αυξάνεται γρήγορα με μικρή μείωση στον κορεσμό του νερού. Για παράδειγμα, τα στοιχεία των Mungan και Moore δείχνουν ότι για μείωση του κορεσμού του νερού από 34,3% σε 33,9% στην περίπτωση συστήματος πετρελαίου-άλμης, ο εκθέτης κορεσμού αυξάνεται από 4 σε 7,15 και τελικά φθάνει σε τιμή 9 σε κορεσμό νερού 31%. Μια παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται στην περίπτωση ενός συστήματος αέρα-άλμης.



ΕΙΚ.11 Η μεταβολή του εκθέτη κορεσμού n , ως συνάρτηση της άλμης (διεξαγωγή, μη υγροποιημένη φάση) κορεσμό για ένα σύστημα υγρού υγρού¹⁷.

Ο Anderson¹⁸ συνιστά επίσης ότι εκτός εάν είναι γνωστό ότι ο ταμειευτήρας είναι ισχυρά υγρός, ο εκθέτης κορεσμού θα πρέπει να μετράται σε φυσική ή αποκατεστημένη κατάσταση πυρήνες. Ο Anderson δηλώνει επίσης ότι εάν χρησιμοποιείται ένας καθαρός πυρήνας για να

¹⁷ Chen, G., Personal communication, University of Alaska, Fairbanks, 2005..

¹⁸ Wyllie, M.R.J., Formation factors of unconsolidated porous media: Influence of particle shape and effect of cementation, *Transactions AIME*, 198, 103–110, 1953

μετρήσει τον κορεσμό εκθέτης και η δεξαμενή είναι στην πραγματικότητα πετρέλαιο υγρή, ο κορεσμός του νερού μπορεί να υποτιμηθεί κατά την καταγραφή. Αυτά τα συμπεράσματα του Anderson βασίστηκαν στο έργο του Moore¹⁹. Εξετάστηκαν τα αποτελέσματα του, για τον καθαρισμό στον εκθέτη κορεσμού Archie της τρίτης άμμου του Μπράντφορντ, που είναι γνωστό ότι είναι υγρό πετρέλαιο. Ο Moore μελέτησε έξι ζεύγη γειτονικών βυσμάτων πυρήνα. ένα βύσμα πυρήνα από κάθε σετ εξήχθη με το τολουόλιο, καθιστώντας το πιο υγρό στο νερό, ενώ ο άλλος πυρήνας δεν εξαντλήθηκε και άφησε υγρό πετρέλαιο.

Στην περίπτωση κάθε βύσματος πυρήνα, βρέθηκε ότι η εκχύλιση μειώνει σημαντικά τον κορεσμό του εκθέτη. Στην περίπτωση των μη εξωθημένων βυσμάτων πυρήνα, παρατηρήθηκε ότι ο εκθέτης κορεσμού ήταν μεγαλύτερος από τα εξαγόμενα δείγματα.

Είναι προφανές ότι διαφορές στον υπολογισμό του κορεσμού του νερού θα είχαν προφανώς αντίκτυπο στον προσδιορισμό του κορεσμού των υδρογονανθράκων. Ωστόσο, ο Moore²⁰, μέτρησε την ειδική αντίσταση των μη διεγειρόμενων πυρήνων μόνο για κορεσμούς με άλμη μεγαλύτερους από 35%. Επομένως, είναι αρκετά πιθανό ότι ο εκθέτης κορεσμού θα είχε δείξει μια ταχεία αύξηση σε χαμηλότερους κορεσμούς άλμης, όπως παρατηρήθηκε από το Mungan και Moore¹⁵.

Τα άλατα αργίλου που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα - ταμιευτήρα δρουν ως χωριστοί αγωγοί και αναφέρονται ως αγωγή στερεά. Στην πραγματικότητα, το νερό στην άργιλο και τα ιόντα στο νερό ενεργούν ως αγωγή υλικά. Η επίδραση της αργίλου στην ειδική αντίσταση του πετρώματος εξαρτάται από την ποσότητα, τον τύπο και τον τρόπο διανομής της αργίλου στο πέτρωμα. Η παρουσία αγωγίμων στερεών ή αργίλων σε πετρώματα - ταμιευτήρες απαιτεί μια διαφορετική προσέγγιση για τον υπολογισμό του συντελεστή σχηματισμού. Όσον αφορά την επίδραση των αργίλων στις ηλεκτρικές ιδιότητες, οι έρευνες του Wyllie²¹ έδειξε ότι οι άργιλοι συμβάλλουν σημαντικά στην αγωγιμότητα ενός πετρώματος όταν το πέτρωμα είναι κορεσμένο με χαμηλής αγωγιμότητας νερό. Ο παράγοντας σχηματισμού μιας αργιλώδους άμμου αυξάνεται με τη μείωση της αντίστασης του νερού και προσεγγίζει μια σταθερή τιμή σε ένα νερό αντίστασης περίπου 0,1 Ω m, ενώ ο συντελεστής σχηματισμού μιας καθαρής άμμου (χωρίς άργιλο) παραμένει σταθερή σε όλο το φάσμα των αντιστάσεων του νερού. Για τον προσδιορισμό του παράγοντα σχηματισμού πετρωμάτων με άργιλο, ο

¹⁹ Labrie, D. and Conlon, B. Hydraulic and poroelastic properties of porous rocks and concrete materials, American Rock Mechanics Association (ARMA) paper number 08-182.

²⁰ Geertsma, J., The effect of fluid pressure decline on volumetric changes of porous rocks, *Transactions AIME*, 210, 331-340, 1957.

²¹ Ahmed, T., *Reservoir Engineering Handbook*, Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, 2001.

Wyllie¹⁷ πρότεινε ότι η παρατηρούμενη επίδραση των ορυκτών αργίλου ήταν παρόμοια με την ύπαρξη δύο ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε παράλληλη σύνδεση, δηλαδή τα αγωγίμα ορυκτά αργίλου και τους πόρους γεμάτους με νερό. Επομένως,

$$\frac{1}{R_{oa}} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_o}$$

ΕΙΚ.12

Όπου:

R_{oa} είναι η αντίσταση του αργιλώδους πετρώματος 100% κορεσμένο με νερό της ειδικής αντίστασης

R_w & R_c είναι η ειδική αντίσταση λόγω των ορυκτών της αργίλου

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΡΕΥΣΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

Τα ρευστά των πετρελαϊκών ταμιευτήρων από πολύ γενική άποψη αναφέρονται ευρέως στη φάση του υδρογονάνθρακα και του νερού που υπάρχουν κάτω από διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης σε υπόγειους σχηματισμούς ή ταμιευτήρες πετρελαίου. Νερό ή ειδικά σχηματισμένο νερό ή αλατόνερο ή νερό μέσα σε πετρελαϊκό σχηματισμό, υπάρχει σε ενδιάμεση μορφή. Ωστόσο, η επίδρασή της στη συμπεριφορά φάσης και στις ιδιότητες της φάσης υδρογονανθράκων είναι μικρής σημασίας²², δεδομένης ιδίως της χαμηλής αμοιβαίας διαλυτότητάς τους. Επομένως, από μια πρακτική, συμβατική προοπτική της μηχανικής του ταμιευτήρα, ο όρος ρευστά ταμιευτήρων πετρελαίου γενικά αναφέρονται στη φάση των υδρογονανθράκων σε ταμιευτήρα πετρελαίου, δεδομένου ότι αντιμετωπίζεται ανεξάρτητα από την υδατική φάση²².

Οι υδρογονάνθρακες που υπάρχουν στους ταμιευτήρες πετρελαίου είναι κυρίως ένα μείγμα διαφορετικών τύπων χημικών ενώσεων που αποτελούνται από άνθρακα και υδρογόνο και, ως εκ τούτου, η λέξη

²² Danesh, A., *PVT and Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids*, Elsevier Science, Amsterdam, the Netherlands, 1998.

υδρογονάνθρακες. Επιπροσθέτως, τα συστατικά που δε σχετίζονται με υδρογονάνθρακες είναι επίσης παρόντα. Βασικά, οι υδρογονάνθρακες στους ταμιευτήρες πετρελαίου μπορεί να υπάρχουν είτε σε αέρια (που αποτελούνται κυρίως από μικρότερα μόρια) ή σε υγρή (που συντίθεται κυρίως από μεγαλύτερα μόρια) φάση ή κατάσταση, η οποία υπαγορεύεται από τη χημική σύνθεση και τις επικρατούσες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Ως εκ τούτου, σχεδόν όλοι οι υδρογονάνθρακες παράγονται από τους ταμιευτήρες σε αέρια και/ή υγρή κατάσταση και αναφέρονται ευρέως ως φυσικό αέριο ή αργό πετρέλαιο, ή μερικές φορές ως ταμιευτήρες αέριων ή πετρελαίων. Αυτοί οι ταμιευτήρες απλά ονομάζονται ταμιευτήρες αερίου ή πετρελαίου η μετέπειτα ως: (1) ξηρό αέριο, (2) υγρό αέριο, (3) συμπύκνωμα αερίου, (4) πτητικό πετρέλαιο και (5) ταμιευτήρες μαύρου πετρελαίου: τα υγρά που υπάρχουν σε αυτά συνήθως γνωστά ως τα πέντε ρευστά ταμιευτήρα όπως ορίζονται από τον McCain²³.

ΧΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Παρόλο που όλα τα ρευστά του ταμιευτήρα πετρελαίου αποτελούνται από χημικές ενώσεις άνθρακα και υδρογόνου, η χημεία τους διαφέρει ευρέως από το ένα ρευστό στο άλλο, με δεδομένη τη μεταβολή στον τύπο των χημικών ενώσεων και την ποσότητα στην οποία αυτές είναι παρούσες. Δεδομένου ότι τα αέρια των ταμιευτήρων γενικά περιέχουν μικρότερα μόρια, αυτή η διακύμανση μπορεί να μην είναι πολύ σημαντική και η χημική περιγραφή είναι σχετικά πιο εύκολη στο να γίνει. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει με τα πετρέλαια του ταμιευτήρα επειδή αποτελούνται από μεγαλύτερα μόρια με τα οποία η χημική πολυπλοκότητα αυξάνεται σημαντικά κάνοντας κάθε πετρέλαιο μοναδικό στη φύση.

Μια λεπτομερής χημική περιγραφή του πετρελαίου του ταμιευτήρα ή αργού πετρελαίου είναι πρωταρχικής σημασίας στη βιομηχανία downstream (διύλισης πετρελαίου) · ωστόσο, αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας δεν έχει μεγάλη σημασία στην βιομηχανία upstream (εξερεύνηση και παραγωγή). Επομένως, η χημεία (ειδικά τα μεγαλύτερα μόρια) των ακατέργαστων πετρελαίων περιγράφεται κανονικά σε όρους συστατικών των υδρογονανθράκων που ανήκουν στο ίδιο δομικό

²³ McCain, W.D., Jr., *The Properties of Petroleum Fluids*, PennWell Publishing Co., Tulsa, OK, 1990.

στοιχείο κατηγορία ή ομάδα, ενώ εντοπίστηκαν και αναφέρθηκαν μικρότερα μόρια ή συστατικά που είναι διακεκριμένα ή μεμονωμένα. Σύμφωνα με τους Danesh και Riazi ²⁴, οι κύριες κατηγορίες των υδρογονανθράκων είναι (1) αλκάνια, (2) αλκένια, (3) ναφθένες ή κυκλοπαραφίνες και (4) αρωματικά. Τα πρώτα τρία αναφέρονται μερικές φορές ως αλειφατικά. Οι Tissot και Welte ²⁵, ωστόσο, δηλώνουν ότι οι ολεφίνες (αλκένια) ουσιαστικά απουσιάζουν και δεν συναντώνται συχνά στους φυσικούς υδρογονάνθρακες.

Εκτός από αυτές τις κατηγορίες υδρογονανθράκων, τα ρευστά του πετρελαϊκού ταμιευτήρα περιέχουν επίσης άζωτο, οξυγόνο, θείο και μέταλλα όπως το νικέλιο και το βανάδιο (και τα δύο μέταλλα στις μεταβλητές ποσότητες από 1 μέχρι 1200 ppm). Ο Danesh αναφέρει ότι οι ταμιευτήρες αερίου που περιέχουν κυρίως άζωτο (N₂), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και υδρόθειο (H₂S) έχουν επίσης ανακαλυφθεί. Μεγάλο μοριακό βάρος συστατικό των πετρελαίων συνήθως περιέχουν ενώσεις αζώτου, θείου και οξυγόνου, οι οποίες αναφέρονται ως ρητίνες και τα ασφαλτένια. Ονομάζονται αέρια ή πετρέλαια που περιέχουν υδρόθειο και τοξικά αέρια.

ΣΤΕΡΕΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Ένας από τους γενικούς πρωταρχικούς στόχους της βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι η συνεχής αδιάλειπτη ροή υδρογονανθράκων από τους χώρους των πόρων των ταμιευτήρων μέσω των σωλήνων παραγωγής, στις εγκαταστάσεις διαχωρισμού και επεξεργασίας και από τους αγωγούς στα διυλιστήρια.

Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, αυτό δεν συμβαίνει λόγω των χαρακτηριστικών σύνθεσης των υδρογονανθράκων, του νερού και των διαφόρων συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης σε διαφορετικές θέσεις που παράγουν ή καθιζάνουν ανεπιθύμητο "στερεό υδρογονάνθρακα" που επηρεάζει αρνητικά την upstream (παραγωγή), τη midstream (μεταφορά), καθώς και τη downstream (διύλιση), δραστηριότητες που ουσιαστικά εμποδίζουν την υποδομή ροής και διάφορους εξοπλισμούς διεργασίας. Οι στερεές φάσεις υδρογονανθράκων τυπικά περιλαμβάνουν τα ένυδρα

²⁴ Riazi, M.R., *Characterization and Properties of Petroleum Fractions*, American Society for Testing and Materials, Baltimore, MD, 2007.

²⁵ Tissot, B.P. and Welte, D.H., *Petroleum Formation and Occurrence*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1984, p. 699.

αέρια, τα κεριά και τα ασφαλτένια, ενώ τα διαμαντοειδή είναι κάπως λιγότερο κοινά. Οι περιορισμοί στην υποδομή ροής ρευστών που προκαλούνται από τη δημιουργία αυτών των στερεών φάσεων, οι οποίες είναι κάπως παρόμοιες με την αρτηριακή απόφραξη που περιορίζει τη ροή του αίματος στα ανθρώπινα σώματα. Επομένως, στερεά συστατικά θεωρούνται συνήθως ενοχλητικά σε όλες σχεδόν τις δραστηριότητες της βιομηχανίας πετρελαίου και φυσικού αερίου.

ΥΔΡΑΤΜΟΙ ΑΕΡΙΟΥ

Ο Sloan²⁶ έχει ορίσει ενυδατωμένα αέρια ως "συσσωματώματα αερίου" που είναι κρυσταλλικές ενώσεις, που συμβαίνουν όταν το νερό σχηματίζει μια δομή με κλουβί γύρω από μικρότερα φιλοξενούμενα μόρια. Οι υδρατμοί αερίου του τρέχοντος ενδιαφέροντος αποτελούνται από νερό και μόρια όπως το μεθάνιο, το αιθάνιο, το προπάνιο, το ι-βουτάνιο και το ν-βουτάνιο ή ένα μείγμα που αποτελείται από μερικά ή όλα από αυτά τα συστατικά υδρογονανθράκων. Ο σχηματισμός υδρατμών είναι μια πιθανότητα όταν υπάρχει νερό στην περιοχή των μορίων αυτών σε θερμοκρασίες άνω και κάτω των 32 ° F. Η φάση και η συμπεριφορά των ενυδατωμένων αερίων απεικονίζεται σε διάγραμμα θερμοκρασίας πίεσης (PT) που μοιάζει πολύ με την καμπύλη πίεσης ατμών για ένα καθαρό συστατικό. Σημεία που βρίσκονται στην καμπύλη PT αντιπροσωπεύουν μια ισορροπία μεταξύ αερίου, ύδατος και φάσης ένυδρου, ενώ εκείνα κάτω από την καμπύλη PT αντιπροσωπεύουν μια ισορροπία μεταξύ αερίου και νερού (δηλ., χωρίς ένυδρα άλατα). Εντούτοις, η καμπύλη PT για ένυδρα μπορεί να μεταβληθεί ευνοϊκά από έγχυση αναστολών ή προσθήκη θερμότητας με αποτέλεσμα την επέκταση της ασφαλούς λειτουργίας από περιοχή με υδρατμούς σε περιοχή χωρίς υδρατμούς.

Η μεταφορά ακατέργαστων αερίων υδρογονανθράκων, πετρελαίου και ρευμάτων νερού για μεγάλο χρονικό διάστημα οι αποστάσεις (της τάξης πολλών μιλίων) είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό του υπεράκτιου πετρελαίου και φυσικού αερίου παραγωγή. Τα παραγόμενα τριφασικά ρεύματα ταξιδεύουν συνήθως από το φρεάτιο μέσω μακρών γραμμών ροής και αναδύσεων σε μια πλωτή αποθήκευση παραγωγής και εκφόρτωσης (FPSO). Αν και στις καλύτερες συνθήκες, οι υγρές φάσεις

²⁶ Sloan, E.D., *Hydrate Engineering*, Monograph 21, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, 2000.

είναι σχετικά συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, θερμοκρασίες περιβάλλοντος βυθού 40°F - 50°F και οι μεγάλες αποστάσεις μπορεί να προκαλέσουν ουσιαστική ψύξη των ρευστών παρά τις παχιές μονώσεις. Αυτό το "cooldown" μπορεί να προσφέρει δυνητικά ευνοϊκές συνθήκες οδηγώντας στον σχηματισμό ανεπιθύμητης "φάσης υδρατμών αερίου", η οποία μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες στην κανονική λειτουργία (δηλαδή, αποκλεισμό) της υποθαλάσσιας ροής, με το σχηματισμό βουλώματος υδρατμών. Ο Sloan στη μονογραφία του για την ένδρη μηχανική έχει συζητήσαν αρκετές περιπτώσιολογικές μελέτες που αφορούν την απόφραξη που προκαλείται από τα συμφόρηση υδρατμών αερίου.

ΚΕΡΙΑ

Η καθίζηση βαρέων παραφινών υψηλού μοριακού βάρους (κυρίως στην περιοχή του C_{18} - C_{65}) ή απλά κεριά επηρεάζονται κυρίως από τη θερμοκρασία και γενικά θεωρούνται προβληματικά καθώς φράζουν τη σωλήνωση της παραγωγής, τις επιφανειακές διαχωριστικές εγκαταστάσεις και τους αγωγούς. Η πίεση έχει επίσης επιρροή στο ότι σε ανυψωμένες πιέσεις, τα ελαφρύτερα συστατικά παραμένουν σε μια διαλυμένη κατάσταση μαζί με τις παραφίνες υψηλού μοριακού βάρους και συνεπώς προστατεύονται από την καταβύθιση. Ωστόσο, καθώς παράγονται ρευστά ταμιευτήρα, τα ελαφρύτερα συστατικά αρχίζουν να εξελίσσονται από την υγρή φάση λόγω αποσυμπίεσης, αφήνοντας έτσι την υγρή φάση λόγω της καθίζησης κεριού. Παρόμοια με το σχηματισμό υδρατμών, συνθήκες για την καταβύθιση των κηρών είναι ιδιαίτερα ευνοϊκά σε ένα υπεράκτιο περιβάλλον λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών του βυθού.

Η τάση εναπόθεσης κεριού ενός ρευστού ταμιευτήρα χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση κεριού ή τη θερμοκρασία καθίζησης (WAT ή WPT), δηλαδή τη χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία εμφανίζεται κεριό όταν το δείγμα ψύχεται σε ένα ορισμένο ρυθμό. Το κεριό οι συνθήκες καθίζησης για ένα δεδομένο ρευστό δεξαμενής εκφράζονται γενικά σε ένα PT διάγραμμα ως καμπύλη ισορροπίας στερεού-υγρού (SL) και ατμού στερεού-υγρού (SLV) ο τα σημεία που βρίσκονται στις αντίστοιχες καμπύλες υποδηλώνουν ισορροπία μεταξύ στερεών (κεριών) και υγρή φάση και στερεή, υγρή και αέρια φάση, αντίστοιχα. Σημεία στο δεξί χέρι πλευρά SL και SLV υποδηλώνουν είτε την εξάτμιση ενός υγρού είτε την ισορροπία LV ανάλογα σχετικά με την πίεση.

Ο Ekweribe ²⁷ δήλωσαν ότι το πρόβλημα που σχετίζεται με την καθίζηση του κεριού είναι ένα θέμα τεράστιας πρακτικής σημασίας, διότι τα περισσότερα ακατέργαστα πετρέλαια βρίσκονται σε πολλά μέρη του κόσμου, συμπεριλαμβανομένης της Βόρειας Θάλασσας, της Μέσης Ανατολής, της Αυστραλασίας, της Βόρειας Αφρικής, της Δύσης Την Αφρική, την Αλάσκα, την Ινδονησία και την Κίνα, και είναι κηρώδεις. Περιεκτικότητα σε κερί αργού πετρελαίου έχει αναφερθεί ότι είναι τόσο χαμηλό όσο το 1% στη νότια Λουιζιάνα και έως και το 50% Altamont, Utah ²⁷. Ένα από τα αξιοσημείωτα και περίεργα περιστατικά κηρώδους πετρελαίου είναι το πετρέλαιο από το πεδίο της Mangala στην Ινδία, με περιεκτικότητα σε κερί 30% κατά βάρος και WAT ~ 60 ° C, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στη μέση θερμοκρασία ταμιευτήρα 65 ° C.²⁸ Είναι προφανές ότι αυτά τα χαρακτηριστικά πετρελαίου δημιουργούν ανησυχίες σχετικά με τη διασφάλιση ροών σε ολόκληρη την περιοχή καθώς ολόκληρο το σύστημα παραγωγής ξεκινώντας από το σχηματισμό του ταμιευτήρα μπορεί να συμβεί εξαιτίας της εγκατάλειψης κεριού επί τόπου λόγω ψύξης εάν νερό με θερμοκρασία περιβάλλοντος εγχύθηκε για να προκαλέσει πλημμύρα.

ΑΣΦΑΛΤΙΝΕΣ

Η καθίζηση των ασφαλτενίων γενικά πραγματοποιείται με μεταβολές της θερμοκρασίας, της πίεσης και της σύνθεσης του πετρελαίου. Η μεταβολή της σύνθεσης οφείλεται κατά κύριο λόγο στην έγχυση διοξειδίου του άνθρακα ή αερίου υδρογονανθράκων που είναι αναμίξιμα με το πετρέλαιο. Η κατάσταση υπό την οποία αρχίζει η καθίζηση ονομάζεται εμφάνιση καθίζησης ασφάλτου, και αν η διαδικασία συνεχίσει, τότε αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση του ιζήματος τελικά οδηγώντας στην εναπόθεση του χώρου των πόρων των ταμιευτήρων, στην παραγωγή σωληνώσεων, επιφανειακού εξοπλισμού ή αγωγών. Γενικά υποτίθεται ότι τα ασφαλτένια δεν διαλύονται σε πετρέλαιο αλλά διασκορπίζονται / αιωρούνται στο ρευστό ως κολλοειδή.

Συνήθως, διεξάγονται δύο διαφορετικές εργαστηριακές δοκιμές σε σχέση με τα ασφαλτένια : 1) προσδιορισμός των συνολικών ασφαλτενίων στο πετρέλαιο, βάσει τυποποιημένων μεθόδων ASTM D2007 ή IP143,

²⁷ Ekweribe, C., Civan, F., Lee, H.S., and Singh, P., Interim report on pressure effect on waxy-crude pipeline-restart conditions investigated by a model system, *SPE Projects, Facilities & Construction*, 4(3), 61–74, 2009

²⁸ Kumar, S., Tandon, R., Beliveau, D., Kumar, P., and Vermani, S., Hot water injection pilot: A key to the waterflood design for the waxy crude of the mangala field, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 12622.

εκφρασμένες σε γραμμάρια στερεών ανά 100 mL, και (2) δοκιμές σταθερότητας πετρελαίου που περιλαμβάνουν τιτλοποίηση της εμφάνισης κροκύδωσης του πετρελαίου με ν παράγοντα κατακρημνίσεως όπως ν-επτάνια επειδή τα ασφαλτένια είναι αδιάλυτα σε χαμηλά μοριακά βάρη παραφινών, δίνοντας μια ένδειξη της ισχύος διαλύτη του πετρελαίου σε σχέση με την τάση της για την καθίζηση ή την εναπόθεση ασφαλτενίων.

Προτείνεται ότι οι ρητίνες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαλυτότητα των ασφαλτενίων και πρέπει να είναι παρόντα για να παραμείνουν σε διαλυμένη μορφή. Τα ρευστά πετρελαίων με υψηλή περιεκτικότητα σε ρητίνη είναι σχετικά σταθερά.²⁹ Οι ρητίνες θεωρούνται μοριακές πρόδρομοι των ασφαλτενίων. Αντίθετα με τα ασφαλτένια, οι ρητίνες θεωρούνται διαλυτές στο ρευστό πετρελαίου. Επομένως, η θερμοκρασία, η πίεση και οι αλλαγές στη σύνθεση, μεταβάλλουν την ισορροπία μεταξύ ρητινών και ασφαλτενίων, δημιουργώντας έτσι προβλήματα καθίζησης ασφάλτου και προβλήματα εναπόθεσης.

Ο Cenegy³⁰ αναφέρει ότι ορισμένα από τα σοβαρότερα προβλήματα απόθεσης ασφαιρίνης έχουν συσχετιστεί με πεδία στη Βενεζουέλα, τον Περσικό Κόλπο, την Αδριατική Θάλασσα και το Αμερικάνικο Κόλπο του Μεξικού. Τα περισσότερα από τα αναφερόμενα προβλήματα αφορούν την αποσταθεροποίηση των ασφαλτενίων κατά τη διάρκεια των παραγωγικών διαδικασιών που έχουν ως αποτέλεσμα την προσκόλληση των γεωτρήσεων και των σωληνώσεων παραγωγής. Ο Eskin³¹ στην πρόσφατη εργασία του ανέφερε δύο γνωστά άρθρα που περιέχουν δεδομένα πεδίου σχετικά με την απόθεση ασφαλτενίων: μία στο πεδίο Hassi Messaoud³² και το άλλα στον τομέα του Δυτικού Κουβέιτ³³. Στον τομέα του Hassi Messaoud, σε ορισμένες περιπτώσεις, το μέγιστο πάχος της στιβάδας απόθεσης έφθασε τα 2/3 της ακτίνας της σωλήνωσης ενός σωλήνα διαμέτρου 4,5 ιντσών, ενώ στο πεδίο του Δυτικού Κουβέιτ, το πάχος αποθέματος έφθασε στο 1/3 περίπου του σωλήνα ακτίνα ενός σχετικά μικρού σωλήνα διαμέτρου 2,5 ιντσών που

²⁹ Hammami, A. and Ratulowski, J., Precipitation and deposition of asphaltenes in production systems: A flow assurance overview, *Asphaltenes, Heavy Oils, and Petroleomics*, Mullins, O.C., Sheu, E.Y., Hammami, A., and Marshall, A.G., (Eds.), Springer, New York, 2007, Chapter 23.

³⁰ Cenegy, L.M., Survey of successful world-wide asphaltene inhibitor treatments in oil production fields, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 71542, New Orleans, LA, 2001,

³¹ Eskin, D., Ratulowski, J., Akbarzadeh, K., and Andersen, S., Modeling of asphaltene deposition in a production tubing, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 58, 2936–2948, 2011, published online in Wiley online library (wileyonlinelibrary.com).

³² Haskett, C.E. and Tartera, M., A practical solution of the problem to the asphaltene deposits-Hassi Messaoud field, Algeria, *Journal of Petroleum Technology*, 17, 387–391, 1965.

³³ Alkafef, S.F., Al-Medhadi, F., and Al-Shammari, A.D., A simplified method to predict and prevent asphaltene deposition in oilwell tubings: Field case, *SPE Production & Facilities*, 20, 126–132, 2005.

προκαλεί σημαντική αύξηση σε απώλειες λόγω τριβής. Προφανώς, το στρώμα εναπόθεσης ασφατενίων μειώνει την διατομή του σωλήνα που μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του ρυθμού ροής, σε αυξημένη πτώση πίεσης που μπορεί να συμβεί τελικά θα οδηγήσει σε πλήρη σύνδεση.

ΔΙΑΜΑΝΤΟΕΙΔΗ

Οι πραγματικές περιπτώσεις πεδίου που αναφέρουν την εναπόθεση διαμαντοειδών είναι πολύ λίγες. Αυτοί συνήθως καταβυθίζονται απευθείας από την αέρια φάση. Το διαμαντοειδές περιέχει κυρίως κορεσμένα, κυκλικές ενώσεις υδρογονανθράκων με δομή διαμαντιού, εξ ου και το όνομα διαμαντοειδή. Ο Holder³⁴ περιγράφει τη σύσταση των διαμαντοειδών με μια χημική φόρμουλα $C_{4n} + 6H_{4n + 12}$: με τα πρώτα τρία μέλη να είναι αδαμαντίνη ($n = 1$), διαμαντίνη ($n = 2$) και τριαμαντίνη ($n = 3$), τα οποία είναι παραδείγματα διαμαντοειδών. Ο King³⁵ ανέφερε λευκή στερεή απόθεση που πέφτει από το ρεύμα αερίου, από το φυσικό αέριο Hanlan Swan Hills στην τοποθεσία Alberta, στο σταθμό αφυγραντήρα, το οποίο αναλύθηκε ως 95% διαμαντίνη.

ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΩΝ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ

Τα αέρια και τα πετρέλαια της δεξαμενής μπορούν γενικά να ταξινομηθούν ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, τα χαρακτηριστικά τους και τις φυσικές τους ιδιότητες. Αέρια ταμιευτήρων (ή μερικές φορές ονομαζόμενα και ως φυσικά αέρια) περιέχουν κυρίως ελαφρύτερο υδρογονάνθρακα με συστατικά παραφίνης, που αποτελούνται από το μεθάνιο σε ποσότητα και ακολουθείται τυπικά από αιθανίο μέσω εξανίου, περιστασιακά από ένα μικρό κλάσμα βαρύτερων υδρογονανθράκων και ορισμένοι μη-υδρογονάνθρακες όπως διοξείδιο

³⁴ Holder, G.D., Enick, R.M., Jones, J.W., Reiser, J.A., and LeBlond, C.R., Dynamic gas hydrate formation and properties of diamondoids, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 26164, Pittsburgh, PA, 1993.

³⁵ King, W.J., Operating Problems in the Hanlan Swan Hills Gas Field, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 17761.

του άνθρακα, υδρόθειο και άζωτο. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη το περιορισμένο φάσμα των συστατικών και την ανάλυση της σύνθεσης τα ρευστά ταμιευτήρα είναι σχετικά εύκολο να εντοπιστούν και αυτό επιτυγχάνεται εύκολα με τεχνικές όπως χρωματογραφία αερίου. Όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες, η βαρύτητα του αερίου (αναλογία με το είδος του αερίου και την πυκνότητα του αέρα) χρησιμοποιείται συνήθως ως παράμετρος χαρακτηρισμού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η βαρύτητα του αερίου επηρεάζεται στην πραγματικότητα από τη χημική σύνθεση του αερίου.

Από την άλλη πλευρά, η χημική ταξινόμηση των ταμιευτήρων πετρελαίου ή αργού πετρελαίου δεν είναι ασήμαντο δεδομένης της σύνθετης εισαγωγής που οφείλεται σε μεγάλη γκάμα εξαρτημάτων και ισομερών που συνεχώς αυξάνεται με τον αριθμό των ανθράκων. Ωστόσο, παρόμοια με τη βαρύτητα του αερίου, η βαρύτητα πετρελαίου (λόγος πυκνότητας πετρελαίου και νερού) είναι επίσης εύκολο να οριστεί και χρησιμοποιείται συχνά ως ευρύς φυσικός χαρακτηρισμός της παραμέτρου των πετρελαίων. Και πάλι, πρέπει να σημειωθεί ότι η βαρύτητα του πετρελαίου και οι άλλες φυσικές ιδιότητες επηρεάζονται επίσης από τη χημεία και τη σύνθεση ενός δεδομένου πετρελαίου.

ΤΑ ΠΕΝΤΕ ΡΕΥΣΤΑ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Αν και η ταξινόμηση των ρευστών ταμιευτήρων πετρελαίου ως φυσικό αέριο ή αργό πετρέλαιο μπορεί να είναι ικανοποιητική από πολύ ευρεία προοπτική, είναι σίγουρα ανεπαρκής κατάλληλος χαρακτηρισμός των διαφόρων ιδιοτήτων και συμπεριφορών φάσης από μια δεξαμενή τεχνική άποψη. Επομένως, τα ρευστά ρεζερβουάρ πετρελαίου είναι συμβατικά

κατατάσσονται στους ακόλουθους τύπους:²³

1. Μαύρα πετρέλαια
2. Πτητικά πετρέλαια
3. Συμπυκνώματα αερίου ή ανάδρομα αέρια
4. Υγρά αέρια
5. Ξηρά αέρια

Εκτός από τα προηγούμενα πέντε, μια έκτη κατηγορία ρευστών που ονομάζονται κοντινά κρίσιμα ρευστά μπορεί επίσης να καθοριστεί, η οποία θα μπορούσε να είναι είτε συμπύκνωμα αερίου είτε πτητικό πετρέλαιο. Κάθε ένα από τα πέντε υγρά ταξινομείται με βάση διάφορες ιδιότητες και τη φάση συμπεριφοράς που εμφανίζουν σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα διαφορετικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς ταμιευτήρων και τους μηχανικούς παραγωγής. Το πολύ βασικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό ή την κατηγοριοποίηση αυτών των υγρών ως μαύρα πετρέλαια, πτητικά πετρέλαια, συμπυκνώματα αερίου, υγρά αέρια ή ξηρά αέρια περιλαμβάνουν ιδιότητες όπως το API τη βαρύτητα, το ιξώδες, το χρώμα των υγρών υδρογονανθράκων και τη χημική σύνθεση. Είναι, ωστόσο, πιθανό ότι ορισμένα υγρά μπορεί να μην εμπίπτουν με ακρίβεια σε όλα τα κριτήρια που αναφέρονται εδώ και μπορεί να υπάρχει επικάλυψη. Ως εκ τούτου, σε αυτές τις περιπτώσεις, η ταξινόμηση μπορεί να βασιστεί στον μέγιστο αριθμό που αντιστοιχεί με τα χαρακτηριστικά που παρατίθενται στον Πίνακα 10.2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.2 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ 5 ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ			
Reservoir Fluid	API Gravity (°)	Viscosity (cP)	Color of Stock Tank Liquid ^a
Μαύρα πετρέλαια	15-40	2 με 3-100 και πάνω	σκούρο συχνά μαύρο
Πτητικά πετρέλαια	45-55	0.25-2 με 3	καφέ, πορτοκαλί, ή πράσινο
Συμπυκνώματα αερίου	Πάνω από	Περίπου 0.25	ανοιχτόχρωμο ή άσπρο
Υγρά αέρια	Πάνω από 50	Περίπου 0.25	άσπρο-διαυγες
Ξηρά αέρια	Κανένα υγρό δε δημιουργείται	0.02-0.05	—

Κάθε ένα από τα πέντε υγρά ταξινομείται με βάση διάφορες ιδιότητες και τη συμπεριφορά φάσης που εμφανίζουν σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα διαφορετικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς των ταμιευτήρων και τους μηχανικούς παραγωγής. Το πολύ βασικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό ή την κατηγοριοποίηση αυτών των ρευστών ως μαύρα πετρέλαια, πτητικά πετρέλαια, συμπυκνώματα αερίου, υγρά αέρια ή ξηρά αέρια περιλαμβάνουν ιδιότητες όπως το API τη βαρύτητα, το ιξώδες, το χρώμα των υγρών υδρογονανθράκων και τη χημική σύνθεση. Αυτό ο τύπος ταξινόμησης θεωρείται επίσης ως μέρος

της αναγνώρισης πεδίου, όπως προτείνεται από τον McCain, και παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.2.

ΑΛΛΑ ΡΕΥΣΤΑ ΥΔΡΟΓΟΝΑΘΡΑΚΩΝ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Τα άλλα ρευστά ενδιαφέροντος που περιγράφονται εδώ είναι εκείνα που δεν είναι φυσικά και εκδηλώνονται ή παράγονται απευθείας από ταμιευτήρες, αλλά προσαρμόζονται κυρίως από φυσικά αέρια ή ρεύματα αερίων υδρογονανθράκων μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία και συνθήκες πίεσης. Από πρακτική άποψη, το φυσικό αέριο θεωρείται ένα τελικό προϊόν που προκύπτει από την επεξεργασία ακατέργαστων ρευμάτων αερίων υδρογονανθράκων που βασικά προέρχονται απευθείας από ταμιευτήρες αερίου ή εκείνα που αντιπροσωπεύουν το εκλεπτυσμένο αέριο από τους ταμιευτήρες πετρελαίου. Το φυσικό αέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο με κλασματικά μικρές ποσότητες αιθανίου, προπανίου και βουτανίου. Προφανώς, αυτά είναι ρευστά που έχουν σημασία όσον αφορά τις ιδιότητες του ρευστού και τη συμπεριφορά φάσης ενδιαφερόμενος; Ως εκ τούτου, περιλαμβάνονται εδώ:

- Συμπιεσμένο φυσικό αέριο: Σημαίνει φυσικό αέριο που συμπιέζεται με συμπίεση του σε επαρκώς υψηλές πιέσεις. Σημαντική μείωση στον όγκο του επιτυγχάνεται σε σύγκριση με τον όγκο αερίου υπό κανονικές συνθήκες. Μια μεγάλη μείωση του όγκου είναι επωφελής για την αποθήκευση και τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων φυσικού αερίου. Ωστόσο, λόγω των υψηλών πιέσεων, υπάρχουν ειδικά εμπορευματοκιβωτία που μπορούν να χειριστούν αυτές τις πιέσεις και αποτελούν βασική απαίτηση για το CNG. Στην εποχή μας, το CNG χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο ως καύσιμο για αυτοκίνητα ως υποκατάστατο βενζίνης και ντίζελ κινητήρων εσωτερικής καύσης, δεδομένου των σχετικών χαρακτηριστικών καθαρής καύσης.
- Υγρό φυσικό αέριο: Παρόμοια με το CNG, ο πρωταρχικός στόχος στην υγροποίηση του φυσικού αερίου είναι η επίτευξη μιας σημαντικής μείωσης του όγκου για την αποθήκευση και τη μεταφορά τεράστιων ποσοτήτων φυσικού αερίου. Μια μεγάλη διαφορά μεταξύ του CNG και του LNG είναι, ότι το αέριο παραμένει ως αέρια φάση ακόμη και μετά την συμπίεση, ενώ στο δεύτερο το αέριο μετατρέπεται σε υγρή φάση ψύχοντας το σε κρυογονικές συνθήκες περίπου -250°F , κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση. Μείωση όγκου της τάξης των 600 επιτυγχάνεται

γενικά στο LNG. Πριν χρησιμοποιηθεί το φυσικό αέριο ως καύσιμο, το LNG επαναεξατμίζεται σε αέρια φάση.

- Υγρό αέριο πετρελαίου: Το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG) μπορεί να είναι προπάνιο, βουτάνιο ή μίγμα 50-50 προπανίου και βουτανίου, το οποίο είναι πιο κοινό. Ως επί τον πλείστον, το LPG μπορεί να εξαχθεί από ακατέργαστες ροές αερίων υδρογονανθράκων με κλασμάτωση, αλλά σχετικά μικρότερες αναλογίες από αυτό μπορεί επίσης να ανακτηθεί σε διωλιστήριο, τυπικά από μονάδα ακατέργαστης απόσταξης και ακόμη και μικρό κλάσμα από τη μονάδα καταλυτικής πυρόλυσης. Μια άλλη βασική εφαρμογή του υγραερίου είναι στις λειτουργίες EOR για τον εμπλουτισμό της έγχυσης, τα αέρια δηλαδή που χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί η ανάμιξη με το πετρέλαιο για τη βελτίωση της ανάκτησης πετρελαίου. Το υγραέριο όταν αποθηκεύεται σε δοχεία είναι περίπου 80% υγρό που βρίσκεται σε ισορροπία με 20% αέριο υπό φυσιολογική θερμοκρασία περιβάλλοντος και μέτριες πιέσεις της τάξεως των 100 psi. Εάν μειωθεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε αποθηκευμένο LPG παραμένει υγροποιημένο σε ισορροπία με την αέρια φάση

- Υγρά φυσικού αερίου: Τα υγρά φυσικού αερίου (NGL) αφαιρούνται από ρεύματα αερίων υδρογονανθράκων με ψύξη, και αποτελούνται κυρίως από αιθάνιο μέσω εξανίων και από κάποιο μικρό κλάσμα συστατικών υδρογονανθράκων υψηλού μοριακού βάρους. Βαρύτερα NGLs που τυπικά αποτελούνται από $C_5 +$ είναι συνήθως σε υγρή κατάσταση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και συνθήκες πίεσης. Μια σημαντική εφαρμογή των βαρύτερων NGLs είναι η χρήση τους ως αραιωτικά ή μειωτικά ιξώδους για τη μεταφορά βαρέων πετρελαίων μέσω αγωγών μεγάλων αποστάσεων

ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΝΕΡΩΝ

Το νερό σχηματισμού απλά αναφέρεται στο νερό που υπάρχει στους ταμιευτήρες πετρελαίου, που παράγεται συχνά μαζί με τους υδρογονάνθρακες. Λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία του κορεσμού του νερού για τον προσδιορισμό των αυθεντικών υδρογονανθράκων στη θέση τους με ογκομετρική ισορροπία, στις περισσότερες περιπτώσεις, ο κεντρικότερος στόχος είναι να επιτευχθεί ακριβής αρχικός κορεσμός νερού που υπάρχει στα πορώδη μέσα. Άλλοι όροι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του σχηματισμού νερού είναι το νερό του ταμιευτήρα, το νερό πετρελαίου, ή απλά η άλμη δεδομένου ότι τα

περισσότερα ύδατα σχηματισμού είναι μίγματα νερού και διάφορων αλάτων.

Τα προηγούμενα χρόνια, οι αναλύσεις των πετρελαϊκών νερών ανέφεραν μόνο τη συγκεκριμένη βαρύτητα και τη συνολική συγκέντρωση διαλυμένων στερεών (TDS), η οποία ήταν περιορισμένη σε αξία και εφαρμογή. Ωστόσο, σήμερα η ανάλυση του νερού περιλαμβάνει συνήθως λεπτομερείς ιοντικές συγκεντρώσεις με τη μορφή κατιόντων (νάτριο, ασβέστιο, μαγνήσιο, κάλιο και σίδηρο) και ανιόντα (χλωριούχο, θειικό, ανθρακικό) εκφρασμένο σε mg / L. Επομένως, τα ύδατα σχηματισμού χαρακτηρίζονται συνήθως από τις αλατότητες τους (TDS), τη σύνθεση, την πυκνότητα και το ιξώδες. Το TDS επηρεάζει γενικά το πυκνότητα και ιξώδες. Ωστόσο, παρόμοια με τα αέρια και τα πετρέλαια των ταμιευτήρων, τα χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης των υδάτων ποικίλλουν από σχηματισμό σε σχηματισμό. Ο McCain δηλώνει ότι ο σχηματισμός υδάτων έχει αναφερθεί με TDS που κυμαίνονται από μόλις 200 ppm έως και υψηλότερα ως 300.000 ppm.

ΑΝΑΛΥΣΗ PVT ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Αφού μελετήσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς φάσης, τη δειγματοληψία και την ανάλυση της σύνθεσης, ας στραφούμε στην ανάλυση πίεσης-όγκου-θερμοκρασίας (PVT) και στις ιδιότητες των ρευστών ταμιευτήρων πετρελαίου.

Σχεδόν όλοι οι ταμιευτήρες πετρελαίου παράγονται με μια διαδικασία εξάντλησης στην οποία η πίεση του ταμιευτήρα μειώνεται καθώς τα υγρά ανακτώνται. Για όλους τους πρακτικούς σκοπούς, η θερμοκρασία στον ταμιευτήρα θεωρείται σταθερός στις περισσότερες μεθόδους ανάκτησης. Ωστόσο, η μείωση της θερμοκρασίας παρατηρείται γενικά όταν τα ρευστά από τον ταμιευτήρα φθάνουν στην επιφάνεια. Εκτός από τη χημεία και την αρχική σύνθεση, οι δύο κύριες μεταβλητές που επηρεάζουν τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες των ρευστών ταμιευτήρων είναι η πίεση και η θερμοκρασία. Συνεπώς, σχετικά απλές εργαστηριακές δοκιμές που προσομοιώνουν την ανάκτηση ρευστών υδρογονανθράκων διεξάγονται με μεταβαλλόμενη πίεση (και

θερμοκρασία), με πρωταρχική έμφαση στα ογκομετρικά δεδομένα στον ταμιευτήρα και στις επιφανειακές συνθήκες. Ωστόσο, για ορισμένα ρευστά, αντί για μία μόνο δοκιμή ή λίγες δοκιμές, μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών είναι απαραίτητες για την απόκτηση όλων των απαραίτητων δεδομένων. Αυτός ο τύπος ανάλυσης που πραγματοποιείται στα περισσότερα ρευστά ταμιευτήρων ονομάζεται μελέτες ιδιοτήτων ρευστών PVT.

Τα δεδομένα που μετρούνται ως μέρος των μελετών PVT ή των μελετών ρευστών ταμιευτήρων αποτελούν βασικά στοιχεία για την ορθή διαχείριση των ταμιευτήρων πετρελαίου, τα οποία περιλαμβάνουν την αξιολόγηση των αποθεμάτων, την εκπόνηση σχεδίου αποκατάστασης και τον προσδιορισμό της ποσότητας και της ποιότητας των παραγόμενων ρευστών. Όλα τα δεδομένα που λαμβάνονται για τους διάφορους αυτούς σκοπούς είναι αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης τριών διαφορετικών συνιστωσών:

1. Εξοπλισμός PVT υψηλής πίεσης / υψηλής θερμοκρασίας
2. Διαφορετικές εργαστηριακές εξετάσεις
3. Διαφορετικές ιδιότητες

Αυτά τα τρία σημαντικά στοιχεία και άλλα στοιχεία μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα διάγραμμα ροής. Οι διάφορες ιδιότητες καθορίζονται πρώτα, ακολουθούμενη από τη γενική περιγραφή του εξοπλισμού PVT και τις συνήθεις δοκιμές PVT από τις οποίες λαμβάνονται διάφορες ιδιότητες ρευστού ταμιευτήρα. Ωστόσο, όταν δεν είναι διαθέσιμη λεπτομερής εργαστηριακή ανάλυση, οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται από διάφορους εμπειρικούς συσχετισμούς.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

Αυτή η ενότητα περιγράφει τους ορισμούς και τα χαρακτηριστικά των σημαντικών φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών των πετρελαϊκών ταμιευτήρων. Οι ιδιότητες που περιγράφονται εδώ χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο από τους μηχανικούς των ταμιευτήρων όσο και από τους μηχανικούς παραγωγής και απαιτούνται για διάφορες πτυχές της συνολικής διαχείρισης των ταμιευτήρων. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν τις σχέσεις πίεσης-όγκου (PV) για τα αέρια και τα πετρέλαια, την συμπιεστότητα, την εκτατικότητα, την πυκνότητα, το ιξώδες, την επιφανειακή τάση, καθώς και άλλες παραμέτρους μηχανικής ταμιευτήρα όπως παράγοντες όγκου και αναλογίες αερίου διαλύματος. Πολλές από αυτές τις ιδιότητες εμπίπτουν φυσιολογικά στις κανονικές διακρίσεις μεταξύ αερίων και υγρών. Άλλες ιδιότητες όπως το διάλυμα αερίου, οι συντελεστές όγκου σχηματισμού και η επιφανειακή τάση περιγράφονται καταλλήλότερα στο πλαίσιο των ιδιοτήτων τόσο των αερίων όσο και υγρών (πετρελαίου ή συμπυκνωμάτων). Πριν προσδιοριστούν οι διάφορες ιδιότητες των ρευστών πετρελαϊκού ταμιευτήρα, πρέπει να μελετηθούν τα βασικά διακριτικά χαρακτηριστικά μεταξύ αερίων και υγρών, τα οποία θα μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε τις διαφορές μεταξύ των διαφόρων ιδιοτήτων.

ΑΕΡΙΑ ΚΑΙ ΥΓΡΑ

Τα αέρια ή οι λιγότερο πυκνές φάσεις του ρευστού γενικά έχουν χαμηλή πυκνότητα και ιξώδες με ανεξάρτητο σχήμα ή όγκο που επεκτείνεται για να υιοθετήσει το σχήμα του δοχείου. Γενικά, τα αέρια είναι σημαντικά σε όλες τις πτυχές της μηχανικής πετρελαίου και επηρεάζουν πρωτίστως τις ιδιότητες της μηχανικής του ταμιευτήρα. Στην περίπτωση απλών ή ιδανικών αερίων, δηλαδή υπό μέτριες συνθήκες, οι σχέσεις σύνδεσης μεταξύ της πίεσης, της θερμοκρασίας και του όγκου είναι σχετικά απλές, ενώ μπορούν να είναι πολύπλοκες σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης ή τυπικές συνθήκες ταμιευτήρα, που ονομάζονται πραγματικά αέρια. Τα υγρά, αντίθετα, έχουν υψηλή πυκνότητα και ιξώδες, δεν έχουν ανεξάρτητο σχήμα και αποκτούν το σχήμα του δοχείου που εμπεριέχονται, αν και όχι απαραίτητα γεμίζοντας το.

Το κλειδί για τη διάκριση μεταξύ αερίων και υγρών είναι η σχετική μοριακή πυκνότητα των φάσεων. Κατά την επεξεργασία των αερίων, υποτίθεται ότι τα μόρια είναι σχετικά απομακρυσμένα, αλλά στα υγρά, είναι αντίθετα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις

φυσικές ιδιότητες μεταξύ των δύο ρευστών καταστάσεων. Για παράδειγμα, συνήθως, η αλλαγή της πίεσης έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στην πυκνότητα ενός αερίου παρά σε ένα υγρό.

Εντούτοις, θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι αυτές οι βασικές διακρίσεις μεταξύ αερίων και υγρών καθίστανται πολύ λιγότερο εφαρμόσιμες στη σχεδόν κρίσιμη περιοχή όπου υπάρχουν πολλά ρευστά ταμιευτήρων όπως συμπυκνώματα αερίου και πτητικά πετρέλαια. Πράγματι, στις σχεδόν κρίσιμες περιοχές, είναι σκόπιμο να χαρακτηριστούν οι φάσεις αερίου και υγρού ως λιγότερο πυκνές και πιο αδύναμες φάσεις, καθώς οι διαφορές μεταξύ των οποίων τελικά εξαφανίζονται στο κρίσιμο σημείο.

ΜΑΥΡΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ ΚΑΙ ΠΤΗΤΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ

Οι ιδιότητες που αναφέρθηκαν εδώ ονομάζονται επίσης και ιδιότητες μαύρου πετρελαίου, οι οποίες περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- ΤΟΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΟΓΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ - Ο συντελεστής όγκου σχηματισμού πετρελαίου, ο οποίος υποδηλώνεται από το B_o , ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του πετρελαίου στις επικρατούσες συνθήκες ταμιευτήρα με τον όγκο του πετρελαίου υπό κανονικές συνθήκες. Επίσης ο κυριότερος παράγοντας είναι η εξέλιξη του αερίου από το πετρέλαιο, καθώς η πίεση μειώνεται όταν το πετρέλαιο κινείται από τον ταμιευτήρα στην επιφάνεια και προκαλεί μια μάλλον μεγάλη μείωση του όγκου του λαδιού όταν υπάρχει σημαντική ποσότητα αερίου σε διάλυμα. Όταν το πετρέλαιο μετακινείται από συνήθως υψηλή θερμοκρασία ταμιευτήρα σε χαμηλή θερμοκρασία κοντα στην επιφάνεια, συμβαίνει μια συστολή στον όγκο του πετρελαίου λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας.
- ΤΟΝ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ ΟΓΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ - Ο συντελεστής ολικού ή διφασικού όγκου σχηματισμού, που δηλώνεται με B_t , χρησιμοποιείται για την έκφραση της αναλογίας του ολικού όγκου αερίου και πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα προς τον όγκο σε απόθεμα και, επομένως, εξ ορισμού, είναι εφαρμόσιμο σε όλες τις πιέσεις κάτω από το σημείο φουσαλίδας, δεδομένου ότι το πετρέλαιο διασπάται σε δύο φάσεις.

- ΤΟΝ ΛΟΓΟ ΑΕΡΙΟΥ-ΕΛΑΙΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ - Ο λόγος διαλύματος ή διαλυμένου αερίου-πετρελαίου ή διαλυτότητας σε αέριο, που δηλώνεται με Rs, ορίζεται ως η ποσότητα του αερίου που διαλύεται σε ένα πετρέλαιο υπό συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας ταμιευτήρα. Η αναλογία διαλύματος αερίου-πετρελαίου εκφράζεται συνήθως σε όρους αερίου ανά βαρέλι πετρελαίου από πετρελαϊκό ταμιευτήρα. Η ποσότητα του αερίου που διαλύεται στο πετρέλαιο εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία της ταμιευτήρα και τη σύνθεση.
- ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ - Εξ ορισμού, η βασική λειτουργική μορφή της εξίσωσης που περιγράφει τον συντελεστή ισοθερμικής συμπίεστότητας του πετρελαίου δηλώνεται από το C_0 . Ωστόσο, σε πιέσεις κάτω από το σημείο φυσαλίδας, συμπεριλαμβάνεται ένας πρόσθετος όρος προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι εξέλιξη του αερίου και ο συντελεστής της ισοθερμικής συμπίεστότητας που αναφέρεται μερικές φορές ως συνολική συμπίεστότητα
- ΤΟ ΙΞΩΔΕΣ ΤΟΥ ΕΛΑΙΟΥ - Το ιξώδες πετρελαίου, που συμβολίζεται με μ_0 και που συνήθως καθορίζεται σε centipoise, ή cp, όπως άλλες φυσικές ιδιότητες, εξαρτάται επίσης από την πίεση και τη θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του ιξώδους του πετρελαίου, η οποία μπορεί να είναι της τάξης μεγέθους με την αύξηση της θερμοκρασίας και έχει βασική σημασία για την ανάκτηση θερμότητας βαρέων πετρελαίων. Συνήθως, για τα πετρέλαια, η μείωση της πίεσης προκαλεί μείωση του ιξώδους και αντίστροφα, η οποία είναι αυστηρά αληθής σε πίεση σημείου φυσαλίδας και πάνω επειδή όλο το αέριο παραμένει άθικτο όταν διαλυθεί με το πετρέλαιο. Ωστόσο, κάτω από την πίεση του σημείου της φυσαλίδας, η ποσότητα αερίου που παραμένει στο διάλυμα μειώνεται συνεχώς με πίεση, και αυτό έχει αντίθετο αποτέλεσμα στο ιξώδες του πετρελαίου, δηλαδή το ιξώδες του πετρελαίου στην πραγματικότητα αυξάνεται με τη μείωση της πίεσης. Το αέριο διαλύματος που αποτελείται κυρίως από ελαφρύτερα και ενδιάμεσα συστατικά, που υπάρχουν στο πετρέλαιο, έχει βασικά αποτέλεσμα διαλύτη στο πετρέλαιο, το οποίο μειώνεται προφανώς με πιέσεις που πέφτουν πιο κάτω από το σημείο φυσαλίδας, καθιστώντας έτσι το πετρέλαιο βαρύτερο και αυξάνοντας έτσι το ιξώδες του.
- ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΤΑΣΗ - Η επιφανειακή τάση μεταξύ αερίου και πετρελαίου συνήθως συμβολίζεται με σ_{go} και καθορίζεται σε dynes / cm ή mN / m. Σε αντίθεση με τις άλλες ιδιότητες που συζητήθηκαν μέχρι τώρα, η επιφανειακή τάση επηρεάζεται σχεδόν εξίσου από τις ιδιότητες των δύο φάσεων, όπως οι χημικές συνθέσεις και οι πυκνότητες τους. Η επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας αντανakλάται κανονικά μέσω των συνθέσεων και των πυκνοτήτων των αερίων και των υγρών φάσεων. Περιττό να πούμε ότι σε πιέσεις πάνω

από το σημείο φυσαλίδων, δεδομένου ότι μόνο το πετρέλαιο υπάρχει σε μία φάση και δεν εκλύεται αέριο, η επιφανειακή τάση είναι προφανώς 0. Η επιφανειακή τάση αυξάνεται καθώς η πίεση μειώνεται κάτω από το σημείο φυσαλίδας. Αυτή η συμπεριφορά είναι μια άμεση αντανάκλαση των μεταβολών της πυκνότητας και της σύνθεσης που λαμβάνουν χώρα στις φάσεις ισορροπίας ατμών και υγρών σε πιέσεις κάτω από το σημείο της φυσαλίδας. Σε σχετικά υψηλές πιέσεις, ακριβώς κάτω από το σημείο της φυσαλίδας, η διαφορά πυκνότητας μεταξύ των φάσεων ισορροπίας είναι μικρή σε σύγκριση με σχετικά χαμηλές πιέσεις πολύ κάτω από το σημείο της φυσαλίδας, όπου η διαφορά πυκνότητας είναι μεγάλη. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τη θεμελιώδη θεωρία πίσω από την τεχνική της πτώσης, το μέγεθος των επιφανειακών δυνάμεων είναι μικρό, με αποτέλεσμα πολύ μικρότερα σταγονίδια, ενώ το αντίθετο ισχύει στην περίπτωση του βαρύτερου υγρού σχετικά χαμηλές πιέσεις όπου το μέγεθος των επιφανειακών δυνάμεων είναι μεγάλο.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Το νερό εμφανίζεται πάντοτε σε δεξαμενές πετρελαίου όπου ρευστά ταμιευτήρα πετρελαίου συναντώνται με νερό που καταλαμβάνει τους ίδιους ή παρακείμενους πόρους³⁶. Με αυξανόμενο βάθος υπάρχει επίσης νερό σε μια υποκείμενη ζώνη κάτω από τις ζώνες των υδρογονανθράκων³⁷. Το νερό που υπάρχει στους ταμιευτήρες πετρελαίου είναι συνήθως αυτό που αναφέρεται ως συγκολλημένο νερό, διάμεσο νερό, νερό σχηματισμού, νερό πετρελαίου, νερό ταμιευτήρα και μερικές φορές απλά άλμη δεδομένης της παρουσίας διαλυμένων αλάτων. Αυτοί οι όροι χρησιμοποιούνται εναλλακτικά στη βιβλιογραφία του πετρελαίου.

Η παραγωγή ρευστών υδρογονανθράκων από ταμιευτήρες πετρελαίου συνοδεύεται συχνά από την παραγωγή νερού σχηματισμού, η οποία αυξάνεται κατά τη διάρκεια ζωής ενός ταμιευτήρα εξαιτίας της εξάντλησης του υδροσυλλέκτη και της αντίστοιχης εισροής ή εκροής νερού. Στην πραγματικότητα, σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως τα πεδία πετρελαίου που έχουν ωριμάσει ή εξαντληθεί, ο συνολικός όγκος του παραγόμενου νερού ή του νερού που περικόπηκε υπερβαίνει κατά πολύ

³⁶ Amyx, J.W., Bass, D.M., Jr., and Whiting, R.L., *Petroleum Reservoir Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1960

³⁷ Pedersen, K. and Christensen, P., *Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2007.

την παραγωγή πετρελαίου με αναλογία νερού προς πετρέλαιο που φθάνει μέχρι 1: 100³⁸. Το παραγόμενο νερό σχηματισμού, γενικά, δεν έχει κάποια εμπορική αξία, εκτός από την επανατοποθέτησή του στον ταμιευτήρα για λόγους συντήρησης της πίεσης. Ο χειρισμός του παραγόμενου νερού σχηματισμού καθίσταται ζήτημα, ιδιαίτερα όταν εξετάζονται αυστηρότερες περιβαλλοντικές ανησυχίες και τοπικοί και ομοσπονδιακοί κανονισμοί που αφορούν τη διάθεση του νερού.

Σε ένα σενάριο επιπέδου πόρων, η παρουσία νερού με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ή ιδιότητες μπορεί να επηρεάσει την διαβρεξιμότητα του συστήματος και τον μη αγωγίμο κορεσμό του νερού, γεγονός που με τη σειρά του μπορεί να επηρεάσει τις σχετικές λειτουργίες διαπερατότητας. Στις εξισώσεις ροής ρευστού ταμιευτήρα, το νερό σχηματισμού αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστή φάση μαζί με την αέρια φάση υδρογονανθράκων και την φάση πετρελαίου. Παρόμοια με τις ιδιότητες των φάσεων υδρογονανθράκων, οι ιδιότητες της υδατικής φάσης είναι απαραίτητες για την επίλυση των εξισώσεων ροής και των εξισώσεων ισοζυγίου υλικού. Στις διεργασίες εγχύσεως ύδατος χρησιμοποιούνται επίσης χαρακτηριστικά σχηματισμού ύδατος, όπως η χημική σύνθεση, για να εξακριβωθεί το δυναμικό σχηματισμού βύσματος ή βλάβης που προκύπτει από εναπόθεση αλάτων (συνχνά αναφέρεται ως απολέπιση) λόγω ασυμβατότητας μεταξύ του εξωτερικά εισαγόμενου νερού (π.χ. θαλασσινού νερού) και το νερού του ταμιευτήρα. Η κλιμάκωση είναι επίσης ένα πιθανό πρόβλημα σε αγωγούς μεταφοράς μη επεξεργασμένων πηγών από γεώτρηση που περιέχουν νερό σχηματισμού.

Η συναφής παρουσία ύδατος με τις φάσεις υδρογονανθράκων οδηγεί επίσης σε αμοιβαία διαλυτότητα, δηλαδή στην διαλυτότητα των υδρογονανθράκων στην υδατική φάση και στην διαλυτότητα του ύδατος σε φάσεις υδρογονανθράκων. Η ικανότητα ανάμειξης μεταξύ ύδατος και πετρελαίου είναι αρκετά περιορισμένη, αλλά η περιεκτικότητα σε νερό στα μείγματα συμπυκνώματος αερίου και αερίου μπορεί να είναι αρκετά σημαντική. Η παρουσία νερού και ορισμένων αερίων, συνήθως σε επιφανειακές εγκαταστάσεις και υπεράκτιες γραμμές ροής και οι ανυψωτές που μεταφέρουν τις μη επεξεργασμένες ροές νερού από γεωτρήσεις, μπορούν δυνητικά να οδηγήσουν στο σχηματισμό ανεπιθύμητων στερεών κρυσταλλικών ενώσεων γνωστών ως "ένυδρων αερίων" που οδηγούν σε σημαντικά ζητήματα διασφάλισης της ροής. Οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας σχηματισμού του υδρίτη εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου νερού, όπως η αλατότητα του.

Ως εκ τούτου, είναι σαφώς σημαντικό να γνωρίζουμε τις χημικές και φυσικές ιδιότητες των υδάτων σχηματισμού. Προκειμένου να γίνει

³⁸ Pietrak, M.J., Stanley, F.O., Weber, B.J., and Fontenot, J.S., Relative permeability Modifier Treatments on Gulf of Mexico Frac-packed and Gravel-packed oil and gas wells, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 96945.

μια πλήρης και ολοκληρωμένη μελέτη μηχανικής αποθεματοποίησης πετρελαίου, είναι απαραίτητο να έχουμε μια πλήρη ανάλυση νερού, που να περιλαμβάνει τόσο τα δεδομένα των χημικών όσο και τα δεδομένα των φυσικών ιδιοτήτων. Τα συχνά χρησιμοποιούμενα δεδομένα χημικών ιδιοτήτων είναι η χημική σύνθεση ή η αλατότητα του νερού, ενώ οι φυσικές ιδιότητες περιλαμβάνουν πυκνότητα, ιξώδες, συμπίεστότητα και παράγοντα όγκου σχηματισμού. Πολύ συχνά, είναι επίσης επιθυμητό να συμπεριληφθούν τα δεδομένα αμοιβαίας διαλυτότητας.

Παρόμοια με τις ιδιότητες των ρευστών ταμιευτήρων πετρελαίου, η πλέον ιδανική πηγή για την απόκτηση των ιδιοτήτων των υδάτων σχηματισμού είναι η διεξαγωγή εργαστηριακών μελετών σε αντιπροσωπευτικά δείγματα των ταμιευτήρων. Ωστόσο, αυτό δεν φαίνεται να συμβαίνει, διότι τα ύδατα πεδίου του πετρελαίου δεν ελέγχονται όπως συνήθως στο εργαστήριο, όπως είναι τα ρευστά ταμιευτήρων πετρελαίου. Επιπλέον, οι ιδιότητες των πετρελαϊκών πεδίων δεν έχουν μελετηθεί τόσο προσεκτικά και συστηματικά όσο οι ιδιότητες των ρευστών ταμιευτήρων πετρελαίου, διότι οι τελευταίες έχουν προφανώς πολύ μεγαλύτερη σημασία από εμπορική άποψη. Από την άλλη πλευρά, το καθαρό νερό έχει μελετηθεί εκτεταμένα και αρκετά με πλήρη δεδομένα, που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα πίεσης και θερμοκρασίας, και υπάρχουν στη βιβλιογραφία με βάση πειραματικές, καθορισμένες φυσικές ιδιότητες. Ως εκ τούτου, βασικά είναι μια κοινή πρακτική επέκταση των δεδομένων καθαρού νερού στα ύδατα σχηματισμού με την εφαρμογή του σχετικού συντελεστή διόρθωσης της αλατότητας για την απόκτηση διαφόρων απαιτούμενων ιδιοτήτων. Αυτό επιτυγχάνεται γενικά με διάφορους εμπειρικούς συσχετισμούς οι οποίοι βασίζονται σε περιορισμένα πειραματικά δεδομένα για ύδατα σχηματισμού.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Όλα τα ύδατα σχηματισμού χαρακτηρίζονται χημικά από τη σύνθεσή τους όσον αφορά τα διαλυμένα στερεά. Το πλέον διαδεδομένο διαλυτό στερεό στα ύδατα σχηματισμού είναι το χλωριούχο νάτριο. Άλλα διαλυτά στερεά που βρίσκονται στα ύδατα σχηματισμού περιλαμβάνουν χλωριούχο κάλιο, χλωριούχο ασβέστιο, χλωριούχο μαγνήσιο, χλωριούχο στροντίο, θειικό νάτριο και διττανθρακικό νάτριο. Ωστόσο, όσον αφορά τη σύνθεση, το πιο κυρίαρχο στερεό είναι το χλωριούχο νάτριο. Τα στερεά που υπάρχουν στα ύδατα σχηματισμού ορίζονται επίσης με όρους

κατιόντων και ανιόντων, όπως νάτριο, κάλιο, μαγνήσιο και ασβέστιο και χλωριούχο, θειικό, ανθρακικό και διττανθρακικό, αντίστοιχα. Τα κατιόντα και τα ανιόντα που υπάρχουν στα ύδατα σχηματισμού μπορούν να ταυτοποιηθούν χρησιμοποιώντας μία τεχνική που ονομάζεται χρωματογραφία ανταλλαγής ιόντων.

Αν και χρησιμοποιούνται διάφορες μονάδες ³⁹ για να αναφέρουν ή να περιγράψουν το περιεχόμενο διαλυτού στερεού, η συγκέντρωση συχνά εκφράζεται σε χιλιοστόγραμμα κάθε στερεού ανά λίτρο ή απλά σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm) ολικών διαλυτών στερεών. Τα μέρη ανά εκατομμύριο συνήθως αναφέρονται σε γραμμάρια στερεών ανά 1 εκατομμύριο αλατόνευρο, το οποίο μετατρέπεται σε ποσοστό επί τοις εκατό κατά βάρος των ολικών διαλυμένων στερεών πολλαπλασιάζοντας τις ppm με $10^{-4} [(g \text{ στερεά} / 106 \text{ g άλμη}) \times 100\%]$.

Τα νερά πετρελαιοφόρων πεδίων που βρίσκονται σε διαφορετικούς ταμιευτήρες, η σχετική κατανομή αυτών των διαλυτών στερεών ή κατιόντων και ανιόντων διαμορφώνει τα διάφορα ύδατα σχηματισμού. Παρόμοια με διάφορα ρευστά ταμιευτήρα πετρελαίου, που χαρακτηρίζονται από τις μοναδικές συνολικές συνθέσεις τους, τα διαφορετικά ύδατα σχηματισμού χαρακτηρίζονται επίσης από μοναδικά κατανεμημένες συγκεντρώσεις στερεών. Γενικά η σύνθεση ποικίλλει σημαντικά (σε τάξεις μεγέθους) από σχηματισμό σε σχηματισμό. Στην πραγματικότητα, ο McCain ³⁹ δηλώνει ότι το νερό που περιέχεται σε ένα παραγωγικό σχηματισμό έχει σύνθεση διαφορετική από οποιοδήποτε άλλο νερό, ακόμη και εκείνα που βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με αυτό το σχηματισμό. Ο McCain ³⁹ επισημαίνει επίσης ότι, αν και τα ύδατα σχηματισμού και τα θαλάσσια ύδατα περιέχουν άλατα, δεν υπάρχουν ομοιότητες ή συσχετισμοί μεταξύ τους ούτε στη συγκέντρωση αλάτων ούτε στην κατανομή των παρόντων ιόντων. Τα θαλάσσια ύδατα τυπικά περιέχουν περίπου 35.000 ppm (ή 3.5%) συνολικών στερεών, ενώ τα ύδατα διαμόρφωσης έχουν αναφερθεί με συνολική συγκέντρωση στερεών έως 300.000 ppm (ή 30%), η οποία είναι συχνά το ανώτερο όριο της διόρθωσης της αλατότητας από εμπειρικές συσχετίσεις.

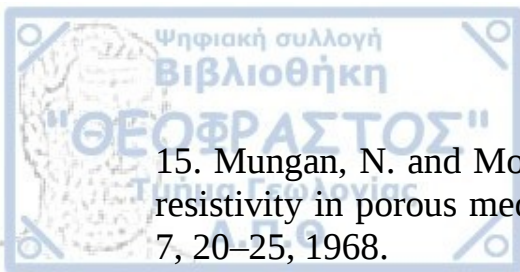
Η σύνθεση των υδάτων σχηματισμού είναι στην πραγματικότητα ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά επειδή η σχετική κατανομή των διαλυτών στερεών έχει σημαντική επίδραση (εκτός από την πίεση και τη θερμοκρασία) σε όλες σχεδόν τις φυσικές ιδιότητες των σχηματισμένων υδάτων. Ορισμένες από τις συσχετίσεις φυσικής ιδιότητας που αναπτύχθηκαν για τα νερά σχηματισμού βασίζονται σε καθαρό νερό, στο οποίο εφαρμόζεται ένας συγκεκριμένος διορθωτικός

³⁹ McCain, W.D., Jr., *The Properties of Petroleum Fluids*, PennWell Publishing Co., Tulsa, OK, 1990.

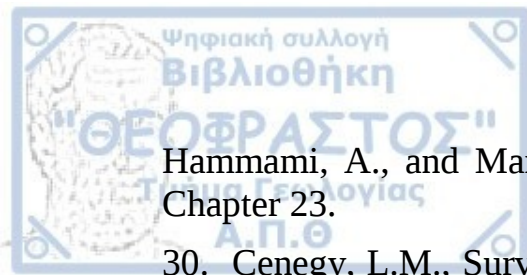


παράγοντας, ανάλογα με τα συνολικά διαλυμένα στερεά, για τον προσδιορισμό μιας συγκεκριμένης ιδιότητας. Ως εκ τούτου, η πλήρης χημική ανάλυση είναι μια σημαντική πτυχή του χαρακτηρισμού του νερού σχηματισμού και θα πρέπει να είναι διαθέσιμη στο νερό από κάθε ταμιευτήρα πετρελαίου.

1. Bjorlykke, K., *Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2011, p. 518.
2. Selley, R.C., *Elements of Petroleum Geology*, Academic Press, London, U.K., 1998, p. 470.
3. Tissot, B.P. and Welte, D.H., *Petroleum Formation and Occurrence*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1984, p. 699.
4. Tiab, D. and Donaldson, E.C., *Theory and Practice of Measuring Reservoir Rocks and Fluid Transport Properties*, Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1996.
5. Archer, J.S. and Wall, C.G., *Petroleum Engineering: Principles and Practice*, Graham and Trotman, London, U.K., 1986, p. 350.
6. Glasby, G.P., Abiogenic origin of hydrocarbons: An historical overview, *Resource Geology*, 56(1), 85–98, 2006.
7. Vandenbroucke, M. and Largeau, C., Kerogen origin, evolution and structure, *Organic Geochemistry*, 38(5), 719–833, 2007.
8. Amyx, J.W., Bass, D.M., Jr., and Whiting, R.L., *Petroleum Reservoir Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1960.
9. Tiab, D. and Donaldson, E.C., *Theory and Practice of Measuring Reservoir Rocks and Fluid Transport Properties*, Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1996.
10. Holt, R.M., Ingsoy, P., and Mikkelsen, M., Rock mechanical analysis of North Sea reservoir formations, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 16796
11. Pirson, S.J., *Handbook of Well Log Analysis: For Oil and Gas Formation Evaluation*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1963, 326 p.
12. Fairhurst, C., *Rock Mechanics*, Pergamon Press, London, U.K., 1963.
13. Wyllie, M.R.J. and Spangler, M.B., Application of electrical resistivity measurements to problem of fluid flow in porous media, *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 36, 159, 1952.
14. Anderson, W.G., Wettability literature survey—Part 3: The effects of wettability on the electrical properties of porous media, *Journal of Petroleum Technology*, 38, 1371–1378, 1986.



15. Mungan, N. and Moore, E.J., Certain wettability effects on electrical resistivity in porous media, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 7, 20–25, 1968.
16. Moore, J., Laboratory determined electric logging parameters of the Bradford Third sand, *Producers Monthly*, 22, 30–39, 1958.
17. Chen, G., Personal communication, University of Alaska, Fairbanks, 2005.
18. Wyllie, M.R.J., Formation factors of unconsolidated porous media: Influence of particle shape and effect of cementation, *Transactions AIME*, 198, 103–110, 1953
19. Labrie, D. and Conlon, B. Hydraulic and poroelastic properties of porous rocks and concrete materials, American Rock Mechanics Association (ARMA) paper number 08–182.
20. Geertsma, J., The effect of fluid pressure decline on volumetric changes of porous rocks, *Transactions AIME*, 210, 331–340, 1957.
21. Ahmed, T., *Reservoir Engineering Handbook*, Butterworth-Heinemann, Woburn, MA, 2001.
22. Danesh, A., *PVT and Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids*, Elsevier Science, Amsterdam, the Netherlands, 1998.
23. McCain, W.D., Jr., *The Properties of Petroleum Fluids*, PennWell Publishing Co., Tulsa, OK, 1990
24. Riazi, M.R., *Characterization and Properties of Petroleum Fractions*, American Society for Testing and Materials, Baltimore, MD, 2007.
25. Tissot, B.P. and Welte, D.H., *Petroleum Formation and Occurrence*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1984, p. 699.
26. Sloan, E.D., *Hydrate Engineering*, Monograph 21, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, 2000.
27. Ekweribe, C., Civan, F., Lee, H.S., and Singh, P., Interim report on pressure effect on waxy-crude pipeline-restart conditions investigated by a model system, *SPE Projects, Facilities & Construction*, 4(3), 61–74, 2009
28. Kumar, S., Tandon, R., Beliveau, D., Kumar, P., and Vermani, S., Hot water injection pilot: A key to the waterflood design for the waxy crude of the mangala field, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 12622.
29. Hammami, A. and Ratulowski, J., Precipitation and deposition of asphaltenes in production systems: A flow assurance overview, *Asphaltenes, Heavy Oils, and Petroleomics*, Mullins, O.C., Sheu, E.Y.,



Hammami, A., and Marshall, A.G., (Eds.), Springer, New York, 2007, Chapter 23.

30. Cenegy, L.M., Survey of successful world-wide asphaltene inhibitor treatments in oil production fields, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 71542, New Orleans, LA, 2001

31. Eskin, D., Ratulowski, J., Akbarzadeh, K., and Andersen, S., Modeling of asphaltene deposition in a production tubing, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 58, 2936–2948, 2011, published online in Wiley online library (wileyonlinelibrary.com).

32. Haskett, C.E. and Tartera, M., A practical solution of the problem to the asphaltene deposits-Hassi Messaoud field, Algeria, *Journal of Petroleum Technology*, 17, 387–391, 1965.

33. Alkafeef, S.F., Al-Medhadi, F., and Al-Shammari, A.D., A simplified method to predict and prevent asphaltene deposition in oilwell tubings: Field case, *SPE Production & Facilities*, 20, 126–132, 2005.

34. Holder, G.D., Enick, R.M., Jones, J.W., Reiser, J.A., and LeBlond, C.R., Dynamic gas hydrate formation and properties of diamondoids, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 26164, Pittsburgh, PA, 1993.

35. King, W.J., Operating Problems in the Hanlan Swan Hills Gas Field, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 17761.

36. Amyx, J.W., Bass, D.M., Jr., and Whiting, R.L., *Petroleum Reservoir Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1960.

37. Pedersen, K. and Christensen, P., *Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2007.

38. Pietrak, M.J., Stanley, F.O., Weber, B.J., and Fontenot, J.S., Relative permeability Modifier Treatments on Gulf of Mexico Frac-packed and Gravel-packed oil and gas wells, Society of Petroleum Engineers (SPE) paper number 96945.

39. McCain, W.D., Jr., *The Properties of Petroleum Fluids*, PennWell Publishing Co., Tulsa, OK, 1990.