كـلـيـــة هـنـدســـة الـبـتـرول
Faculty of petroleum engineering

المستحلبات النفطية وسلوكيتها
مشروع تخرج لنيل الإجازة في الهندسة البترولية

إعداد

عيسى غاشبار قحوش أسامة صقير محمد عثمان شاهين

إشراف
الأستاذ الدكتور ماهر سعادة

العام الجامعي 2014 / 2015

فهرس المحتويات

فهرس المحتويات 2

الإهداء 4

مقدمة 5

الفصل الأول : الخواص الفيزيائية للنفط الخام

1-1- مفاهيم أساسية 7
2-1- أهم الخواص الفيزيائية للنفط الخام 8
1-2-1- الكثافة 8
1-1-2-1- الكثافة النسبية للنفط ودرجة (API) 9
2-2-1- اللزوجة 9
1-2-2-1- تأثير درجة الحرارة على لزوجة النفط 10
3-2-1- الانضغاطية و معامل المرونة الحجمي 11
4-2-1- الكهربة 11
5-2-1- التبخر 12
6-2-1- درجة الغليان 12
7-2-1- عامل ناقلية النفط 12
8-2-1- الفعالية الضوئية 12

الفصل الثاني : سلوكية الخامات عالية اللزوجة

1-2-تُحدد الخصائص الانسيابية للنفط أثناء حركته داخل الأنابيب..... 13
2-2- سلوكية السوائل غير النيوتونية 14
1-2-2- السوائل غير المعتمدة على الزمن 14
1-1-2-2- المعادلة البلاستيكية البنغهامية 15
2-1-2-2- معادلة (Herschell-bulkley) 16
3-1-2-2- معادلة(Casson) 17
2-2-2- السوائل المعتمدة على الزمن 17
1-2-2-2- السوائل التكسوتروبية 17
2-2-2-2- السوائل الريو بكسية 18
3-2- ضياع الضغط عند جريان السوائل غير النيوتونية 18
4-2- درجة تجمد الخامات النفطية 21
1-4-2- تحديد درجة التبلور 21
2-4-2- تحديد درجة الغشاوة 22
3-4-2- تحديد درجة الانصباب 22
5-2- اجهاد القص الاولي (τ_0) 22
6-2- تبلور البرافين 22
7-2- مشاكل سلوكية الخامات النفطية الثقيلة عند نقلها بالانابيب 23
1-7-2- ارتفاع قيم اللزوجة 23

2-7-2- درجة الانصباب العالية 23
2-7-3- انفصال الشمع و ترسبه 23

الفصل الثالث: تأثير سلوكية النفط و مستحلباته على تقنية ضخ النفط و منتجاته عبر الانابيب
3-1- سلوكية الخامات النفطية 24
3-2- سلوكية السوائل (Fluids Rheology) 26
3-3- مشاكل سلوكية الخامات النفطية الثقيلة عند نقلها بالانابيب 30

الفصل الرابع : المستحلبات النفطية
4-1- تعريف المستحلب (Emulsion) 31
4-2- تشكل المستحلبات (Formation of Emulsion) 33
4-3- عوامل الاستحلاب (Emulsifying Agents) 43
4-4- الخصائص و الميزات الفيزيائية 35
4-4-1- المظهر و اللون 35
4-4-2- الماء و الرواسب الأساسية 35
4-4-3- حجم القطرات و توزعها 36
4-4-5- لزوجة المستحلب 37
4-5- مواضيع خاصة بالمستحلبات النفطية 40
4-5-1- أخذ عينات من المستحلبات 40
4-6- برنامج معالجة المستحلب الحقلي 41
4-7- مانع الأستحلاب (Emulsion prevention) 43
4-8- الأختيار و التحقق الامثل لكاسر الاستحلاب 43
4-9- المزج المناسب و الصحيح لكاسر الأستحلاب 44
4-10- كاسر الأستحلاب المعالج بشكل أكبر 45
4-11- فهم أسباب المستحلبات 46
4-12- وصف عملية كسر مستحلب من نوع ماء في الزيت 48
4-13- منشطات التوتر السطحي القابلة للذوبان في الماء 53

الفصل الخامس : طرق نقل النفط و منتجاته
5-1- النقل بواسطة صهاريج السكك الحديدية 55
5-2- النقل بواسطة الصهاريج 56
5-3- النقل المائي 57
5-4- النقل بواسطة الأنابيب 58
5-5- طرق نقل الخامات النفطية الثقيل 59
5-5-1- ضخ النفط الثقيل بمزجه مع المذيبات الهدروجينية 59
5-5-2- ضخ النفط بطريقة التسخين 60
5-5-3- نقل النفط بأستخدام الماء 64

النتائج و المقترحات 67

المراجع 68

الإهداء

إلى من علمنا أن النجاح ديةٌ للقتيل ....
كالحلال و المال
ومهرٌ للعروس ..... كالذهب والفضة
وثمنٌ للعرش ..... كالقوة والسلطان
ويزيدُ عن ذلك أنه خالدٌ كالروح
ينتهي عرضُ الدنيا ..... ولا ينتهي سرُ النجاح

إلى الدكتور ماهر سعادة

مقدمة

يعتبر النفط حتى الآن مصدراً رئيسيا للطاقة في جميع أنحاء العالم ، لذلك من الضروري نقل هذا الخام ومنتجاته من أماكن الإنتاج إلى أماكن الاستهلاك والتصدير والتكرير، وتستخدم لهذا الغرض عدة طرق رئيسية منها: النقل بواسطة صهاريج السكك الحديدية، النقل المائي، النقل بواسطة الصهاريج، والنقل بواسطة خطوط الأنابيب ، وقد بينت الأبحاث وكذلك التجربة أن أرخص الطرق لنقل السوائل هي طريقة النقل بالأنابيب والتي تؤمن أيضاً نقل كميات كبيرة وبصورة مستمرة وهذا ما يسمح بتزويد أماكن التجميع والتصنيع والتصدير بحاجاتها من الخامات النفطية ومنتجاتها بصورة منتظمة وبدون انقطاع، بالإضافة إلى ذلك فإن الكميات الضائعة (التهريب ، الذوبان ، التبخر، ...) عند نقل النفط الخام أو منتجاته بالأنابيب أقل منها في حالة النقل بواسطة الطرق الأخرى، وتمتاز خطوط الأنابيب أيضاً ببساطة وسهولة التشغيل والاستثمار وبسهولة المكننة والأتمتة بعد إنتاج كميات كبيرة من الخامات النفطية الخفيفة ، يميل الإنتاج حالياً إلى الخامات النفطية الثقيلة التي تترافق بمشاكل في الإنتاج والنقل كونها ذات لزوجة عالية ومحتوى عالي من البرافين والإسفلت ولها نقطة انصباب مرتفعة. لذلك يواجه العاملون في قطاع النفط مشاكل عديدة في أثناء نقل هذه الخامات النفطية بالأنابيب بسبب تجمد المحتوى الشمعي لهذه الخامات عند درجات الحرارة المنخفضة مما يسبب إعاقة تدفقها أو حتى إيقاف هذا التدفق أحياناً ، مما يستدعي معرفة سلوكية هذه الخامات قبل نقلها وبالتالي اقتراح الطريقة المناسبة لنقلها. لهذا كان الهدف الرئيسي لهذه الرسالة هو التصدي لمشاكل نقل النفط الخام السوري الثقيل الموجود خاصةً في حقول الجبسة ومحاولة اقتراح أنسب الحلول العلمية والعملية لها .يستخدم العالم عدة طرق لنقل هذه الخامات النفطية عالية اللزوجة، تتضمن هذه الطرق: التسخين مع عزل الأنابيب حرارياً، تحسين السيولة بواسطة المزج مع مركبات هيدروكربونية خفيفة أو مع الخامات النفطية الخفيفة، النقل باستخدام الماء إما كمستحلب نوع نفط / ماء أو كخاتم مائي ملامس لجدار الأنبوب ويحيط بالخام ضمنه، المعالجة الحرارية التي يمكن أن تساهم في تخفيض اللزوجة وتخفيض نقطة الانصباب وتحسين سلوكية الخام ، واستعمال المضافات الكيميائية التي تساهم في تحسين سلوكية النفط وتخفيض نقطة الانصباب عن طريق منع انفصال البرافينات وتغليف البلورات الشمعية ومنع اتحادها مع بعضها. إن جميع هذه الطرق 'طبّقت مخبرياً وحقلياً، فعلى سبيل المثال لا الحصر فإن طريقة مزج الخامات النفطية الثقيلة مع الخامات النفطية الخفيفة 'مستخدمة في الحقول السورية وأيضاً طريقة المزج مع المواد الهيدروكربونية الخفيفة 'مستخدمة في أمريكا وكندا وروسيا وغيرها من الدول ، كما استخدمت طريقة التسخين أيضاً في بلدان كثيرة بما فيها التسخين الكهربائي، وأيضاً استخدمت المعالجة الحرارية في عدة دول مثل الهند ، وحديثاً فإن طريقة الإضافات الكيميائية قد استخدمت مخبرياً وحقلياً في كثير من الدول. لكن مع ذلك فإن لكل نفط خام خصوصياته المتعلقة بموقع الحقل النفطي ومحيطه وبالصفات الفيزيائية والكيميائية للنفط ونوعه ونسبة البرافينات فيه بالإضافة إلى واقع خط الأنابيب الموجود ، فمثلاً يمكن استخدام التسخين والمعالجة الحرارية إذا كان خط الأنابيب معزولاً وقصيراً، كما يمكن اللجوء إلى المزج مع المشتقات النفطية الخفيفة إذا كانت مصادرها قريبة من موقع الحقل ، أما استخدام المضافات الكيميائية فإن نجاح مادة ما في تحسين سلوكية نفط معين لا يعني نجاحها مع كل أنواع النفط لأن ذلك يتعلق بتركيب النفط وخواصه وتركيب المادة وخواصها الأمر الذي يعني أن مادة معينة يمكن أن تكون فعالة لنفط ما وغير فعالة لنفط آخر ويمكن أن تسيء لسلوكية نفط ثالث وهكذا نجد أن اللجوء إلى أي طريقة من الطرق المذكورة سابقاً رهن بعدة أمور منها واقع الحقل ، واقع الخط وطوله ، تركيب النفط وخواصه، ... وغيرها لذلك لا بد من إجراء دراسات مخبرية تتضمن الطرق السابقة على أي نفط خام قبل نقله بالأنابيب مع الأخذ بالاعتبار الإمكانات التقنية والاقتصادية لكل طريقة.

المشكلة المرافقة لإنتاج النفط هو تشكل مستحلبات ثابتة من النوع ماء في النفط وهذه المستحلبات تسيء بشكل كبير إلى عملية معالجة النفط وتخليصه من المياه، يعالج هذا البحث مواصفات وشروط تشكل هذه المستحلبات والمشاكل الناجمة عنها بهدف الإضاءة على هذا الموضوع ومعالجته.

الفصل الأول:
الخواص الفيزيائية للنفط الخام

1-1- مفاهيم أساسية :

السائل هو عبارة عن جسم فيزيائي يتمتع بخاصيتين أساسيتين هما :

1- الانضغاطية القليلة جداً (لا يتغير حجمه إلا قليلاً عند تغير الضغط والحرارة) .

2- السيولة أو الميوعة ولذلك فهو يأخذ شكل الوعاء الذي يحتويه.

وتنقسم السوائل عموماً إلى نوعين رئيسيين:

1- سوائل مثالية: وهي عديمة اللزوجة والانضغاطية، ولكن هذا النوع من السوائل غير موجود في الطبيعة.

2- سوائل حقيقية: وهي سوائل تتمتع بقيم غير معدومة للانضغاطية، ولها لزوجة تعبّر عن قوى الاحتكاك الداخلية بين جزيئاتها ، وتختلف قيم هذه الخاصية من سائل إلى آخر ضمن مجالات واسعة ، وتبعاً للشروط المحيطة أو المطبقة على السائل ، وخاصةً في حالة السوائل التي لا ينطبق عليها قانون نيوتن (السوائل غير النيوتونية).

يُعتبر النفط من الناحية الفيزيائية سائل لزج له لون ينسحب من الأصفر أو الأخضر الفاتح وحتى الأسود القاتم ، وذلك تبعاً لتركيبه الكيميائي وعمق المكمن الذي يحويه ومنشأه ، وتعتمد الخواص الفيزيائية للنفط ونوعيته على تغلب أحد الهيدروكربونات أو مجموعاتها المختلفة في تركيبه ، فالنفط الذي تتغلب فيه نسبة الهيدروكربونات المعقدة ويحتوي على كمية كبيرة من المركبات الراتنجية والبرافينية يكون لزجاً وقليل الحركة ، مما يتطلب اتخاذ إجراءات خاصة لاستخراجه إلى سطح الأرض ثم نقله وذلك بما يتناسب ومحتوى النفط من هذه المركبات ، ونظراً لارتباط هذا المحتوى بالصفات الفيزيائية فإنه من المهم الإشارة إلى أن النفط يقسم تبعاً لكمية البرافين إلى : نفط قليل البرافين (يحتوي على البرافين بنسبة حتى 1,5%) ، نفط برافيني يحتوي على البرافين بنسبة تتراوح بين (1.5% - 6%)، نفط عالي البرافين يحتوي على البرافين بنسبة أكبر من (60%). كما يقسم النفط تبعاً لكمية الراتنجات إلى :

نفط قليل الراتنجية يحتوي على راتنجات بنسبة لا تزيد عن (8%) ونفط راتنجي يحتوي على راتنجات بنسبة تتراوح بين(8% - 25%) ، ونفط عالي الراتنجية وهو الذي يحتوي على راتنجات بنسبة تزيد عن (25%). وتجدر الإشارة إلى أن احتواء النفط على المركبات الكبريتية ، يؤدي إلى تقليل جودته ، وإلى حدوث صعوبات عند استخراجه ونقله وتخزينه وتقطيره وذلك نتيجة لدخول هذه المركبات في تفاعلات جانبية عديدة تؤدي إلى تآكل الأنابيب والخزانات والمعدات التكنولوجية الأخرى ، ويقسم النفط تبعاً لكمية المركبات الكبريتية التي يحويها إلى :

نفط قليل الكبريت وهو يحتوي على مركبات كبريتية بنسبة حتى (0,5%) ، ونفط كبريتي وهو يحتوي على مركبات كبريتية بنسبة تتراوح بين (1,9 % - 0,51%) ، ونفط عالي الكبريت وهذا يحتوي على مركبات كبريتية بنسبة أكبر من (1,9%). هذا وتتغير قيم الخواص الفيزيائية للنفط الخام ضمن مجالات مختلفة وذلك باختلاف الشروط التي يتعرض لها على غرار ما يحدث له أثناء مختلف مراحل عمليات الإنتاج وعمليات النقل والتخزين . أي أنّ الخواص الفيزيائية للنفط الخام تتأثر بالشروط الطبيعية المحيطة والشروط التكنولوجية المطبقة عليه أثناء هذه العمليات، وبالتالي يجب دراسة وتحديد الخواص الفيزيائية لهذا النفط أو ذاك

بدقة ومعرفة الشروط التي يتوجب التقيد بها حتى تبقى قيم هذه الخواص ضمن المجالات المسموح بها ، وبما يخدم في تجنب المشاكل التي قد تحدث بسبب تجاوز قيم بعض هذه الخواص أو كلها لحدود التسامح، وبالتالي تحقيق أعلى مردود ممكن فنياً واقتصادياً أثناء تنفيذ عمليات الإنتاج والنقل والتخزين هذه. من أجل دراسة خواص النفط الخام كخواص انسيابية تتعلق بالحالة الفيزيائية السائلة للنفط ، والتي لها تأثير كبير وواضح أثناء عمليات النقل والتخزين وخصوصاً عندما يكون النفط من النوع الثقيل ، فإنه لا بد من استعراض أهم خواصه الفيزيائية .

2-1- أهم الخواص الفيزيائية للنفط الخام :

ترتبط الخواص الفيزيائية للخامات النفطية بتركيبها الكيميائي ومحتواها من البرافينات والمركبات العطرية والصموغ والإسفلتين والمركبات الكبريتية ، وسنستعرض فيما يلي أهم هذه الخواص :

1-2-1- الكثافة :

تُعرف الكثافة بأنها كتلة واحدة الحجم ويرمز لها بالرمز " ρ "

$$\rho = \frac{M}{V} \qquad (1\text{-}1)$$

حيث أن :

M – الكتلة (g , Kg) ...

V – الحجم (cm^3 , m^3) ...

وتُعتبر الكثافة من أهم الخواص تعبيراً عن النفط الخام وإحدى أهم الدلائل الأساسية لجودته، وهي ترتبط بالتركيب الكيميائي للنفط الخام فتزداد بازدياد نسبة الفحوم الهيدروجينية الثقيلة (الهيدروكربونات المعقدة) وخاصةً الصموغ أو الراتنجات والإسفلتين وبالعكس، كما أنها تختلف باختلاف درجة الحرارة، حيث تتناقص بارتفاع درجة الحرارة وتزداد بانخفاضها، وتُعطى كثافة النفط الخام في درجة الحرارة (t) معبراً عنها بواحدات القياس المطلقة بالعلاقة:

$$\rho_t = \rho_{20} - \zeta(t - 20) \qquad (2\text{-}1)$$

حيث أن :

ρ_t - الكثافة الحسابية لأنها تحسب وفقاً لدرجة الحرارة الحالية (t) .

ζ - عامل التصحيح الحراري ، وقيمة هذا العامل تُحسب من العلاقة التالية :

$$\zeta = 1.825 - (0.001315)\,\rho_{20}$$

حيث أن: ρ_{20} - كثافة النفط الخام عند درجة الحرارة $^{\circ}$, 20C kg/m^3 .

وتتراوح قيم كثافة النفط الخام عند درجة الحرارة ($20C^0$)، وعند الضغط الجوي الاعتيادي، عادةً في المجال (0.7 –1.07 g/cm^3)، ولكن بشكل عام فإن النفط ذو الكثافة الأكبر من ($1g/cm^3$) هو نادر الوجود، وحسب كثافة النفط الخام فإنه يُصنّف عالمياً إلى نفط ثقيل ونفط خفيف، حيث يُعتبر النفط الخام خفيفاً فيما لو كانت كثافته أقل من القيمة (0.9 g/cm^3)، ويُعتبر ثقيلاً عندما تكون كثافته أكبر من هذه القيمة.

1-1-2-1 الكثافة النسبية للنفط ودرجات (API) :

غالباً ما يُستخدم في الممارسة التطبيقية للتعبير عن كثافة النفط مفهوم الكثافة النسبية (d) وهي نسبة كتلة حجم معين من السائل (النفط الخام) إلى كتلة نفس الحجم من الماء عند درجة الحرارة ($4C^{\circ}$) ويرمز لها بالرمز (d_4^{20}) وتعني الكثافة النسبية للنفط عند درجة الحرارة $20C^{\circ}$) بالنسبة للماء عند درجة الحرارة $4C^{\circ}$.

وقد أُبتكرت في مجال الصناعة النفطية طريقة أكثر شمولاً للتعبير عن كثافة النفط الخام وذلك باستعمال ما يُسمى بدرجات الكثافة وفق معهد البترول الأمريكي (Amrican Petrolium Inestitiute) وتُدعى اختصاراً (API)، وتُعطى العلاقة بين الكثافة النسبية المعينة بواسطة أجهزة القياس المخبرية ، ودرجات الـ (API) بالمعادلة التالية:

$$API = \frac{141.5}{d_{60}^{60}} - 131.5 \qquad (3\text{-}1)$$

حيث أن : d_{60}^{60} - الكثافة النسبية للنفط بالنسبة للماء عند درجة الحرارة ($60F^{0}$ =$15.5C^{0}$) واعتماداً على درجات الـ (API) فإن النفط يقسم إلى :

API > 40	:	نفط خفيف جداً
30<API<40	:	نفط خفيف
20<API<30	:	نفط متوسط
10<API<20	:	نفط ثقيل
API <10	:	نفط ثقيل جداً

1-2-2-اللزوجة :

اللزوجة هي الصفة أو الخاصية الفيزيائية المميزة للسوائل الحقيقة بأنها تقاوم تغير شكلها، وتُعرف بأنها عكس السيولة أو الميوعة ، ويقال عن سائل بأنه لزج عندما يكون غليظ القوام وقليل الحركة (لا ينسكب بسهولة) ، وتعتبر أهم خاصية فيزيائية للنفط وهي تُعبر عن سلوكيته وحركيته – أثناء ارتشاحه في الطبقات المنتجة، وانتقاله ضمن مواسير الإنتاج أثناء رفعه إلى السطح ، وأثناء تدفقه عبر الأنابيب عند نقله على السطح بواسطة خطوط الأنابيب.

تقاس اللزوجة التحريكية (الديناميكية) في الجملة الدولية (SI) بواحدة (باسكال.ثانيةPa.s)، وتسمى اصطلاحاً (ديكابواز Deca poisse),

وعملياً تقاس اللزوجة بواحدة البواز (P) حيث : (1 Poisse = 10^{-1} pa.s) .

ويُقسم البواز إلى مائة جزء يُدعى كل جزءٍ منها سنتي بواز (CP) وبذلك فإن :

(ICP = 10^{-2} P = 10^{-3} pa.s)

وفي أغلب الحالات تُميز لزوجة السائل أثناء الحسابات الهيدروليكية بمعامل اللزوجة الحركية (الكينماتيكية) ، والتي يرمز لها بالرمز (γ) وهي عبارة عن النسبة بين اللزوجة الديناميكية للسائل (η) وكثافته أي:

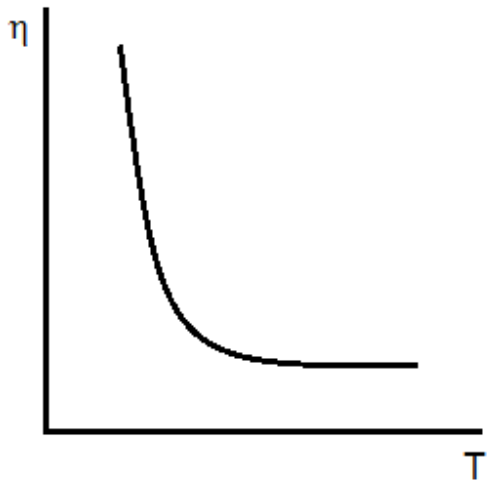
$$\gamma = \frac{\eta}{\rho} \qquad (4\text{-}1)$$

وواحدة قياس هذه اللزوجة (γ) في الجملة الدولية هي (m^2 / s) ، وفي الحياة العملية تقاس اللزوجة الحركية بواحدة تُدعى الـ (ستوكس) نسبةً إلى مكتشفها ، ويُرمز لها بـ (st)، حيث أن $(1\frac{m^2}{s} = 10^4\, st)$ ، ويقسم الستوكس إلى مائة سنتي ستوكس (cst) وبالتالي فإن:

$$(1cts = 10^{-2}st = 10^{-6}m^2 /s)$$

1-2-2-1- تأثير درجة الحرارة على لزوجة النفط :

تتعلق اللزوجة إلى حد كبير بدرجة الحرارة (t)، وكغيره من السوائل فإن العلاقة بين لزوجة النفط الخام ودرجة الحرارة هي علاقة عكسية فكلما ارتفعت درجة حرارته كلما نقصت لزوجته والعكس بالعكس كما هو موضح في الشكل رقم (1-1) .



الشكل رقم (1-1) العلاقة بين اللزوجة ودرجة الحرارة

لذلك عادةً ما يُسخن النفط اللزج أثناء الضخ بهدف تخفيض لزوجته وتعتبر هذه الطريقة من الطرق الفعالة جداً لنقل السوائل غير النيوتونية بشكل عام لكنها مكلفة جداً..، وكثيراً ما يتطلب العمل في الصناعة النفطية حساب لزوجة النفط الخام أو مشتقاته عند درجات حرارة مختلفة على غرار ما يحدث عند إجراء الحسابات التكنولوجية لتصميم خطوط أنابيب النقل .

وقد اقترحت لهذا الغرض أكثر من معادلة "علاقة اللزوجة بدرجة الحرارة " وأهمها معادلة رينولدز – فيلونوفا التالية :

$$\gamma_t = \gamma_*.e^{-u(t-t_*)} \qquad (5\text{-}1)$$

حيث أن :

γ_t : اللزوجة الكينماتيكية المراد معرفتها عند درجة الحرارة (t) .

γ_* : اللزوجة الكينماتيكية عند درجة الحرارة (t_*) وتكون معلومة .

u : معامل الميل لمنحني اللزوجة وواحدته ($1/C^\circ$) ، ويحسب من العلاقة الآتية :

$$u = \frac{1}{t_1 - t_*}.\ln\frac{\gamma_*}{\gamma_1} \qquad (6\text{-}1)$$

حيث أن :

γ_t - اللزوجة الكينماتيكية عند الدرجة t_1 ، وتكون معلومة .

1-2-3- الانضغاطية ومعامل المرونة الحجمي :

تعبّر الانضغاطية عن قابلية السائل للانضغاط أي خاصية تغير حجمه عند تغير الضغط المطبق عليه ، ويسمى العدد الذي يعبر عن التغير النسبي في حجم السائل والناتج عن تغير الضغط بمقدار ضغط جوي واحد عند ثبات درجة الحرارة ، معامل الانضغاط الايزوترمي الحجمي (B_v) ، وواحدة قياسيه هي (pa^{-1}) :

$$B_v = -\frac{1}{V_1}\left(\frac{\Delta V}{\Delta p}\right)_{t=const} \qquad (7\text{-}1)$$

حيث أن :

$\Delta V = V_1 - V_2$ الفرق بين حجمي السائل قبل وبعد تغير الضغط بمقدار $\Delta p = p_2 - p_1$ وتدل إشارة السالب في المعادلة السابقة إلى تناقص الحجم عند ازدياد الضغط .

ويسمى مقلوب معامل الانضغاط الحجمي ، معامل المرونة الحجمية للسائل (E_f) وواحدته هي واحدة الضغط (pa) .

$$E_F = \frac{1}{B_V} \qquad (8\text{-}1)$$

ويُعتبر هذا الأخير أحد الصفات المرنة للسائل ، ويظهر تأثيره بشكل واضح أثناء جريان السوائل وخاصةً في حالة السوائل غير النيوتونية (كالنفط الثقيل) .

1-2-4- الكهربة :

ينتج عن احتكاك مادتين مختلفتين بصفاتهما الفيزيائية والكيميائية شحنات كهربائية تُدعى بالكهرباء الساكنة، وهذا يُفسر تشكل الكهرباء الساكنة في كثير من حالات نقل وتخزين النفط الخام ومنتجاته المكررة ، وذلك نتيجة لحركة السائل في الأنابيب أو عند تعبئة الصهاريج أو خزانات الناقلات النفطية المختلفة ، أو خزانات التخزين . فإذا كان كمون الأنابيب المعدنية المعزولة أو الخزانات المليئة بالنفط كبيراً بالنسبة للأرض فإن أي عملية تماس خارجية ما بين هذه الشحنات والأرض تؤدي إلى تشكل شرارة كهربائية قد تؤدي إلى حريق أو انفجار في المواد البترولية . لمكافحة هذه الظاهرة يجب تأريض كل المنشآت الصناعية النفطية ، وكذلك شبكات خطوط الأنابيب ووسائط النقل الأخرى المستخدمة لنقل النفط الخام ومنتجاته المكررة .

1-2-5-التبخر :

إنّ وجود النفط الخام أو المنتجات البترولية في أوعية مفتوحة إلى الوسط الخارجي يتصف بانتقال جزيئات السائل البترولية في الشروط العادية من الطور السائل إلى الطور البخاري

وهذا ما يُسمى بالتبخر، وتتعلق عملية تبخر النفط الخام أو منتجاته إلى حد كبير بضغط البخار المشبع فكلما كبر هذا الأخير كلما زاد تعرض السائل (النفط) للتبخر، ومن ناحية أخرى يتعلق ضغط البخار المشبع بدرجة حرارة السطح الخارجي للسائل ، فبزيادة درجة الحرارة هذه يزداد ضغط البخار المشبع (الضغط البخاري) ، وبالتالي فإنه إذا خُزّن النفط في خزان مفتوح فسيحدث له تبخر وسيفقد جزءاً من مركباته الخفيفة (المركبات الطيارة) وستكون الكمية المفقودة أكبر كلما ارتفعت درجة حرارة الوسط المحيط ، ولتجنب فقدان الأجزاء الخفيفة من البترول خلال عمليات الإنتاج والنقل والتخزين فإنه من الضروري أن يكون الطريق من البئر وحتى معمل التكرير (المصفاة) محكماً ومعزولاً عن الوسط الخارجي .

1-2-6- درجة الغليان :

تعتمد درجة غليان النفط الخام على محتواه من المركبات الطيّارة ، فالزيوت الخفيفة درجة غليانها $25c^{\circ}$ ، أما الزيوت الثقيلة فقد تصل درجة غليانها إلى أكثر من $100c^{\circ}$.

1-2-7- عامل ناقلية النفط :

يتعلق هذا العامل بدرجة الحرارة ، ويرمز له بـ (ε) ، ويمكن حسابه من العلاقة التالية :

$$\varepsilon = \frac{137}{\rho_{15}}(1 - 0.00054.t) \qquad (9\text{-}1)$$

حيث أن :

ρ_{15} - كثافة النفط الخام في الدرجة ($15C^{\circ}$) .

t – درجة الحرارة .

1-2-8- الفعالية الضوئية :

وتسمى أيضاً المقدرة الدورانية الضوئية وهي تُعبر عن مقدرة المادة على حرف منحى الضوء المستقطب (الاستقطابي) ، وتعود هذه الخاصية في النفط الخام إلى وجود مادتي الفيتوسترين (Fetosterin) ، والكولسترين (Colesterin) فيه ،وقد استخدمت هذه الخاصية للاستدلال على المنشأ العضوي للنفط الخام حيث أن الأولى مادة عضوية توجد في النباتات والثانية توجد في الحيوانات . هذا وهناك أيضاً خواص فيزيائية أخرى للنفط ومنها (الرائحة ، الضغط الجزيئي ، التوتر السطحي ، الخاصية الشعرية ، ...) وهذه الخواص هي قليلة الأهمية بالنسبة لدراسة الخواص الأنسيابية للنفط الخام والأمور الأخرى المتعلقة بنقل وتخزين هذا الخام.

الفصل الثاني:
سلوكية الخامات عالية اللزوجة

1-2- تُحدد الخصائص الانسيابية للنفط أثناء حركته داخل الأنابيب من خلال الدلائل التالية:

1 – اللزوجة النيوتونية .

2 – اللزوجة اللدنة (البلاستيكية) .

3- اللزوجة الفعالة .

4- الإجهادات الأولية التي تنشأ في بداية حركة السائل (إجهاد القص الأولي τ_o) .

5- درجة تجمد الخامات النفطية ومنتجاتها .

يعبّر عن سلوكية جريان السائل بالعلاقة القائمة ما بين إجهاد القص (τ) ومعدل القص (تدرج السرعة $\frac{dv}{dr}$) ، وتُدعى المنحنيات الناتجة عن هذه العلاقة بالمنحنيات الانسيابية التي تعبّر بشكل عام عن سلوكية جريان السوائل ، وعلى أساس هذه العلاقة بين إجهاد القص ومعدل القص، تصنّف السوائل إلى سوائل نيوتونية وسوائل غير نيوتونية. حيث يُظهر السائل النيوتوني النمط البسيط لسلوك التدفق المحدد بتناسب خطي بين إجهاد القص ومعدل القص وفق قانون نيوتن التالي :

$$\tau = \mu.\left(\frac{dv}{dr}\right) \qquad (1\text{-}2)$$

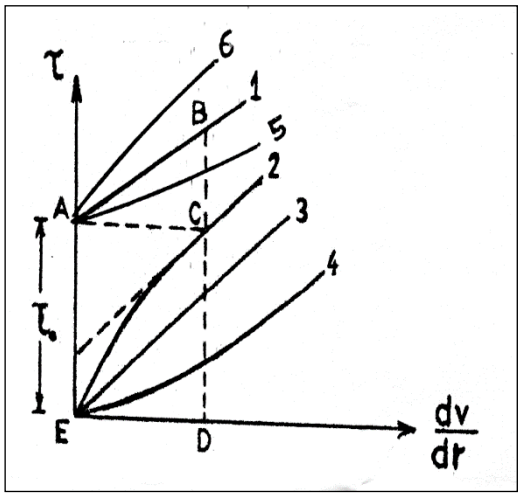
حيث أن :

μ : اللزوجة التحريكية .

v – السرعة اللحظية .

r – نصف قطر الأنبوب .

تتميز السوائل النيوتونية بأنها تنطلق من المبدأ في منحني انسيابها وبعلاقة خطية، المنحني 3 في الشكل (2-1) .

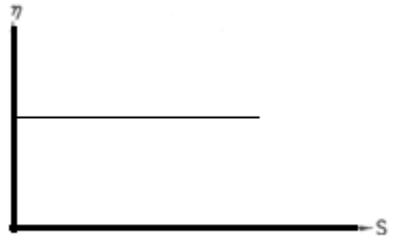


1- السوائل البنغامية (البلاستيكية)
2- السوائل البيزوبلاستيكية
3- السائل النيوتونية
4- سوائل الـ (dilatent)
5- سوائل Casson
6- سوائل Herschell – Bulkley

الشكل (2-1) علاقة إجهاد القص مع معدل القص للسوائل

إن المنحنيات الانسيابية للسوائل النيوتونية التي تمر من المبدأ تشير إلى أن هذه السوائل لا تحتوي على إجهاد قص أولي (τ_o) ، وبالتالي فإنها سوف تبدأ بالحركة عند تطبيق أدنى فرق

ضغط. ويكون المعيار الوحيد المميز لسلوكية السوائل النيوتونية هو اللزوجة النيوتونية التي تبقى ثابتة عند درجة الحرارة والضغط المعطيين بالعلاقة مع معدل القص كما هو موضح في الشكل(2-2) .



الشكل (2-2) علاقة اللزوجة مع معدل القص للسوائل النيوتونية

إنّ الانحراف عن العلاقة الخطية القائمة بين إجهاد القص ومعدل القص يضع السائل في صنف السوائل غير النيوتونية وهذا ما ينطبق على الخامات النفطية الثقيلة التي تحتوي على كميات كبيرة من البارافين والإسفلت .

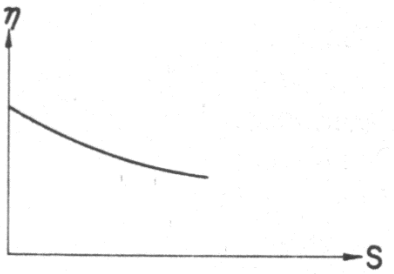
2-2- سلوكية السوائل غير النيوتونية :

يمكن تصنيف السوائل غير النيوتونية حسب تصنيفين رئيسيين كما يلي.

2-2-1- السوائل غير المعتمدة على الزمن :

في هذه السوائل يكون إجهاد القص معتمداً فقط على معدل القص الموافق. تقسم هذه السوائل إلى مجموعتين ، سوائل بدون إجهاد قص أولي وتضم السوائل البيزوبلاستيكية (pesoplastic) ويمثلها المنحني (2) في الشكل (2-1) وسوائل الـ (dilatent) ويمثلها المنحني (4) في الشكل (1-1) . يلاحظ من الشكل (2-1) أن منحنيات سوائل هذه المجموعة تمر من المبدأ الأمر الذي يعني أن هذه السوائل لا تحتوي على إجهاد قص أولي (τ_o) وسوف تبدأ بالحركة عند تطبيق أدنى فرق ضغط إلا أن العلاقة بين إجهاد القص ومعدل القص في هذه السوائل غير خطية .

تضم السوائل البيزوبلاستيكية بعض أنواع النفط الخام الثقيل ، الدهانات ، المستحلبات... وغيرها . وتبدي السوائل البيزوبلاستيكية نقصان اللزوجة مع ازدياد معدل القص كما هو موضح في الشكل (2-3) .



الشكل (2-3) علاقة اللزوجة مع معدل القص للسوائل البيزوبلاستيكية

أما سوائل الـ (dilatent) فإنها تبدي ازدياد اللزوجة مع ازدياد معدل القص كما هو موضح في الشكل (2-4) وتضم هذه السوائل الوحل الرقيق ، دقيق الذرة النشوي في الماء، مركبات الحلوى ...وغيرها. أما العلاقة العامة التي تصف سلوكية سوائل الـ (Dilatent) فهي كالتالي :

$$\tau = k(\frac{dv}{dr})^{n-1}.\frac{dv}{dr} \qquad (2\text{-}2)$$

حيث أن :

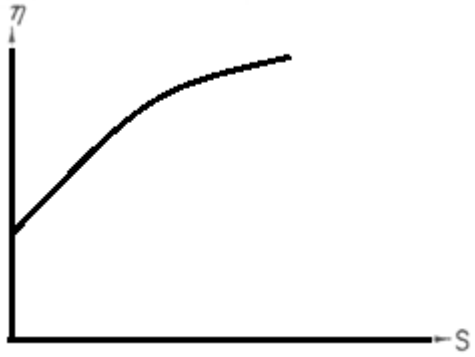
n - ثابت الجريان .

k – ثابت يتعلق بخصائص السائل .

من أجل السوائل النيوتونية يكون ($n=1,k=\mu$)

من أجل السوائل البيزوبلاستيكية يكون $n < 1$

من أجل سوائل الـ(Dilatent) فتكون $n>1$.



الشكل (2-4) علاقة اللزوجة مع معدل القص لسوائل الـ (Dilatent)

أما مجموعة السوائل التي تحتوي على إجهاد قص أولي فإنها سوف لا تبدأ بالحركة إلا بعد أن يطبق عليها فرق ضغط أولي ΔP_o ضروري للقضاء على الإجهاد الأولي τ_o . وتضم هذه المجموعة السوائل البنغامية Pengham أو البلاستيكية ويمثلها المنحني (1) ، سوائل casson ويمثلها المنحني (5) ،سوائل Bulkley– Herschell ويمثلها المنحني [4] (6). أما المعادلات التي تصف سلوك مجموعة هذه السوائل سوف نصنفها فيما يلي :

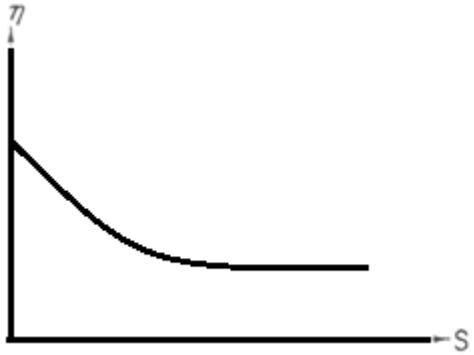
2-2-1-1- المعادلة البلاستيكية البنغهامية :

تُظهر السوائل في هذا الصنف إجهاد خضوع (τ_o) عند معدل قص يساوي الصفر ويُتبع بعلاقة خطية بين إجهاد القص ومعدل القص.

تحدد الصفات الانسيابية لهذه السوائل بواسطة معيارين ، الأول هو إجهاد الخضوع (إجهاد السيولة) وهو الإجهاد الذي يجب التغلب عليه لبدء الحركة. أما المعيار الثاني فهو اللزوجة البلاستيكية التي تعطي السائل صفاته البلاستيكية وتساوي ميل المنحني (1) في الشكل(2 -1).
تُطبق على هذه السوائل معادلة بنغهام التالية:

$$\tau = \tau_o + \mu_{PL}.\frac{dv}{dr} \qquad (3\text{-}2)$$

حيث أن :
τ_o – إجهاد القص الأولي للجريان (إجهاد السيولة) .
μ_{PL} – اللزوجة البلاستيكية .
معادلة بنغهام يمكن إرجاعها إلى قانون نيوتن (2-1) إذا كان $\tau_o = 0$ وعندئذٍ $\mu = \mu_{PL}$.
تُبدي السوائل البنغامية (يمثلها بعض أنواع النفط الخام الثقيل ، المحاليل ، الدهانات... وغيرها) نقصان اللزوجة بازدياد معدل القص كما هو موضح في الشكل (2-5).



الشكل (2-5) علاقة اللزوجة مع معدل القص للسوائل البنغامية

2-2-1-2- معادلة (Herschell – Bulkley) :

تُبدي السوائل الممثلة لهذه الحالة إجهاد سيولة كما في حالة السوائل البلاستيكية البنغامية ولكن العلاقة فيما بين إجهاد القص ومعدل القص غير خطية. والسائل الذي يُظهر هذا السلوك يدعى بالسائل البيزوبلاستيكي بجهد خضوع [6-7-8] .
تُطبق على هذه السوائل المعادلة التالية [5-6-7-8] .

$$\tau = \tau_o + K_H.\left(\frac{dv}{dr}\right)^{1/m} \qquad (4\text{-}2)$$

حيث أن : τ_o , K_H , m – معاملات مميزة للصفات الانسيابية .
هذه المعادلة يمكن إرجاعها إلى المعادلة البلاستيكية البنغامية إذا كان m =1 ، كما يمكن إرجاعها إلى قانون نيوتن (1-1) إذا كان m = 1 و $\tau_o = 0$. ويمكن أن تأخذ هذه المعادلة شكل قانون نيوتن إذا كان $\tau_o = 0$ و $\frac{1}{m} = n$ و $K_H = K$.

2-2-1-3- معادلة (Casson) :

تطبق على هذه السوائل معادلة Casson التالية [5-6-7-8] :

$$\tau^{0.5} = K_1^{0.5} + \left[K_2 \left(\frac{dv}{dr} \right) \right]^{0.5} \qquad (5\text{-}2)$$

حيث أن :

K_1 – إجهاد القص الأولي.

K_2 – اللزوجة البلاستيكية.

تنطبق صفات سوائل هذا النوع على صفات سوائل الحبر والدم وبعض الخامات النفطية [5-6-7-8].

يمكن إرجاع معادلة Casson إلى قانون نيوتن (2-1) عندما يكون $K_1 = 0$ و $K_2 = \mu$

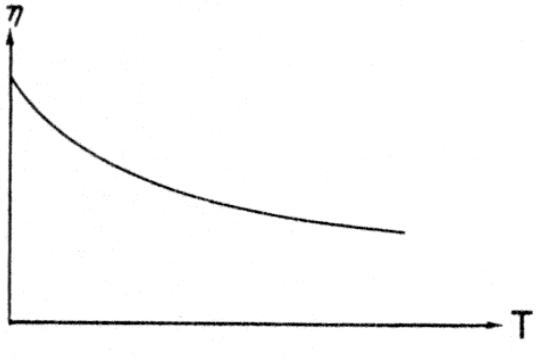
2-2-2- السوائل المعتمدة على الزمن :

لم يُدخل عامل الزمن في الاعتبار في التصنيف السابق ، وعندما يُدخل عامل الزمن بالحسبان عند معدل قص ثابت فإنه يمكن تصنيف السوائل غير النيوتونية إلى نمطين :

التكسوتروبي (Thixotropy) والريوبكسي (Rheopexy) .

2-2-2-1- السوائل التكسوتروبية :

تُبدي هذه السوائل نقصان في اللزوجة بالعلاقة مع الزمن عند معدل قص ثابت كما هو موضح في الشكل(2 -6) .



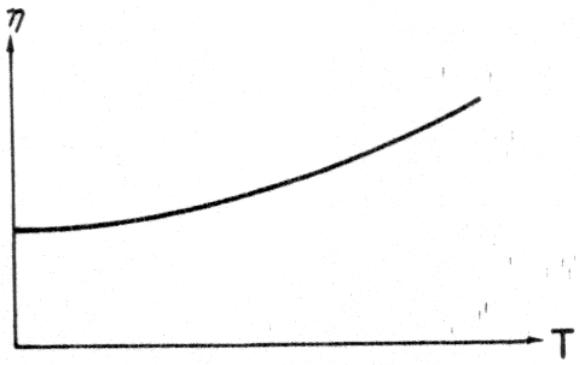
الشكل (2-6) علاقة اللزوجة مع الزمن للسوائل التكسوتروبية عند معدل قص ثابت

تتميز السوائل التكستروبية بقابليتها مع مرور الزمن لإعادة بناء الشبكية (البنية الداخلية) التي تكون قد خربت نتيجة الحركة أو التحريك وتتحول من سوائل غير نيوتونية في حالة السكون أو السرعة المنخفضة (حيث تجري هذه السوائل جرياناً كتلياً) إلى سوائل نيوتونية عند السرعات العالية للجريان بسبب تحطم بنيتها الشبكية نتيجة الحركة.

يُلاحظ هذا النوع من السوائل في مواد مثل الشحوم ، حبر الطابعات الثقيل ، سوائل الحفر، الدهانات وبعض الخامات النفطية.

2-2-2-2- السوائل الريوبكسية :

تُبدي هذه السوائل زيادة في اللزوجة مع الزمن عند معدل قص ثابت كما هو موضح في الشكل (2-7).



الشكل (2-7) علاقة اللزوجة مع الزمن للسوائل الريوبكسية عند معدل قص ثابت

ويعتبر هذا النوع من السوائل نادر الوجود . عندما يكون عنصر الزمن متغير جداً، فإن بعض السوائل تصل إلى قيمة لزوجتها الأخيرة في ثواني قليلة بينما يمكن أن تأخذ سوائل أخرى عدة أيام [5-6] .

2-3- ضياع الضغط عند جريان السوائل غير النيوتونية :

عند دراسة تغير السرعة لسائل يجري في أنبوبة دائرية المقطع نصف قطرها R حيث السرعة أعظمية ابتداءً من محور الأنبوبة باتجاه جدار الأنبوبة حيث السرعة تساوي الصفر تقريباً ، يمكن كتابة قانون بنغهام للسوائل غير النيوتونية بالشكل :

$$\tau = \tau_o - \mu \frac{dv}{dr} \qquad (2\text{-}6)$$

نقتطع داخل الأنبوبة اسطوانة من السائل تتمحور حول محور الأنبوبة ونكتب العلاقة بين القوى المؤثرة على الاسطوانة وبين الإجهاد المؤثر على سطحها الخارجي (الشكل 2-8) .

$$\Delta P.\pi.r^2 = 2.\pi.r.L.\tau \qquad (2\text{-}7)$$

حيث :

ΔP – فرق الضغط المؤثر على مقطع الاسطوانة .

r – نصف قطر الاسطوانة .

L – طول الاسطوانة .

τ - الإجهاد المماسي .

وينتج من المعادلة (2-7) :

$$\tau = \frac{\Delta P.r}{2L} \qquad (2\text{-}8)$$

بتعويض قيمة τ في المعادلة (2-6) وبعد معاملة المعادلة نحصل على معادلة السرعة على مسافة r من محور الأنبوبة :

$$V = \int -\frac{1}{\mu}\left(\frac{\Delta P.r}{2L} - \tau_o\right)dr = -\frac{1}{\mu}\left(\frac{\Delta P.r^2}{4L} - \tau_o.r\right) + C \qquad (9\text{-}2)$$

يتم تعيين ثابت التكامل C باعتبار أن السرعة تساوي الصفر عند جدران الأنبوبة أي عند الشروط :

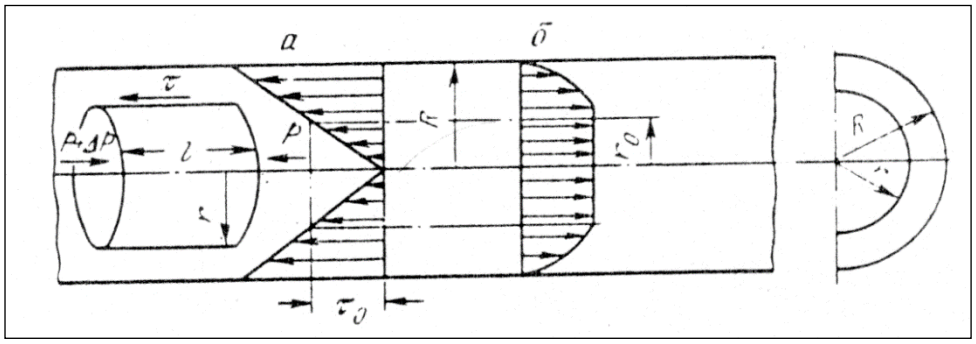
r = R و V= o

يكون :

$$C = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\Delta P.R^2}{4L} - \tau_o.R\right) \qquad (10\text{-}2)$$

بتعويض الثابت C في المعادلة (2-9) نحصل على المعادلة :

$$V = \frac{1}{\mu}\left[\frac{\Delta P\left(R^2 - r^2\right)}{4L} - \tau_o\left(R - r\right)\right] \qquad (11\text{-}2)$$



الشكل (2-8) مخطط توزع السرعة والإجهادات عند جريان السوائل البنغامية

ويبين الشكل (2-8) مخطط الإجهادات المماسية التي تتناقص من قيمتها الأعظمية عند جدار الأنبوبة وحتى الصفر عند المحور .

عندما تبلغ قيمة الإجهاد حداً معيناً τ_o أو أقل فإن صفيحات السائل لا تبدأ بالحركة وبالتالي فإن نواة التيار تتحرك وكأنها جسم صلب .

يعين نصف قطر التيار r_o عندما $\tau = \tau_o$ من المعادلة (2-8) :

$$r_o = \frac{2L.\tau_o}{\Delta P} \qquad (12\text{-}2)$$

أما سرعة نواة التيار V_R فتحدد بتعويض قيمة r_o من المعادلة (2– 12) في المعادلة(2-11)

$$V_R = \frac{\Delta P}{4\mu L}\left(R - r_o\right)^2$$

بحسب الشكل (2-8) فإن نواة التيار تتحرك كجسم صلب أما السائل المحيط فيتحرك بحركة خطية ، ويدعى مثل هذا الجريان بالجريان البنيوي . تحدد غزارة الجريان البنيوي من العلاقة التالية :

$$Q = 2\,\pi r dr.v + \pi r_o^2 .V_R \qquad (13\text{-}2)$$

بتعويض قيمة V وV_R في المعادلة (2-13) وبعد إجراء التكامل نحصل على المعادلة التالية:

$$Q = \frac{\pi R^4 . \Delta P}{8.L.\mu}\left\{1 - \frac{4}{3}\frac{2.L.\tau_o}{R.\Delta P} + \frac{1}{3}\left(\frac{2L.\tau_o}{\Delta P.R}\right)^4\right\} \qquad (14\text{-}2)$$

وهي معادلة بنغهام التي توصل إليها عام 1921 .

كما يلاحظ من المعادلة (2-11) أنه كلما كان فرق الضغط ΔP صغيراً كان نصف قطر نواة التيارr_o كبيراً . وعندما يبلغ ΔP قيمة معينة ΔP_o فإن نصف قطر نواة التيار يبلغ قيمة نصف قطر الأنبوبة R وذلك بحسب المعادلة :

$$\Delta P_o = \frac{2L.\tau_o}{R} \qquad (15\text{-}2)$$

بمساعدة المعادلتين (2-14) و (2-15) نحصل على شكل جديد لمعادلة بنغهام :

$$Q = \frac{\pi.\Delta P.R^4}{8.\mu.L}\left[1 - \frac{4}{3}\frac{\Delta P_o}{\Delta P} = \frac{1}{3}\left(\frac{\Delta P_o}{P}\right)^4\right]$$

وبسبب أن قيمة ΔP_o صغيرة جداً بالنسبة لقيمة ΔP فإنه من الممكن إهمال الحد الثالث في المعادلة وتأخذ المعادلة الشكل التالي :

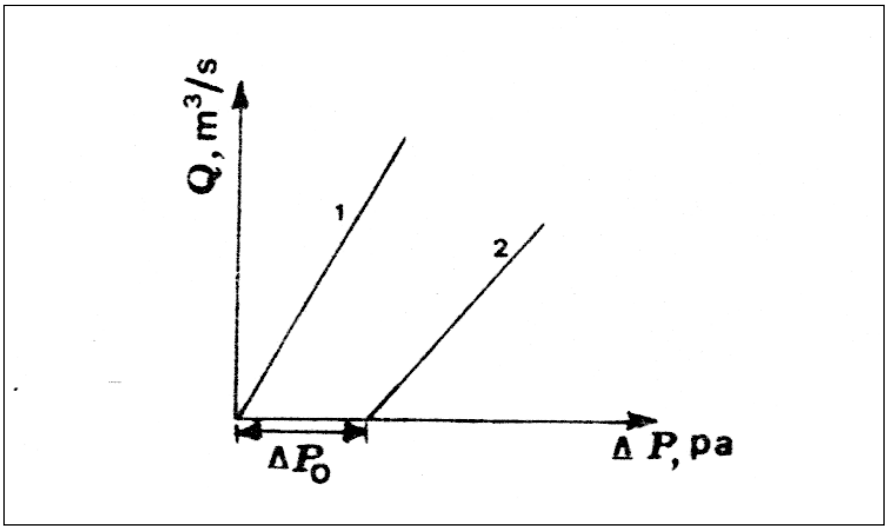
$$Q = \frac{\pi R^4}{8.L.\mu}\left(\Delta P - \frac{4}{3}\Delta P_o\right) \qquad (16\text{-}2)$$

وهي المعادلة التي تصف جريانات السوائل غير النيوتونية ، حيث أنه بمعرفة التدفق Q يمكن تحديد مقدار فاقد الضغط . أما قيمة $\Delta p_0 = 0$ فيمكن تعيينها تجريبياً من منحنيات الجريان كما في الشكل (2-9) .

عندما يكون $\tau_o = 0$ الذي يعني أن ΔP_o فإن المعادلة (2-15) تؤول إلى الشكل التالي حيث تدعى بمعادلة بوازيل :

$$Q = \frac{\pi R^4}{8L\mu}.\Delta P \qquad (17\text{-}2)$$

وهذه المعادلة تستخدم عند حسابات السوائل النيوتونية .



الشكل (2-9) منحنيات جريان السوائل
1- نيوتوني 2- غير نيوتوني

2 -4 - درجة تجمد الخامات النفطية :

إن النفط الخام ومنتجاته ليست مواد خالصة تتجمد في درجة حرارة واحدة من الحرارة كما هو الشأن في العناصر والمركبات الخالصة الأخرى ، ولكنها كما نعلم أمزجة معقدة مؤلفة من عدد من المركبات المختلفة المتفاوتة في درجات تجمدها وبالتالي لا يمكن قياس درجة تجمد حقيقية بل تقاس درجة انعقادها. وتعرّف درجة الانعقاد بأنها درجة الحرارة التي يثخن عندها الزيت المبرّد في شروط معينة ويصبح عقيداً لا يمكن صبه أو ضخه عبر الأنابيب ، دون أن يعني ذلك تجمده. ونظراً للاختلاف الواسع في تركيب النفط الخام لكن مع وجود تشابه نوعي فإنه يمكن تصنيف النفط إلى نوعين أساسيين :

(1) نفط شمعي (برافيني) : ذو نسبة مرتفعة من المركبات الشمعية أو البرافينية المتسلسلة الطويلة ، وهي أقرب إلى التناظر وبالتالي فهي ذات درجات انعقاد أو تجمد أعلى .

(2) نفط قاري : ترتفع فيه نسبة المركبات الحلقية والراتنجية ، وهي مركبات ذات تناظر قليل وهي بالتالي صعبة التبلور وتنخفض درجات تجمدها وانعقادها. ويهم أثناء عملية الضخ المحافظة على الخام متجانس بحالة سائلة، وقد اصطلح العاملون في مجال النفط على وضع عدد من طرائق الاختبار التي يمكن بها تحديد سيلان النفط الخام في درجات الحرارة المنخفضة، وتعد سيولة النفط الخام ومنتجاته من أهم الخواص التي لا بد من دراستها لتحديد المجال الحراري الذي يمكن أن تبقى فيه هذه المواد سائلة تستطيع الجريان (قابلة للضخ) ومتجانسة بمعنى دون تجمد ودون انفصال للشمع وتشكل بنية شمعية .

هناك ثلاثة طرق مختلفة لاختبار سيولة النفط وهي :

2-4-1- تحديد درجة التبلور : وتستخدم في حالة اختبار سيولة النفوط الخفيفة والتي تكاد تخلو من المركبات الشمعية ، ودرجة التبلور هي أدنى درجة حرارة لا تظهر عندها أي بلورات هيدروكربونية .

2-4-2- تحديد درجة الغشاوة : وتستخدم في حالة اختبار سيولة النفوط الشمعية، حيث أنه بانخفاض درجة حرارة هذا النوع من النفط تتبلور المركبات الشمعية وتنفصل عن النفط وتشكل بنية خلوية تعيق حركة السائل وجريانه ، وتعتبر عملية انفصال الشمع إحدى المشاكل المهمة والصعبة أثناء عمليات نقل النفط .

2-4-3- تحديد درجة الانصباب :

وهو اختبار هام ، جاء كبديل لقياس درجات الانعقاد. وتعرف درجة الانصباب على أنها أدنى درجة حرارة يمكن أن يلاحظ عندها جريان النفط المبرد المختبر في شروط معينة ، وهي ترتبط بسهولة ضخ النفط ونقله في درجات الحرارة المنخفضة، كما أنها تتعلق بنوعيته وبمقدار الشمع فيه ، وقد تنهار البنية الشمعية المتشكلة عند تبريد الزيت إذا حرك وقد يستطاع عندئذٍ ضخه في درجات حرارة تقل عن درجة انصبابه . تُقاس درجة الانصباب للنفط ومنتجاته غالباً لاستعمالها في حسابات تصميم خطوط الأنابيب، وضخ هذه المواد عبرها ، وتُعد نقطة الانصباب دليلاً على نسبة المركبات البرافينية والعطرية في النفط فيدل انخفاضها مثلاً على انخفاض نسبة المركبات البرافينية وارتفاع نسبة العطريات.. والعكس بالعكس .

2-5- إجهاد القص الأولي (τ_o) :

تبدي بعض السوائل سلوكاً يشبه سلوك المواد الصلبة عندما يكون معدل القص مساوياً الصفر ، وهذه السوائل لا تنساب حتى تطبيق قوة بمقدار معين ، وتدعى هذه القوة بقيمة الخضوع . حيث أنه تتميز السوائل النفطية الحاوية على البرافين بخصائص انسيابية تتغير مع الزمن ومع الحركة ، فإذا تُرك النفط البرافيني في حالة ساكنة ودرجة حرارة منخفضة لمدة طويلة ، تظهر البنية الشبكية لبلورات البرافين ، ومع مرور الزمن تكتسب هذه البنية متانة كبيرة ، ولتحريك النفط الخام الحاوي على مثل هذه الشبكة البرافينية ، فإنه يلزم تطبيق ضغط بدائي معين يتوافق مع إجهاد القص الأولي τ_o . والجدير بالذكر أن خط الأنابيب يمكن أن يتعرض في أثناء العمل للتوقف مما يسبب مع مرور الزمن ازدياد قيمة τ_o لدرجة لا تستطيع بعدها المضخات تقديم الضغط اللازم للإقلاع ويكون خط الأنابيب في هذه الحالة قد تجمد وخرج عن العمل .

2-6- تبلور البرافين :

يعتمد ذوبان البرافين في النفط الخام على التركيب الكيميائي للنفط ، الضغط ، درجة الحرارة. تقوم درجة الحرارة بدور أساسي في ظهور بلورات البرافين في النفط ، فعندما تنخفض درجة الحرارة تبدأ عملية ظهور البلورات ، وكلما ازداد انخفاض درجة الحرارة ازدادت نسبة انفصال البرافين وبقائه في النفط الخام ، وعندما تقترب درجة حرارة النفط الخام من درجة حرارة تجمد البرافين فإن عدد وحجم بلورات البرافين يزداد بصورة واضحة إلى أن تتشكل معها بنية شبكية فراغية تغطي كامل حجم النفط . حيث أنه عندما تكون درجة الحرارة أخفض من درجة تبلور البرافين فإن الأشكال البلورية المختلفة خصوصاً الأشكال الأبرية والصفيحية تصبح على شكل شبكات لها بنية شبكية صلبة بينما الجزيئات الهيدروكربونية السائلة تكون محتبسة ضمنها بالرغم من أن قيمة الشبكة البلورية تبلغ فقط من 1%-5 من الوزن الكلي

للنفط ، وعند انعدام الحركة يتجمد النفط ولا نستطيع إعادة ضخه وعند هذه الحالة يكون قد تم التوصل إلى نقطة الانصباب ، ونقصان الحرارة أكثر من ذلك يؤدي إلى تهلم السائل .

2-7- مشاكل سلوكية الخامات النفطية الثقيلة عند نقلها بالأنابيب :

إن سلوكية الخامات النفطية عالية اللزوجة غير النيوتونية تؤدي إلى صعوبات تقنية في نقل النفط بالأنابيب من جهة وارتفاع الكلفة الاقتصادية لعملية النقل من جهة أخرى . ونستعرض فيما يلي أهم هذه المشاكل :

2-7-1- ارتفاع قيم اللزوجة :

يؤدي ارتفاع قيمة لزوجة النفط إلى ضياع كبير في الضغط بالاحتكاك خلال الأنابيب مما يستلزم توفر ضغوطاً عالية الأمر الذي يتطلب استخدام عدد كبير من المضخات وأنابيب بسماكات كبيرة مما يؤدي إلى وجوب توفر إمكانيات تقنية كبيرة وكلفة اقتصادية مرتفعة .

2-7-2- درجة الانصباب العالية :

إن ارتفاع درجة الانصباب (في حالة النفط الخام الثقيل) بسبب ازدياد محتوى النفط الخام من البرافينات، يؤثر سلباً على ظروف ضخ هذه السوائل عبر الأنابيب شتاءً ، وقد تصل إلى درجة يصعب عندها ضخ النفط عبر الأنابيب وقد يتوقف الضخ تماماً نظراً لتجمد النفط.

2-7-3- انفصال الشمع وترسبه :

إن ظاهرة انفصال الشمع من الخامات النفطية الشمعية ذات نقطة الانصباب العالية عند نقلها بالأنابيب، تؤدي إلى Y نقاص معدل التدفق وارتفاع قيمة اللزوجة الظاهرية وزيادة قيمة ضياع الضغط . عندما تكون درجة الحرارة أدنى من درجة الغيم (Cloud Point) فإن الشمع يتبلور تدريجياً وينفصل من النفط الخام مشكلاً صفائح رقيقة أو بلورات أبرية وتتكتل هذه البلورات وتشكل بنية هلامية (لزجة) غير ثابتة مما يعطي النفط الصفات الانسيابية للسوائل غير النيوتونية.

الفصل الثالث:
تأثير سلوكية النفط ومستحلباته على تقنية ضخ النفط ومنتجاته عبر الأنابيب

يميل إنتاج النفط حالياً إلى إنتاج الخامات النفطية الثقيلة التي تترافق بمشاكل في الإنتاج والنقل كونها تتميز بلزوجة عالية ومحتوى عالي من البرافين والإسفلت ولها نقطة انصباب مرتفعة ، وكذلك النفوط المستحلبة . لذلك يواجه العاملون في قطاع النفط مشاكل عديدة في أثناء نقل هذه الخامات النفطية بالأنابيب بسبب سلوكها وبسبب تجمد المحتوى الشمعي لهذه الخامات عند درجات الحرارة المنخفضة مما يسبب إعاقة تدفقها أو حتى إيقاف هذا التدفق أحياناً ، الأمر الذي يستدعي معرفة سلوكية هذه الخامات قبل نقلها وبالتالي اقتراح الطريقة المناسبة لنقلها.

بداية لا بد من التعرف على الخواص المرنة للنفط المتمثلة في تحديد هوية السائل نيوتوني أم غير نيوتوني ، لزوجة السائل ، زمن التأخر ، الإجهاد الأولي للجريان .

3-1- سلوكية الخامات النفطية :

تصنيف السوائل Classification of fluids:

تقسم السوائل إلى مجموعتين طبقاً لسلوك تدفقها (Flow behavior) :

سوائل نيوتونية:Newtonian fluids تكون لزوجتها تابعة فقط لدرجة الحرارة ولكنها غير تابعة لمعدل القص (shear rate) أو للزمن وهي تحقق قانون نيوتون للزوجة Newton's Viscosity Law

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dn} = . \qquad (1\text{-}3) \qquad \mu\ \dot{\gamma}$$

حيث:

$\dot{\gamma} = \frac{du}{dn}$: معدل القص (shear rate) ($1/s$).

τ : إجهاد القص shear stress، (N/m^2).

μ : معامل اللزوجة التحريكية Pa.s (Dynamic Viscosity)

كأمثلة عن هذه السوائل يذكر الماء ، المنتجات النفطية البيضاء ، زيوت التزليق الخفيفة والنفط الخفيف .

سوائل غير نيوتونية (Non-Newtonian fluids) :

تكون لزوجتها ليست تابعة لدرجة الحرارة فقط وإنما لمعدل القص و للزمن أيضاً بالنسبة لبعض السوائل . وطبقاً لكيفية تغير اللزوجة بالعلاقة مع الزمن فإن سلوكية تدفق هذه السوائل تصنف إلى :

1- سوائل غير نيوتونية متعلقة بالزمن

(Non-Newtonian fluids, time dependent)

2- سوائل غير نيوتونية مستقلة عن الزمن و هي تحقق قانون بنغهام

(Non-Newtonian fluids, time independent)

(Bingham's Law)

$$\tau = \tau_o + \eta \cdot \dot{\gamma} \qquad (2\text{-}3)$$

حيث :

τ : إجهاد القص ، (pa or $\frac{Dyne}{cm^2}$).

τ_o : إجهاد القص الأولي للجريان أو إجهاد الخضوع Pa, (τ_o) yield stress value

$\dot{\gamma}$: معدل القص (shear rate) ($1/s$)

أولاً : سوائل غيرنيوتونية متعلقة بالزمن :

تكون لزوجة السائل تابعة لدرجة الحرارة ولمعدل القص والزمن . اعتماداً على تغير اللزوجة مع الزمن تصنف هذه السوائل إلى :

تكسوتروبية (Thixotropic time thinning): تترقق مثل هذه السوائل مع الزمن عند سرعة ثابتة بسبب تحطم بنيتها الداخلية وبمعنى آخر تتناقص لزوجتها مع الزمن مع ثبات السرعة وينطوي تحت هذا التصنيف السوائل التالية : سوائل الحفر ، الدم ، الطلاء وبعض النفوط .

ريوبكتيكية (Rheopectic time thickening): تثخن مثل هذه السوائل مع الزمن عند سرعة ثابتة وبمعنى آخر تتزايد لزوجتها مع الزمن مع ثبات السرعة وينطوي تحت هذا التصنيف محلول الجبس المركز .

ثانياً : سوائل غير نيوتونية مستقلة عن الزمن : تكون لزوجة السائل مستقلة عن الزمن و تابعة لدرجة الحرارة ولمعدل القص و إعتماداً على تغير اللزوجة مع تغير معدل القص (shear rate) تصنف هذه السوائل الى :

- سوائل تترقق بالعلاقة مع معدل القص: shear thinning or pseudoplastics

حيث تتناقص لزوجة هذه السوائل بزيادة معدل القص كالشامبو و الصلصة وبعض النفوط و مركز عصير الفاكهة وغيرها و تدعى سوائل بيزوبلاستسكية.

- سوائل تثخن بالعلاقة مع معدل القص shear thickening fluids or dilatant

حيث تزداد لزوجة هذه السوائل بزيادة معدل القص كالرمل الرطب و المحاليل النشوية المركزة ومحلول الجبس .

- سوائل بلاستيكية plastic fluidsحيث تتصف بما يسمى الإجهاد الأولي للجريان أو إجهاد الخضوع (τ_o) yield value وبمعنى آخر فإنه يجب تطبيق إجهاد أولي معين قبل أن يبدأ

السائل بالحركة أمثال هذه السوائل معجون الطماطم ، معجون الأسنان ، كريمات الأيدي ، الشحوم وبعض النفوط الخام الثقيلة.

2-3- سلوكية السوائل : Fluids Rheology

هو علم يهتم بتدفق وتشوه المادة ويصف العلاقة المتبادلة بين القوة والتشوه مع الزمن وقد جاء هذا المصطلح من التعبير اليوناني Rheos ويعني تدفق ويقدر عمر هذا العلم فقط بحوالي 70 سنة وقد أسس من قبل عالمين كانا بحاجة لتوصيف خصائص تدفق السائل وهما رينر و بنغهام Prof.Marcus Reiner و Prof. Eugene Bingham وقد وصف الفيلسوف اليوناني هيركليتوس Heraclitus علم الريولوجيا بـ - Panta rei - أي كل شيء يتدفق ترجمت بعدها إلى مصطلح الريولوجيا من قبل ماركوس رينر ويعني أن كل شيء سيتدفق إذا أنت فقط إنتظرت لمدة كافية .

يصف سلوك السائل عادة إضافة إلى اللزوجة الخواص المرنة properties Elastic التي تعنى بانسكاب المادة وتركيبها البنيوي .

تبدي الكثير من الخامات البترولية الثقيلة التي تحتوي على كميات كبيرة من البرافين والإسفلت خصائص انسيابية تختلف عن تلك التي تبديها الخامات النيوتونية ، وبشكل عام فإن هذه الخصائص تحدد عند جريان النفط داخل الأنابيب من الدلائل التالية :

1- اللزوجة (نيوتونية ، لدنة أوبلاستيكية)

2- الاجهادات الأولية التي تنشأ في بداية حركة السائل (τ_0)

3- درجة تجمد الخامات البترولية

يعبّر عادة عن سلوكية جريان السائل بالعلاقة $\tau \sim \frac{dV}{dr}$ القائمة ما بين إجهاد القص shear stress (τ) ومعدل القص أو(تدرج السرعة $\frac{dv}{dr}$) (shear rate) ($1/s$)، وتُدعى المنحنيات الناتجة عن هذه العلاقة بالمنحنيات الانسيابية الشكل (3-1)، التي تعبّر بشكل عام عن سلوكية جريان السوائل وتدرس بالإستعانة بجهاز اللزوجة الدوار Rotational viscometer أو Rheometer ، الشكل (3-2)، وعلى هذا الأساس تصنّف السوائل إلى سوائل نيوتونية Newtonian fluids وسوائل غير نيوتونية Non-Newtonian fluids.

حيث يُظهر السائل النيوتوني النمط البسيط لسلوك التدفق المحدد بتناسب خطي بين إجهاد القص ومعدل القص.

إن الخامات البترولية الخفيفة ذوات اللزوجة القليلة أو الخامات الثقيلة عالية اللزوجة المسخنة إلى درجات حرارة عالية وكذلك المنتجات البترولية الخفيفة تخضع في سلوكيتها لقانون نيوتن التالي :

$$\tau = \mu.\left(\frac{dv}{dr}\right)$$

حيث : μ - معامل اللزوجة التحريكية (Dynamic Viscosity)

$\frac{dv}{dr}$ - تدرج السرعة (Shear rate)

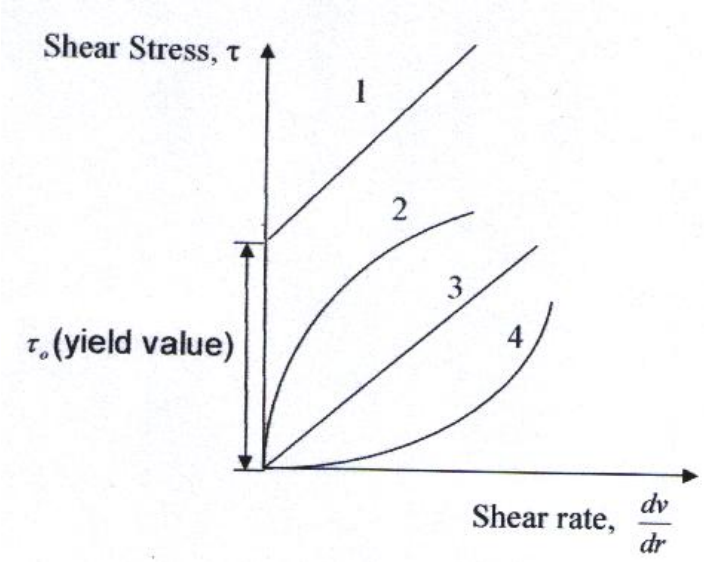
ولذلك تدعى بالسوائل النيوتونية وتتميز بأنها تنطلق من المبدأ في منحني انسيابها وبعلاقة خطية، المنحني 3 في الشكل (3-1).

أما السوائل التي لا تخضع لقانون نيوتن فتدعى بالسوائل غير النيوتونية وتتصف بسلوكية مختلفة فيما بينها (المنحنيات 4 ، 2 ، 1) ، ويمكن التميز بين عدة أنواع من هذه السوائل:

A- السوائل البنغهامية Pengham أو البلاستيكية ويمثلها المنحني (1) حيث تتصف بما يسمى الإجهاد الأولي للجريان أو إجهاد الخضوع (τ_o) yield stress value

B - السوائل البيزوبلاستيكية Pesdoplastic ويمثلها المنحني (2) حيث تتناقص لزوجة هذه السوائل بزيادة معدل القص كالشامبو والصلصة وبعض النفوط ومركز عصير الفاكهة وغيرها.

C- سوائل الـ (Dilatant) ويمثلها المنحني (4) حيث تزداد لزوجة هذه السوائل بزيادة معدل القص كالرمل الرطب و المحاليل النشوية المركزة .



الشكل(3-1) : سلوكية السوائل بحسب جهاز اللزوجة الدوار

1- السوائل البنغامية (البلاستيكية Plastic fluids)

2- السوائل البيزوبلاستيكية (Pseudoplastic or shear thinning)

3- السائل النيوتونية (Newtonian)

4- سوائل الـ (Dilatant or shear thickening)



شكل (3-2):جهاز اللزوجة الدوار نوع بروكفيلد لدراسة سلوكية السوائل
Brookfield Viscometer DV- II

يلاحظمن الشكل أن منحنيات السوائل النيوتونية والبيزويلاستيكية والـ (Dilatant) تمر جميعها من المبدأ الأمر الذي يعني أن السوائل تبدأ الحركة عند تطبيق أدنى فرق ضغط بينما السوائل البلاستيكية سوف لا تبدأ الحركة إلا بعد أن يطبق عليها فرق ضئيل أولي ΔP_o ضروري للقضاء على فرق الجهد الأولي τ_0 لهذه السوائل والعلاقة التي تصف سلوكية السوائل البلاستيكية (البنغهامية) تصفها علاقة بنغهام التالية :

$$\tau = \tau_o + \eta \cdot \dot{\gamma} \qquad (3\text{-}3)$$

حيث أن :

τ_o : إجهاد القص الأولي للجريان .

μ : معامل اللزوجة التحريكية.

$\dot{\gamma}$: معدل القص (shear rate) $(1/s)$

تحتوي بعض السوائل النفطية على كمية كبيرة من البرافين وهي تسلك عند جريانها في الحالة العادية سلوك السوائل البلاستيكية أو البيزوبلاستيكية ، أما عند تسخينها إلى درجة حرارة أعلى من درجة حرارة انصهار البرافين فإن هذه السوائل سوف تسلك بحسب قانون نيوتن أي كسائل نيوتوني . يلعب انخفاض درجة الحرارة دوراً أساسياً في ظهور بلورات البرافين في النفط ، فعندما تنخفض درجة الحرارة تبدأ عملية ظهور البلورات ، وكلما ازداد انخفاض درجة الحرارة ازدادت نسبة انفصال البرافين وبقائه في النفط الخام وعندما تقترب درجة حرارة النفط الخام من حرارة تجمد البرافين فإن عدد وحجم بلورات البرافين يزداد بصورة واضحة إلى أن تتشكل معها بنية شبكية فراغية تغطي كامل حجم النفط مما يعطي للنفط السلوك البيزوبلاستيكي هناك بعض أنواع السوائل التي تتميز مع مرور الزمن بقابليتها لإعادة بناء الشبكية بعد أن تكون قد خربت نتيجة الحركة أو التحريك وتدعى هذه السوائل بالسوائل التكسوتروبية . وتتميز بأنها تتحول من سوائل غير نيوتونية في حالة السكون أو السرعة المنخفضة حيث تجري هذه السوائل جرياناً كتلياً، إلى سوائل نيوتونية عند السرعات العالية للجريان بسبب تحطم بنيتها الشبكية نتيجة الحركة .

تعتبر طريقة النقل بالأنابيب من أرخص الطرق لنقل السوائل ، فهي تؤمن نقل كميات كبيرة وبصورة مستمرة ، إلا أنه في حالة نقل النفط غير النيوتوني فإن الخصائص الانسيابية للنفط الذي يحتوي على كميات كبيرة من البرافينات والأسفلتينات ، تؤثر سلباً على ظروف ضخ هذا النفط عبر الأنابيب ، حيث أن مشكلة ترسب البرافين قد تكون صغيرة أو كبيرة تبعاً للمحتوى البرافيني للنفط الخام ولدرجات الانصباب والغيم للخام ولدرجة حرارة التشغيل ، ففي حالة كون المحتوى البرافيني عالي فإن تكلفة التحكم به تكون كبيرة ، وفي المواقع التي يكون فيها المحتوى البرافيني أقل فإن التكلفة سوف تكون أقل ، وتؤدي ظاهرة انفصال البرافين من الخامات البرافينية ذات نقطة الانصباب العالية عند نقلها بالأنابيب إلى إعاقة تدفق هذه الخامات وإنقاص معدل التدفق ، وإلى ارتفاع قيمة اللزوجة ، وارتفاع قيمة جهد الخضوع ، وإلى زيادة ضياع الضغط ، وقد يصبح الضخ مستحيلاً مع انخفاض درجة الحرارة ، حيث أنه عند انخفاض درجة الحرارة شتاءً تزداد لزوجة النفط إلى درجة يصعب عندها ضخ النفط عبر الأنابيب وقد يتوقف الضخ تماماً ، وهذا يتبعه عدد غير قليل من المشاكل قد يتطلب إجراء عملية تسخين وقشط وتنظيف للأنابيب ، هذا بالإضافة إلى الهدر الكبير في الوقت ، أضف إلى ذلك أنه نظراً إلى تزايد الضغط (الحمل) على المضخة قد يؤدي إلى تعطلها جزئياً أو كلياً أو خروجها من العمل ، هذا وقد يتم اللجوء إلى نقل النفط الخام شتاءً بالصهاريج مما يرتب زيادة كبيرة في كلفة نقل النفط . ولذلك تلافياً للمشاكل المذكورة سابقاً فإنه من الضروري تحسين الصفات الانسيابية للخامات النفطية غير النيوتونية بهدف تحسين ظروف نقل هذه الخامات ، وتخفيض كلفة نقلها .

للربط بين كلاً من الإجهاد الأولي للجريانyield value (τ_o) وفرق الضغط (الطاقة)(Δp_o) اللازمة للتغلب على الإجهاد الأولي ومع الأخذ بعين الاعتبار أن الإجهادات تؤثر على السطح الداخلي للأنبوبة وعلى كامل الطول وتتجه بعكس جهة الجريان وأن (Δp_o) يؤثر على مقطع الأنبوبة، فإنه يمكن كتابة الصيغة التالية التي تصف شرط توازن قوة الضغط مع قوة الإحتكاك لحظة بدء الجريان (بدء الحركة) للسوائل غير النيوتونية:

$$\Delta p_o \cdot \pi \cdot r^2 = \tau_o \cdot 2\pi \cdot r \cdot L \qquad (4\text{-}3)$$

r : نصف قطر الأنبوبة.

L : طول الأنبوبة.

$$\Delta p_o = \tau_o \cdot \frac{2L}{r} \qquad (5\text{-}3)$$

اعتماداً على ماذكر أعلاه، يشار هنا أنه لكي يبدأ السائل غير النيوتوني بالجريان يجب أن يصرف ضغط مقداره Δp_0 للقضاء على الإجهاد الأولي للجريان τ_0 .

الجدير بالذكر هنا أن السوائل غير النيوتونية لاتحقق قوانين الأواني المستطرقة بشكل فوري بسبب وجود الإجهاد الأولي للجريان (τ_o)

3-3- مشاكل سلوكية الخامات النفطية الثقيلة عند نقلها بالأنابيب :

إن سلوكية الخامات النفطية عالية اللزوجة غير النيوتونية تؤدي إلى صعوبات تقنية في نقل النفط بالأنابيب من جهة وارتفاع الكلفة الاقتصادية لعملية النقل من جهة أخرى أهم هذه المشاكل:

أرتفاع قيم اللزوجة : Viscosity

يؤدي ارتفاع قيمة لزوجة النفط إلى ضياع كبير في الضغط بالاحتكاك خلال الأنابيب مما يستلزم توفر ضغوطاً عالية الأمر الذي يتطلب استخدام عدد كبير من المضخات وأنابيباً بسماكات كبيرة مما يؤدي إلى وجوب توفر إمكانيات تقنية كبيرة وكلفة اقتصادية مرتفعة .

درجة الانصباب العالية :Pour point

إن ارتفاع درجة الانصباب (في حالة النفط الخام الثقيل) بسبب ازدياد محتوى النفط الخام من البرافينات، يؤثر سلباً على ظروف ضخ هذه السوائل عبر الأنابيب وبالأخص شتاءً ، وقد تصل إلى درجة يصعب عندها ضخ النفط عبر الأنابيب وقد يتوقف الضخ تماماً نظراً لتجمد النفط داخل الأنابيب .

انفصال الشمع وترسبه : Paraffin deposit

إن ظاهرة انفصال الشمع من الخامات النفطية الشمعية ذات نقطة الانصباب العالية عند نقلها بالأنابيب ، تؤدي إلى انقاص معدل التدفق وارتفاع قيمة اللزوجة الظاهرية وزيادة قيمة ضياع الضغط . عندما تكون درجة الحرارة أدنى من درجة الغيم (Cloud Point) فإن الشمع يتبلور تدريجياً وينفصل من النفط الخام مشكلاً صفائح رقيقة أو بلورات أبرية حيث تتكتل هذه البلورات وتشكل بنية هلامية (لزجة) غير ثابتة مما يعطي النفط الصفات الانسيابية للسوائل غير النيوتونية.

الفصل الرابع
المستحلبات النفطية

نادرا ما ينتج النفط الخام لوحده لأنه بشكل عام يكون ممزوجا مع الماء الذي يسبب عدة مشاكل وغالبا ما يزيد من تكاليف أنتاج النفط .يجب فصل الماء المنتج عن النفط ثم معالجته و التخلص منه بشكل مناسب, علما أن جميع هذه الخطوات تزيد من التكاليف .

إضافة إلى ذلك فان النفط الخام القابل للبيع يجب أن يطابق مواصفات محددة للإنتاج , تتضمن هذه المواصفات كمية الراسب الأساسي و الماء و الملح و هذا يعني أن الماء الناتج يجب فصله عن النفط و ذلك للوصول لمواصفات النفط الخام .

الماء المنتج قد ينتج كماء حر أو بشكل مستحلب.

المستحلبات النفطية المنتظمة هي عبارة عن تشتت قطرات الماء في النفط.

من الصعب معالجة المستحلبات و ربما تشكل مشاكل عملية عديدة في وسائل معالجة النفط الخفيف وطرق فصل الغاز والنفط.

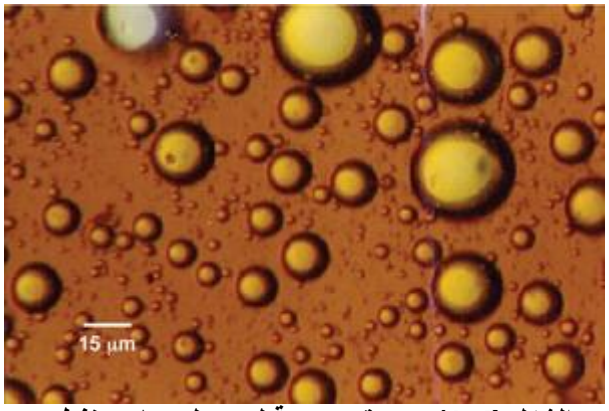
يمكن أن تسبب المستحلبات هبوطا عاليا في الضغط في خطوط التدفق و الذي يقود إلى زيادة في استخدام كاسر الاستحلاب كما يمكن أن تسبب ارتفاعات و انخفاضات في أوعية معالجة النفط الخفيف .تكمن المشكلة في مساوئ المستحلبات خلال فصل الشتاء بسبب درجات الحرارة السطحية المنخفضة .

هذه المستحلبات يجب أن تعالج لإزالة الماء المبعثر و الأملاح غير العضوية المرتبطة للوصول لمواصفات النفط المناسبة للنقل و التخزين و التصدير و كذلك لتقليل التآكل و التآكل الكيميائي في وسائل المعالجة النهائية .

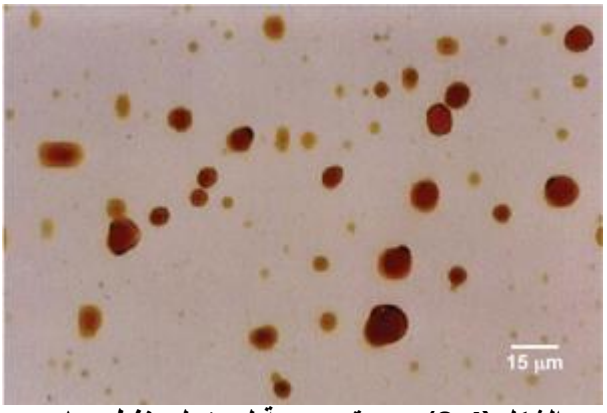
يمكن للمستحلبات أن تتشكل في كافة مراحل إنتاج النفط و معالجته تقريبا داخل الخزانات و الآبار و كذلك ضمن أدوات معالجة النفط الخام ووسائل الفصل و خلال خطوط الأنابيب أثناء عمليات النقل و أخيرا عند تخزين النفط أو معالجته .

1-4- تعريف المستحلب (Emulsion):

المستحلب هو عبارة عن تشتت سائل أو مائع في سائل أو مائع أخر غير قابلين للامتزاج. يسمى الطور الذي يكون فيه السائل على شكل قطرات بالطور المشتت أو الطور الداخلي في حين يسمى الطور الذي تكون فيه قطرات السائل معلقة ضمن السائل الأخر بالطور المستمر أو الطور الخارجي. من أجل المستحلبات النفطية يكون أحد السائلين مائي بينما يكون السائل الأخر هو النفط الخام.تختلف كمية الماء المستحلبة مع النفط الخام على نحو واسع من مستحلب لأخر حيث يمكن أن تنخفض نسبة الماء إلى أقل من 1% في بعض المستحلبات في حين ترتفع في مستحلبات أخرى لأكثر من 80% .يمكن تصنيف المستحلبات النفطية إلى ثلاث مجموعات رئيسية :مستحلبات (ماء - نفط) , مستحلبات (نفط – ماء) , المستحلبات المتعددة أو المعقدة .
1- مستحلبات ماء - نفط (water in oil) : تتألف من قطرات مائية معلقة في طور نفطي مستمر.
2- مستحلبات نفط – ماء (oil in water): تتألف من قطرات نفطية معلقة في طور مائي مستمر.
يظهر الشكلان (4-2) &(4-1) نوعا المستحلبات الأساسية (ماء - نفط) و (نفط – ماء).



الشكل (4-1) صورة مجهرية لمستحلب ماء - نفط



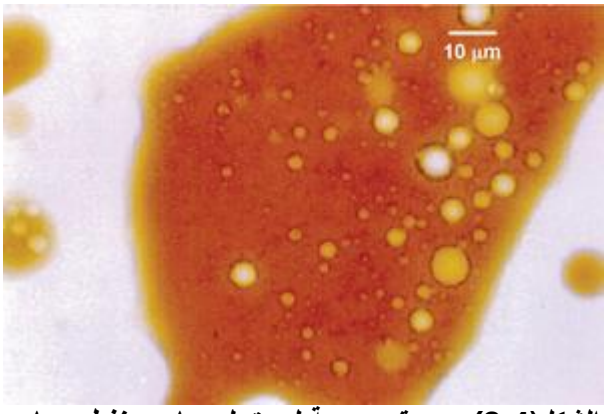
الشكل (4-2) صورة مجهرية لمستحلب نفط - ماء

- من الشائع وجود مستحلبات من النوع (ماء في نفط) في الصناعة النفطية لذلك يشار إلى المستحلبات من النوع (نفط – ماء) في بعض الأحيان كمستحلبات عكسية.

3- المستحلبات المتعددة (complex emulsions): وهي الأكثر تعقيدا , تتألف من قطرات صغيرة جدا معلقة ضمن قطرات كبيرة من مائع مختلف و التي بدورها تكون معلقة ضمن طور أخر مستمر .

مثال : مستحلب (ماء – نفط – ماء) يتكون من قطرات مائية معلقة ضمن قطرات نفطية أكبر منها و التي تكون بالوقت نفسه معلقة ضمن طور مائي مستمر.

مثال: يظهر الشكل (3-4) مثال المستحلب المعقد أو المتعدد.



الشكل(4-3) صورة مجهرية لمستحلب ماء – نفط – ماء

- يعتمد نوع المستحلب المتشكل على عدة عوامل , كقاعدة عامة , عندما يكون حجم الطور الأول صغير جدا بالمقارنة مع حجم الطور الأخر , يكون الطور ذو الحجم الأصغر هو الطور المشتت في حين يكون الطور الأخر هو الطور المستمر.

- عندما يكون نسبة حجم الأطوار قريب من 1 فان العوامل الأخرى هي التي تحدد نوع المستحلب المتشكل.

- تصنف المستحلبات أيضا بالاعتماد على قياس القطرات في الطور المستمر :

- عندما تكون القطرات المبعثرة أكبر من (0.1 مايكرو متر) يكون المستحلب المتشكل من نوع ((مستحلب كبير)) مستحلبات هذا النوع عادة ما تكون غير مستقرة ثيرموديناميكيا وبمعنى أخر فان طوري هذا النوع من المستحلبات سوف ينفصلان بمرور الوقت بسبب ميل المستحلب إلى تقليل التوتر السطحي بالاتحاد و الانفصال .

على أية حال فان اتحاد قطرة يمكنه أن يقل أو حتى يزول نهائيا من خلال إلية التثبيت. معظم المستحلبات النفطية تندرج تحت هذا النوع و بالمقارنة معه يوجد صنف أخر من المستحلبات يعرف بالمستحلبات الصغيرة .

تتشكل هذه المستحلبات بشكل أني أي عند التقاء طورين غير قابلين للامتزاج و ذلك بسبب التوتر السطحي المنخفض جدا بينهما .

المستحلبات الصغيرة تمتلك قطرات صغيرة جدا (أصغر من 10 نانو متر) وتعتبر هذه المستحلبات مستقرة ثيرموديناميكيا.

تختلف المستحلبات الصغيرة بشكل أساسي عن المستحلبات الكبيرة من حيث تشكيلها و أستقراريتها .

2-4- تشكل المستحلبات (Formation of Emulsions):

تتشكل المستحلبات النفطية عند حدوث اختلاط بين الماء و النفط وذلك عند وجود امتزاج كافي و أيضا عند وجود عوامل استحلاب أو المواد المحلبة .

تعتبر درجة المزج ووجود المواد المحلبة عامل حاسم في تشكيل المستحلب. يوجد خلال أنتاج النفط مصادر عديدة للمزج تتضمن :

الجريان خلال صخور المكمن , المضخات الجوفية , التدفق عبر الأنابيب , ورؤوس الإنتاج , الصمامات , التجهيزات و الاختناقات ,المعدات السطحية و فقاعات الغاز الصادرة بسبب تغير الحالة .

تعتمد كمية المزج على عناصر متعددة و التي من الصعب تفاديها .

بشكل عام , المزج ألأعظمي يسبب تشكل قطرات أصغر من الماء مبعثرة في النفط و بالتالي تشكل مستحلب أشد استقرارا .

تظهر دراسة المستحلبات أن قطرات الماء يمكن أن يتغير قياسها من أقل من 1 ميكرومتر حتى أكثر من 100 ميكرومتر.

- العامل الثاني الهام في تشكل المستحلب هو وجود المواد المحلبة .

وجود كمية و كذلك طبيعة المواد المحلبة تحدد إلى حد كبير نوع و شدة المستحلب المتشكل.

المواد المحلبة الطبيعية الموجودة في النفط الخام تتوضع في الجزء الثقيل .

بسبب وجود أنواع مختلفة من النفوط الخام لأن هذه النفوط تمتلك كميات مختلفة من المركبات الثقيلة فان ميول المستحلبات تتغير بشكل واسع .

- النفط الذي يملك كمية صغيرة من المواد المحلبة يشكل مستحلبات أقل استقرارا حيث تنفصل هذه المستحلبات بشكل أسهل نسبيا بينما يشكل النفط الذي يملك كمية مناسبة من المواد المحلبة مستحلبات أكثر استقرارا.

3-4- عوامل الاستحلاب (Emulsifying Agents) :

المستحلبات النفطية الناتجة من نوع ماء في النفط تحتوي نفط , ماء ومواد محلبة أو عوامل استحلاب .

تعمل المواد المحلبة على تثبيت المستحلب و تتضمن منشطات التوتر السطحي و مواد صلبة مقسمة بشكل رفيع .

- **أولا** : منشطات التوتر السطحي : وهي مركبات قابلة للذوبان جزئيا في كل من الماء و النفط. تتكون هذه المركبات من جزء هيدروفوني محب للنفط و جزء هيدروفيلي محب للماء. بسبب هذا التركيب الجزيئي فان منشطات التوتر السطحي تميل إلى التمركز على الحد الفاصل بين الماء و النفط حيث تشكل أغشية سطحية لزجة وذلك يقود بشكل عام إلى انخفاض التوتر السطحي و الذي بدوره يشجع على بعثرة القطرات في الطور المستقر و تشكيل المستحلبات .

إن المواد النشطة سطحيا الموجودة بشكل طبيعي بالنفط تعمل كعوامل استحلاب كالبارافينات ,

الراتنجات , الاسفلتينات , الأملاح المعدنية و المواد الغروية .

تعد هذه المركبات العامل الأساسي في تشكل الأغشية اللزجة التي تحيط بقطرات الماء في العديد من المستحلبات النفطية .

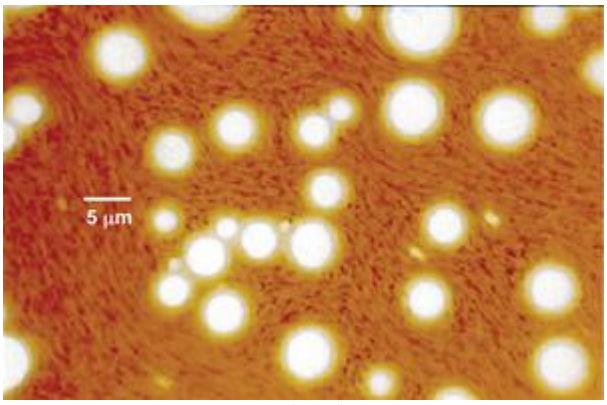
يمكن لمنشطات سطحية أخرى أن تتواجد من خلال المواد الكيميائية المحقونة في الطبقة أو في البئر مثل (سوائل الحفر – مواد كيميائية منشطة – موائع مكافحة البرافينات – عوامل ضبط الأسفلتينات).

- **ثانيا**: المواد الصلبة : تستطيع هذه المواد أن تعمل كمثبتات ميكانيكية غالبا ما تتجمع هذه الجزيئات و التي يجب أن تكون أصغر بكثير من قطرات المستحلب , تتجمع عند الحد الفاصل بين الماء و النفط و مبللة بكل منها .

إن تأثير هذه المواد الصلبة في ثباتية المستحلب يعتمد على عوامل عدة كحجم الجزيء, التفاعلات الجزيئية الداخلية وقابلية التبلل لهذه الجزيئات .

توجد هذه المواد في النفط المنتج و تتضمن جزيئات الطين , الرمل , الاسفلت , الشموع , منتجات التآكل وسوائل الحفر .

الشكل(4-4) يظهر صورة بيانية دقيقة لمستحلب مبينة وجود المواد الصلب



الشكل(4-4)
Photomicrograph of an emulsion showing the presence of solids.

4-4 - الخصائص و الميزات الفيزيائية Characteristics and Physical (Properties):

تتصف المستحلبات بميزات و خواص عديدة , من هذه الخواص المظهر و اللون وجود الماء و الرواسب الأساسية و حجم القطرات و الكتلة و اللزوجة السطحية .

4-4-1- المظهر و اللون (Appearance and Color):

يعتبر المظهر و اللون طريقة سهلة لتمييز المستحلب ووصفه.

الوصف يصبح أسهل بعض الشيء أذا نقل المستحلب إلى داخل أنبوب طرد مركزي زجاجي مخروطي الشكل.

يتغيرلون المستحلب بشكل واسع بالاعتماد على محتوى كل من النفط و الماء و خصائص كل منهما .

الألوان الشائعة للمستحلبات هي : بني غامق محمر - رمادي أو بني مسود .

على أي حال , فان اللون يمكن أن يحصل بالاعتماد على نوع النفط و الماء في تركيب معين

يستخدم في بعض الأحيان لمعان المستحلب و سطوعه في تمييز المستحلب ووصفه.

يبدو المستحلب بشكل عام معتم و مظلم وذلك بسبب تبعثر الضوء و انتشاره على السطح الفاصل بين الماء و النفط.

عندما يحتوي المستحلب على قطرات ذات أقطار صغيرة (مساحة سطح كبيرة) يظهر بلون فاتح ولامع في حين يبدو معتما وأقل لمعانا عندما يحتوي على قطرات ذات أقطار كبيرة (مساحة سطح صغيرة).

إن فهم و إدراك خصائص المستحلبات بواسطة الملاحظات العينية هو فن بحد ذاته ويمكن أن يتطور ويتحسن مع التجربة.

4-4-2- الماء و الرواسب الأساسية (Basic Sediment and Water) : وهي المواد الصلبة و الجزء المائي من المستحلب وكذلك تمثل المياه و الترسبات أو المواد الصلبة السفلية. يوجد عدة طرق ممكنة لتحديد كمية المياه و المواد الصلبة في المستحلبات .

الطرق القياسية وهي الطرق المقترحة و المستخدمة من قبل العديد من المنظمات , بما فيها معهد البترول الأميركي و الجمعية الأميركية لقياس المواد .

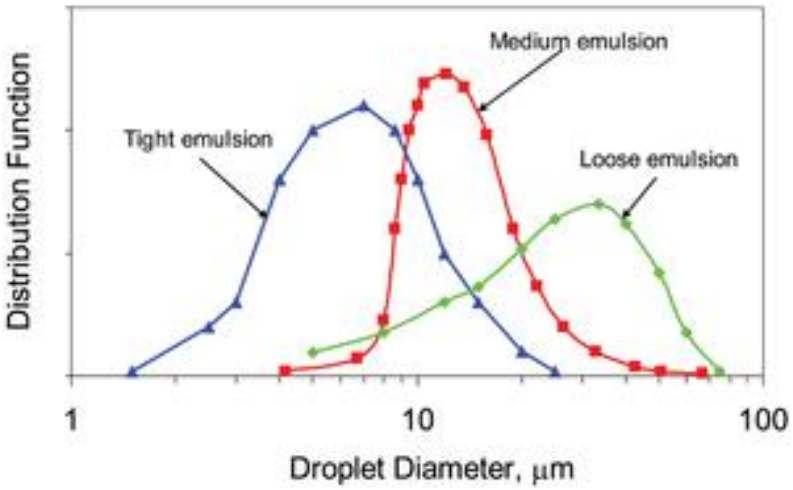
التقنية الأكثر شيوعا لتحديد وقياس كل من الماء و النفط و المواد الصلبة تتضمن إضافة جرعة زائدة طفيفة من كاسر الاستحلاب إلى المستحلب و من ثم طرده مركزيا و من ثم السماح له بالاستقرار . كمية المواد الصلبة و المياه المنفصلة تقاس مباشرة بواسطة أنابيب طرد مركزية مصممة خصيصا لذلك .

يمكن استخدام معايير كارل فيشرو ذلك عندما يكون محتوى الماء هو المطلوب فقط . تتميز هذه الطريقة بدقة كبيرة في حالة المحتويات القليلة من الماء أقل من 2% لكنه يمكن أن تستخدم أيضا لتحديد محتويات أكبر (أكبر من 10%). يوجد طرق أخرى أقل شيوعا تعتمد على الخواص الكهربائية أو تخفيف إشعاعات غاما.

4-4-3- حجم القطرات و توزعها: تحتوي المستحلبات النفطية بشكل عام على قطرات تتجاوز أقطارها (0.1 ميكرومتر) وفي بعض الأحيان أكبر من (100 ميكرومتر). تمتلك المستحلبات بشكل طبيعي مجال حجوم للقطرات و التي يمكن تمثيله بواسطة عامل التوزيع. الشكل /5-4/ يظهر حجم القطرات و توزيعها في المستحلبات النفطية المثالية. إن توزع القطرات في مستحلب تعتمد على عوامل عديدة تتضمن IFT , طبيعة وكمية المواد المحلبة , وجود المواد الصلبة وخصائص كل من الماء و النفط.

توزع القطرات في المستحلب يقيس إلى حد معين ثبوتية المستحلب و استقراره. كقاعدة عامة: عندما يكون معدل حجم قطرات الماء المشتتة صغيرا تكون المستحلبات المتشكلة أشد لذلك فان الوقت المطلوب للفصل سيكون أطول.

الشكل(4-5)



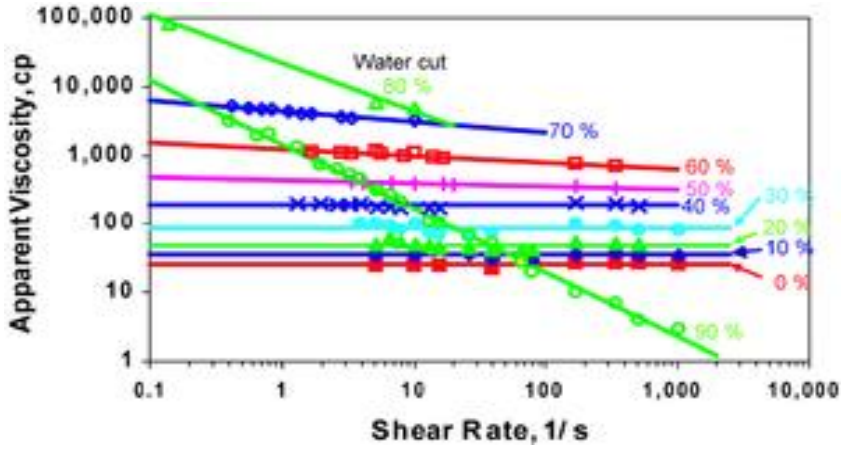
Droplet-size distribution of petroleumemulsions.

تظهر الصور البيانية الدقيقة من (4-1) حتى(4-4) توزع القطرات لعدة مستحلبات.
يحدد توزع القطرات و حجمها في المستحلبات النفطية بواسطة الطرق التالية :
1- التحليل الصوري و المجهري: مثلا المستحلبات في الصور البيانية من (4-1) حتى (4-4) يمكن تحويلها إلى أرقام ثم يقاس رقم الجزيئات الحجمية المختلفة بواسطة برامج تحليل الصور.
2- استخدام الخصائص الكهربائية مثل الناقلية و الثوابت العازلة.
3- استخدام تقنيات الانتشار مثل انتشار الصور, انتشار النيترونات و انتشار الأشعة السينية (أشعة x) .
هذه التقنيات تغطي حجوم القطرات من 0.4 نانو متر و حتى أكثر من 100 ميكرومتر.
4- الفصل الفيزيائي ويتضمن تقنيات الترسيب وتقطير التدفق الحلقي.

4-4-4- لزوجة المستحلب: يمكن أن تكون لزوجة المستحلب أكبر من لزوجة الماء أو النفط كل واجدة على حدا وذلك لأن المستحلبات تسلك سلوك السوائل غير النيوتونية .

هذا السلوك هو نتيجة انضغاط القطرات واندفاعها أو نتيجة اللزوجة التركيبية يعتبر السائل غير نيوتوني عندما تكون لزوجته تابعة لمعدل القص .

في حجم جزئي محدد من الطور المائي ، تسلك المستحلبات سلوك السوائل البيزوبلاستيكية (تخفيف القص) حيث تنخفض اللزوجة عند زيادة معدل القص .الشكل /4-6/ يظهر لزوجة المستحلبات الشديدة عند درجة الحرارة 125F و قطوعات مائية مختلفة .



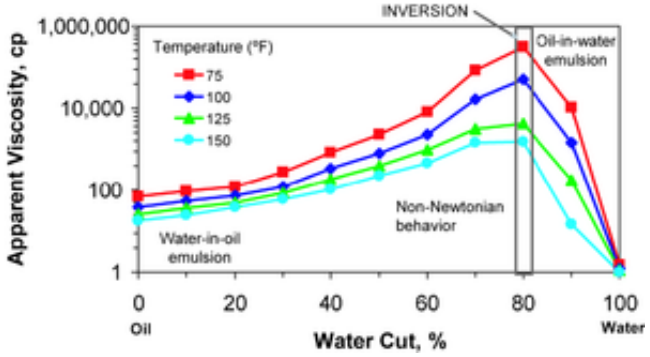
الشكل(4-6)

Viscosities of very tight emulsions at 125F

إن قيم اللزوجة الثابتة أو انطلاق المنحني من الصفر يشير إلى أن المستحلبات تسلك سلوك السوائل النيوتونية والذي يعود إلى محتوى مائي بنسبة 40% ، عند معدل قص مائي أكبر من 40% فإن المنحني سوف ينحرف عن المبدأ أو لن ينطلق من الصفر والذي يشير إلى سلوك السوائل غير النيوتونية .

سلوك السوائل غير النيوتونية هو إما سلوك لتخفيف القص أو سوائل بيزوبلاستيكية تحصل للزوجات العالية جداً كنتيجة لزيادة القص المائي لأكثر من 80% ويصبح الماء الذي كان يمثل الطور المشتت في النوع السابق طوراً مستمرا في هذا النوع ، وفي هذه الحالة فإن المستحلبات المتعددة (ماء – نفط – ماء) يمكن ملاحظتها عند تراكيز مائية عالية جداً (أكبر من 95%).

لدرجة الحرارة أيضاً تأثير هام على لزوجة المستحلب، يظهر الشكل (4-7) مثالاً لتأثير الحرارة على لزوجة المستحلب .



الشكل(4-7)

Viscosities of very tight emulsions at a shear rate of 0.1 (1/s)

تتناقص لزوجة المستحلب مع زيادة درجة الحرارة و تعتمد لزوجة المستحلبات على عدة عوامل:

- لزوجة كل من النفط والماء .

- الحجم الجزئي للمياه المشتتة .

- حجم القطرات وتوزعها .

- درجة الحرارة .

- معدل القص وكمية المواد الصلبة الموجودة .

يظهر الشكلان (4-7)& (4-6) أن لزوجة المستحلب يمكن أن تكون جوهرياً أكبر من لزوجة كل من الماء والنفط عند درجة الحرارة المعطاة .يمكن أن تعطى النسبة بين لزوجة المستحلب ولزوجة النفط الخام المستقل عن درجة الحرارة ذاتها بالعلاقة التقريبية التالية:

حيث أن : $\frac{\mu_e}{\mu_o} = (1 - 3\emptyset + a\emptyset^2)e^{5\emptyset}$ (1-4)

a : عامل يحدد نوع المستحلب

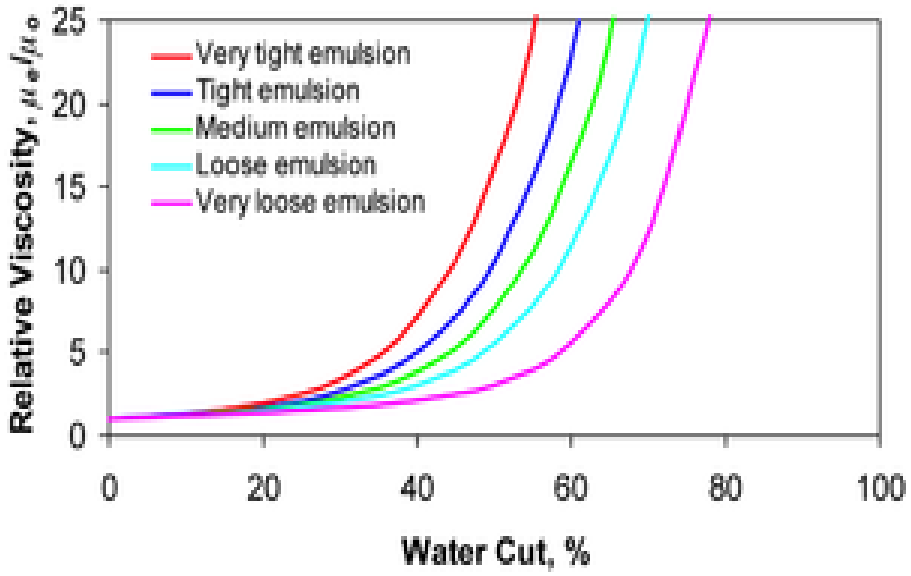
μe : لزوجة المستحلب

μo : لزوجة النفط النظيف عند درجة الحرارة نفسها

Q : معدل القص المائي

إن قيمة هذا التغير تعتمد على نوع المستحلب (7.3 للمستحلبات الشديدة جداً، 5.5 للمستحلبات الشديدة، 4.5 للمستحلبات المتوسطة، 3.8 للمستحلبات الضعيفة التماسك، 3.0 للمستحلبات المفككة جداً).

يظهر الشكل (4-8) لزوجات محسوبة بواسطة العلاقة (4-1).



الشكل(4-8)
Relative viscosities of emulsions

تعطى العلاقة (4-1) تخمينات فقط لقيمة اللزوجة لكن من أجل الحصول على قيم أكثر دقة يجب استخدام المعطيات التجريبية .

تقاس لزوجة المستحلبات باستخدام أجهزة قياس اللزوجة المعيارية ، مثل الأنبوب الشعري وجهاز قياس اللزوجة الدوار.

من المهم أن تكون درجة الحرارة ثابتة أثناء قياس اللزوجة كما يجب الدلالة على قيمتها عند تسجيل قيمة اللزوجة المقاسة .

اللزوجة السطحية : إن المناقشة السابقة كانت محدودة بلزوجة كتلة المستحلب .

تعتبر اللزوجة السطحية أو لزوجة السائل على السطح الفاصل بين الماء والنفط خاصية هامة جداً وخاصة من أجل كسر الاستحلاب .

كما ذكر سابقاً ، المستحلبات من نوع ماء في النفط تشكل أغلفة سطحية صلبة تغلف قطرات الماء ، هذه الأغلفة تعمل على تثبيت المستحلب من خلال تخفيض قوى التوتر الداخلية (IFT) وزيادة اللزوجة السطحية حيث تعيق هذه الأغلفة وتؤخر تحطم الغشاء النفطي خلال اتحاد قطرات الماء وبذلك تقلل بشكل كبير نسبة تحطم المستحلب و انفصاله . يعتمد معدل تحطم الغشاء النفطي بين قطرات الماء على لزوجة القص السطحية .إن اللزوجة السطحية العالية تُبطئ بشكل ملحوظ معدل انفصال السائل لذلك فهي تؤثر على ثبوتية المستحلب واستقراره كما تلعب هذه اللزوجة دوراً مهماً جداً في كسر الاستحلاب.

5-4 - مواضيع خاصة بالمستحلبات النفطية :

4-5-1- أخذ عينات من المستحلبات(Emulsion Sampling) :

من الممكن أن تكون عينات المستحلبات مطلوبة لأسباب عديدة كالتحقق من مواصفات النفط الخام أو لتقييم أداء نظام معالجة المستحلب أو قد تكون ببساطة عينات للفحص المخبري.

تؤخذ العينات من المستحلبات دائماً تحت ضغط معين كما يجب استخدام إجراءات خاصة للحصول على عينات نموذجية .من أجل اختبار مواصفات النفط الخام ليس هاما أن تراعى سلامة قطرات الماء ، بكافة الأحوال فإن نقطة مكان العينة قد تكون حرجة. بشكل عام يجب أن لا يتم سحب العينات من أسفل الوعاء أو الأنبوب حيث يمكن أن يتواجد الماء الحر ويتراكم في هذا المكان ويؤثر بذلك على قراءة كمية المياه والمواد المترسبة الأساسية. كما يجب ألا تؤخذ العينات من أعلى الوعاء لأنها ستكون نفطاً صافيا .

اضطراب وسرعة السائل في الأنبوب ربما يضمن أيضاً أن تكون العينة المأخوذة متجانسة ومثالية . يجب بذل كل جهد ممكن للحصول على عينة تمثل بشكل مباشر السائل المأخوذة منه وبشكل خاص للسوائل الواقعة تحت ضغط .يجب ألا يحدث استحلاب للسوائل خلال أخذ العينات ، على سبيل المثال العينات المأخوذة من الآبار أو من رؤوس الإنتاج تظهر نسبة مئوية عالية من المستحلب.

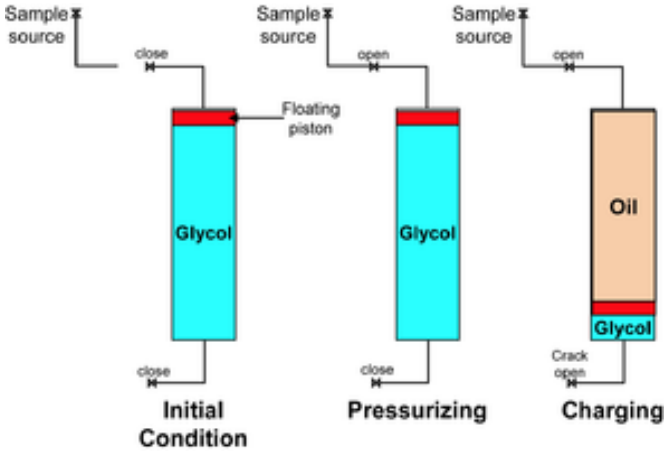
بينما من الممكن ألا يكون النفط والماء داخل الأنابيب بشكل مستحلب وهذا يشير إلى أن عملية الاستحلاب كانت نتيجة لعملية أخذ العينات وذلك بسبب تعرض العينات لضغط معين داخل وعاء أخذ العينات الذي وضعت فيه .

يجب اتخاذ إجراء خاص للحصول على عينات نموذجية من المصادر المعرضة للضغط دون حدوث استحلاب آخر للسوائل .

الشكل(4-9) يظهر الأسطوانة ذات المكبس العائم المستخدمة لهذا الإجراء ، تملأ الأسطوانة بالسائل المضغوط (نفط صناعي مثلاً) وذلك على جانب واحد في المكبس العائم ثم يوصل القسم العلوي من الأسطوانة (الجانب الفارغ) إلى مكان أخذ العينات الذي يجب أن تؤخذ منه العينة .

يغلق الصمام السفلي للأسطوانة ويفتح الصمام العلوي ببطء ليتم ضغط السائل في الأسطوانة لكن غالباً ما تكون هذه الكمية صغيرة نظراً لانضغاطة السائل القليلة في الأسطوانة .

حالما يفتح الصمام العلوي بشكل كلي يتم فتح الصمام السفلي بشكل بطيء جداً لتفريغ السائل المضغوط بينما يسمح بأخذ العينة من القسم العلوي داخل الأسطوانة .



الشكل(4-9)
Sampling of a high-pressure emulsion.

يجب أن ينجز هذا الإجراء بشكل بطيء للحصول على العينة دون حدوث هبوط في الضغط بين الأسطوانة ومكان أخذ العينات .

هناك طريقة أخرى مختلفة تعتمد على شحن العينة داخل اسطوانة بسيطة دون مكبس عائم حيث تملأ هذه الأسطوانة بالماء والزئبق ، عندما يتم أخذ العينة يمكن تقليل الضغط على الأسطوانة بشكل بطيء جداً وبتأثير صغير على العينة .

في الحالات التي من غير الممكن تطبيق الإجراء فيها يوجد طريقة أفضل تعتمد فكرتها على تقليل القص وتخفيض الاستحلاب الذي يمكن أن يحدث بسبب إجراءات أخذ العينات .

4- 6 - برنامج معالجة المستحلب الحقلي:

يوجد افتقار ونقص في دراسة حالات معينة لمعالجة المستحلب وذلك للأسباب التالية :

1- إن نظام معالجة المستحلب محدَّد بموقع معين وبالتالي فإن كل نظام إنتاج هو نظام فريد تتم مراقبته بشكل منفرد لإيجاد الحلول .

2- يجب أن يتم اختيار كاسر الاستحلاب بشكل تقليدي من قبل شركات الخدمة الكيميائية التي تمانع التخلِّي عن المعلومات وهذا بشكل جزئي أيضاً وذلك بسبب قلة فهم عملية معالجة المستحلب .

3- تتم دراسة الاختيار الكيميائي والذي ينتج حالات فشل بقدر ما ينتج حالات نجاح .

4- إن الغرض من معالجة المستحلب واسع جداً وغالباً ما يكون من الصعب معالجة التعقيدات في الدراسات العامَّة ، الأجزاء التفصيلية يجب أن تذكر على نطاق واسع .

5- إن معظم شركات التشغيل النفطية تمتلك بعض أنواع البرامج التي تحقق معالجة مثالية للمستحلب يتضمن ذلك بشكل عام إضافة المواد الكيميائية ، الحرارة وتجديد الأجزاء المعالجة .

إن تصميم المعدات المستخدمة في معالجة المستحلب وكذلك الإجراءات اللازم إتباعها للحقل أو التطبيق المطلوب يتطلب الخبرة وكذلك القرار الهندسي العقلاني.

يجب أن يستند المهندس إلى المعطيات المخبرية أو المعطيات المأخوذة من الحقول أو الآبار القريبة وكذلك إلى التجربة .

لا يوجد حل قياسي لضرب التوازن بينها فمثلاً ، كمية المواد الكيميائية والحرارة اللازمة لتحليل وتبديد المستحلب عند درجات الحرارة العالية أثناء المعالجة يتطلب كميات أقل من كاسر الاستحلاب .

بشكل عام ، تفرض التحليلات الاقتصادية نوع وحجم المعدات المستخدمة وكذلك التوازن ما بين كمية المواد الكيميائية المستخدمة ودرجة التسخين المطلوبة.

في بعض الحالات ، مواصفات النفط الخام قد تقرر النظام المستخدم في معالجة المستحلب وكذلك عوامل أخرى كالضغط الداخلي وحجم المعدات المستخدمة .

يجب أن تتوازن المدخرات في كلفة المعدات مع زيادة رأس المال وكذلك مع نفقات تشغيل شبكات الفصل والجمع و المعالجة .

يمكن أن تعطي الفحوص المخبرية تخميناً حول درجات الحرارة خلال عملية المعالجة وزمن الأستقرار (المكوث) التي يمكن استخدامها للتصميم والتشغيل .

بكل الأحوال تجري هذه الاختبارات تحت شروط ستاتيكية في حين تكون الاستعمالات الحقلية ديناميكية فكمية كاسر الاستحلاب على سبيل المثال تكون أكبر بشكل عام في الفحوص المخبرية بالمقارنة مع كميتها خلال الشروط الحقلية .

مع ذلك فإن الفحص المخبري ممتاز لعرض عينات المستحلبات المختلفة من أجل ، تقييم كواسر الاستحلاب المحتملة وكذلك تأثيرات المتغيرات المختلفة على تصميم المستحلب.

تتضمن التعليمات العامة لبرنامج معالجة المستحلب في الحقل النقاط التالية:

- كل نقطة إنتاج هي منفردة ويجب تقييمها بشكل منفرد لتحديد إستراتيجية الفصل الأفضل ، يجب أن تجري الفحوص المخبرية على عينات حقيقية وذلك لقياس شدة المستحلبات ، على أية حال يمكن أن تستخدم المعطيات المأخوذة من الآبار والحقول القريبة كتوقعات و تخمينات .

- يجب أن يبدأ التخطيط لمعالجة المستحلبات مستقبلاً وذلك في التصميم الأولي لمعدات الفصل مثلاً ، إذا كان من المتوقع زيادة تركيز الماء فإن إجراءات ملائمة يجب أن تتخذ في مرحلة تصميم المعدات أو توجيه الوسائل لمعالجة الازدياد المائي.

- الحاجة إلى التجارب الفعَّالة والعمل المخبري وذلك لتثبيت المستحلب وتمييز الحلول ، يجب تحديد متطلبات المعالجة الفعلية كما لوحظ سابقاً ، للفحوصات المخبرية في تحديد الجرعة الجيدة للفحص وتحديد الإتجاه .

- لإيجاد الأنظمة الصحيحة في المعالجة ، يجب تسجيل كاسر الاستحلاب وبيانات التشغيل الأخرى ذات الصلة (معدلات الإنتاج – القطوعات المائية – درجة الحرارة – التكاليف) وذلك مع مرور الوقت . يمكن أن تفيد هذه البيانات في تحليل جرعات كاسر الإستحلاب (خلال الصيف والشتاء على سبيل المثال) وتكاليف وحدة كاسر الإستحلاب كما يمكن أن تحدَّد بدقَّة بعض النشاطات التي قد تكون مسؤولة عن تكدُّر المستحلب والمشاكل التحتية الأساسية .هذه البيانات هي أيضاً مفيدة جداً لتحقيق برامج مثالية لمعالجة المستحلب .

- يجب أن يراجع برنامج معالجة المستحلب بشكل دوري وذلك بسبب تغيُّر الظروف ، يعتمد تردُّد التقييم على عوامل عديدة تتضمن الكلفة النسبية لاستعمال كاسر الاستحلاب ، تكاليف التسخين ، قيود الطاقة واحتياجات اليد العاملة .

4-7- مانع الاستحلاب (Emulsion Prevention):

من شبه المستحيل إزالة المستحلبات خلال إنتاج النفط الخام ، بكل الأحوال يمكن تقليل مشاكلالاستحلاب وتحسينها بواسطة طرق وممارسات التشغيل الجيدة التالية :

1- معالجة المواد الصلبة : تثبت المواد الصلبة الدقيقة المستحلبات المتشكلة ويجب بذل كافة الجهود لتقليل ملوثات المواد الصلبة خلال الإنتاج .

تتضمن هذه المواد " الإسفلتينات " التي يمكن ضبطها بواسطة علاج الإسفلتيانت الفعالة – التكلُّسات التي يجب تقليلها بواسطة موانع التكلُّس والشموع التي يجب السيطرة عليها بالتسخين .
2- تخفيض منتجات التآكل ، يمكن تخفيض هذه المنتجات بواسطة موانع التآكل الفَّعالة.
3- التحميض : التحفيز باستخدام الحموض يمكن أن تسبب مستحلبات شديدة جداً ولذلك يجب أن تدرس الأعمال الحمضية وتخطَّط بعناية كما يجب أن تتم مراجعة أدائها الحقلي . لتفادي تكدُّر المستحلب يجب أن يشتمل تصميم العمل الحمضي على كواسر الاستحلاب الفعالة عند التجمعات العالية نسبياً ، استخدام مذيبات مشتركة ، وتقليل الرواسب والمواد الناعمة خلال عملية التحميض .

4- المزج أو الاضطراب : يجب أن يتم ضبط الاختناقات والأجهزة الأخرى كالمضخات وذلك لتحسين القص والمزج بينما من الضروري والمفيد وجود كمية معتدلة من المزج ، المزج الحاد يؤدي إلى مستحلبات شديدة أو حتى إعادة الاستحلاب بعد فصل الماء .

5 - توافق المواد الكيمياوية : تستخدم مواد كيميائية كثيرة على نحو متزايد من أجل تحسين ومعالجة النفط الخام

لكن قد تكون هذه المواد مصدراً لمشكلات الاستحلاب لذلك يجب أن تتم دراسات التوافق بالمواد الكيماوية التي تستخدم خلال إنتاج النفط الخام (من المكمن إلى أجهزة الفصل) كما يجب تقييم اتجاهات المستحلبات المتشكلة.

4-8- الاختيار والتحقق الأمثل لكاسر :

توجد أسئلة هامة من أجل وسيلة متاحة تتضمن (هل نحن نستخدم كاسر الإستحلاب الأفضل ؟) و (هل استعمال كاسر الإستحلاب منظَّم) مع ذلك لا يزال اختيار كاسر الإستحلاب يعتبر فن بحد ذاته ، يتم تطويره من خلال الخبرة والتجربة ، على أية حال يوجد الآن طرق متوفرة لإزالة بعض الشكوك المتعاقبة باختيار وفحص كاسر الإستحلاب .يجب أن يبقى في الذهن اختيار كاسر الإستحلاب ونظام معالجة الإستحلاب وهنا بعض الأسئلة يمكن أن تُطرح تتضمن ما يلي :

1- ما هو زمن المكوث للمستحلب في المعدَّات ؟
2- ما هو نوع المستحلب الذي سيعالج ؟
3- ما هي نسبة الاماهة ؟
4- هل النظام ساخن أو هل يمكن تسخينه عند الضرورة ؟
5- ما هو مجال درجة حرارة التشغيل خلال أشهر الصَّيف والشتاء ؟
6- هل الإمداد ثابت أم متغير ؟

بينما تتغير الظروف الحقلية فإن متطلبات كاسر الاستحلاب تتغير أيضاً.درجات الحرارة المنخفضة في الشتاء يُمكن أن تُسبب مشاكل متعلقة بإنتاج الشموع ومشاكل أخرى غيرها . كم إن معالجة الآبار يمكن أن تؤثر على معالجة الاستحلاب فمثلاً تحميض البئر يمكن أن ينتج منتجات إسفلتينية والتي قد تشكّل مستحلبات شديدة ومستقرة.

بشكل مشابه فإن عمليات إنهاء الآبار والمعالجة الكيميائية يمكن أن تسبب مشاكل متعلقة بالاستحلاب داخل وسائل وأدوات المعالجة .يجب أن تكون عواقب عمليات معالجة الآبار والنشاطات الأخرى متوقعة كما يجب أن يكون المشغّل مستعد لزيادة جرعة كاسر الاستحلاب إذا لزم الأمر .

إنَّه من غير الممكن توقُّع ما إذا كان المستحلب نفسه أو جرعة المستحلب نفسها قادرة على تحليل المستحلبات عند تغيُّر الظروف .

لاختيار كاسر الاستحلاب من أجل النظام المُعطى تكون البداية عموماً مع الفحوص المخبرية . تؤخذ عينات المستحلب النموذجية وتنقل داخل أنابيب طرد مركزية .تضاف كواسر استحلاب عديدة (من باعة مختلفين غالباً) إلى أنابيب الطرد المركزي بكميات مختلفة وتجمع بيانات فاصل المياه وتحلَّل وذلك لتحديد كاسر الاستحلاب الأفضل . قبل إجراء الاختبارات يمكن أن تتم دعوة باعة كواسر الاستحلاب للتزوُّد بواحد أو أثنين من كواسر الاستحلاب .

معظم الباعة يريدون اختبار موادهم الكيميائية بمستحلبات من الحقل قبل تقديم كواسر الاستحلاب الأفضل المرشَّحة لديهم .لقد تم مؤخراً تطوير الطريقة الكميَّة لاختبار كاسر الاستحلاب كما تم توصيف الإجراءات الحسابية. لاختيار كاسر الاستحلاب الأفضل هنالك عدة مجموعات من الاختبارات قد تكون ضرورية عند تجمعات ودرجات حرارة وكميات مائية مختلفة .إنَّ جرعات كاسر الاستحلاب المعتمدة في المختبر هي أكبر بشكل عام مما سوف تستخدم في الحقل .يوصى إلى حد كبير بأن تُجرى الاختبارات بمستحلبات جديدة (خلال بضع دقائق من أخذ العينات) وذلك لأن العينات القديمة لها تأثير هام على جرعات كاسر الاستحلاب.

يجب أن تلاحظ عوامل أخرى خلال الفحوصات المخبرية (اللون والمظهر العام للمستحلب ، نقاوة الماء ، الرواسب في المياه ، وجود طبقة مُثارة والمواد الصلبة المفككة والمعلقة داخل التوصيلات) يمكن أن تزود هذه العوامل بمعلومات قد تكون هامة خلال عملية اختيار كاسر الاستحلاب .

بعد الفحوص المخبرية يتم اختيار أثنين أو ثلاث كواسر استحلاب مبشرة من أجل الاختبار الحقلي .خلال التجارب الحقلية ، يجب أن يتم اختبار المواد الكيميائية عند تجمعات ودرجات حرارة تشغيل وأوقات مكوث مختلفة كما تختبر من أجل نقاوة المياه المفصولة والأكثر أهمية ، كمية الماء والملح المتبقية في النفط الخام المُنتج .

إن اختبار المواد الكيميائية على فترات زمنية هي فكرة جيدة أيضاً (كحد أدنى 2-1 يوم وأطول من ذلك إن كان ممكناً) وذلك لتقييم الأداء ومقارنته مع الأداء الكيميائي الإلزامي .

إن كاسر الاستحلاب الأفضل هو الذي يحقق فصل أسرع و أنظف بأقل كلفة ممكنة لكل برميل من النفط الخام .

تتراوح تجمعات كاسر الاستحلاب عموماً من أقل من (5ppm) (تقريباً 1 غالون / 5000 برميل) حتى أكثر من (200ppm) (تقريباً 8 غالون / 1000 برميل) لكن المجال الأكثر شيوعاً هو بين (10 & 50 ppm) بليون بالمتر .

مهما كان مجال كاسر الاستحلاب وجرعته فقد يكون من الممكن تقليل وتحسين استعمال كاسر الاستحلاب بواسطة تقييم المكونات المختلفة في برنامج المعالجة .

4-9- المزج المناسب والصحيح لكاسر الإستحلاب (Proper Demulsifier Mixing):
لكي يكون كاسر الاستحلاب فعالاً يجب مزجه بشكل جيد مع المستحلب حتى يتلامس مع الأغلفة المحيطة بقطرات الماء .إذا كان المزج سيئاً فسيكون كاسر الاستحلاب غير فعال .

يجب أن يتم حقن كاسر الاستحلاب في الطور المستمر بشكل مثالي وذلك من خلال خلاطات باتجاه واحد والتي تكون ضد التيار بشكل كافي بحيث يكون لكاسر الاستحلاب وقت كافٍ للامتزاج بشكل كامل مع المستحلب .

توجد طريقة واحدة لتحسين عملية المزج وذلك بتخفيف كاسر الاستحلاب مع كميات كافية من الـ diluent (مذيب عموماً). ويُحقن خليط كاسر الاستحلاب والمذيب المخفَّف داخل المستحلب.

كمية الخليط الأكبر توفر إمكانية خلط المواد الكيميائية بشكل أكبر مع المستحلب.

وبنفس الطريقة يعزَّز الاضطراب انتشار كاسر الاستحلاب داخل المستحلب وتشتيته كما يزيد من

حتمالية اصطدام قطرات الماء ببعضها البعض ، يجب أن يستمر هذا الاضطراب لمدة طويلة بحيث تكون كافية للسماح للمواد الكيميائية بالوصول إلى السطح الفاصل بين الماء والنفط لكن الكثافة يجب ألَّا تكون كبيرة جداً بحيث تسبب شداً آخر للمستحلب .

يزود هذا المستوى من الاضطراب والتي تحدث في الأنابيب الرئيسية والمتفرعة والصمامات والفواصل عادةً بتدفق طبيعي خلال وحدة معالجة الاستحلاب .

يجب خلط المواد الكيميائية بعناية كبيرة وذلك عندما تكون معدلات التدفق صغيرة جداً من أجل خلط صحيح .

قد تركَّب خلاطات خاصة مثل (صمامات الخلط – ريشات الحقن – الخلاطات المتحركة) وذلك لضمان خلط مناسب لكاسر الاستحلاب .

إن النقطة التي يتم فيها حقن كاسر الاستحلاب هي هامة أيضاً .

عموماً من الأفضل أن يتم حقن كاسر عند مسافة بعيدة قبل الفاصل .

على أية حال ، إذا كان يوجد اضطراب كبير وقص بين النقطة التي يتم فيها حقن كاسر الإستحلاب والنقطة التي يتم فيها نزع الماء فقد يكون من النافع إعادة النظر في ذلك القرار .

في حالات عديدة يحقن كاسر الاستحلاب عند نقاط متعددة وذلك لتحسين استعماله بشكل كلي .على أية حال فإن هذا الإجراء هو خيار من أجل معدات المعالجة ذات الحجم العالي وهنا يجب أن تنظم ثانية نسبة تقسيم كاسر الاستحلاب بين النقاط المختلفة عن طريق التجربة والخطأ .هناك مشكلة أخرى يتم إهمالها أحيانا وهي الخواص السكونية لكاسر الاستحلاب .

تميل المكونات النشطة في بعض كواسر الاستحلاب إلى الاستقرار في أسفل الخزانات وذلك بسبب الصلابة والمزج غير الكافي والاختلافات في الكثافة .إذا حدث هذا فإن حقن منشطات التوتر السطحي داخل وسيلة المعالجة هو إجراء خاطئ.

خلال الأيام القليلة الأولى لحقن و إشباع الخزان قد يعمل كاسر الاستحلاب بشكل مرضي وقد يتدهور الأداء اللاحق له إذ تكون المكونات النشطة قد ترسبت ويتم حقن مذيب ناقل فقط .

إذا لوحظ هذا فإنه يجب إتباع خطوات تتضمن تركيب خلاط في خزان كاسر الاستحلاب أو تبديل كاسر الاستحلاب .

4-10- كاسر الاستحلاب المعالج بشكل أكبر (Demulsifier Overdosing):

إن المعالجة بالمواد الكيميائية أكثر من اللازم أي زيادة في جرعة كاسر الاستحلاب يمكن أن يؤدي إلى تحسن في فصل المستحلبات ولكن ذلك يؤدي إلى زيادة تكاليف كاسر الاستحلاب.

يمكن أن يكون من الصعب تحديد ما إذا كان يوجد معالجة أكثر من اللازم لكاسر الاستحلاب في أداة المعالجة .

هناك طريقة واحدة لتقليل المعالجة الزائدة تتمثل بإجراء اختبارات حقلية دورية وذلك لتحديد المعدلات القصوى لكاسر الاستحلاب.

تتم هذه الاختبارات مرورا بسلسلة من معدلات كاسر الاستحلاب في أداة المعالجة ومراقبة خصائص كل من الماء والنفط الخام المنتجة .

تمكن هذه الاختبارات من التوصل إلى كاسر الاستحلاب الأفضل .

الطريقة الأفضل لتنظيم معدلات كاسر الاستحلاب هي بتركيب أنظمة ضبط آلية أو نصف آلية لكاسر الاستحلاب. تتلقى أنظمة الضبط الإدخالات من الحساسات في وسيلة المعالجة وتتخذ الإجراء اللازم بزيادة أو تقليل معدلات كاسر الاستحلاب كما يمكن لجهاز الضبط أن يحقن كاسر استحلاب إضافي داخل فتحة الفاصل خلال الظروف السيئة وذلك للتقليل من أثرها .

يجب أن يبحث جهاز السيطرة دائما عن الاستعمال الأدنى لكاسر الاستحلاب .

11-4- فهم أسباب المستحلبات (Understanding the Causes of Emulsions):

إنه من المفيد فهم أسباب المستحلبات الثابتة وذلك من أجل التخطيط لمعالجتها .

بعض العوامل التي تثبت المستحلبات (المواد الصلبة الدقيقة ، الاسفلتينات والشموع ، درجة الحرارة ، حجم قطرات الماء ، درجة الحموض ، تركيب المحلول الملحي .....الخ).

بعض العوامل كتركيب المحلول الملحي والقص المائي لا يمكن ضبطها بينما من الممكن ضبط العوامل الأخرى .

يمكن زيادة درجة الحرارة بتسخين النفط الخام أو بطمر أو عزل أنابيب الجريان كما يمكن زيادة حجم قطرات الماء بتقليل المزج أو القص. يمكن أن تزال الرواسب العضوية بمواد ذات خاصيات كيميائية .

المهمة الأولى هي تشخيص الأسباب ، حيث يؤدي ذلك إلى قرارات أفضل للسيطرة على استعمال كاسر الاستحلاب. عدة دراسات لحالات استقصائية قد ذكرت من أجل فهم أسباب المستحلبات الثابتة وتحسين استعمال كاسر الاستحلاب .

- تقييم العملية (*Evaluating the Process*):

إن إجراء تقييم شامل لأداة معالجة المستحلب قد يكون مفيد لتنظيم التكاليف .

- الهيجان (*Agitation*):

بعض التهيج ضروري لمزج كاسر الاستحلاب مع جسم المستحلب و التهيج ضروري أيضا من أجل قطرات الماء كي تصطدم وتزيد من احتمالية إتحادها .

على أية حال يجب بذل كل جهد ممكن لمنع حدوث التهيج المفرط , لأن ذلك قد يؤدي إلى استحلاب آخر .

بمعنى آخر ، مطلوب مستوى معتدل من التهيُّج وتفادي الاضطراب المفرط .

- زمن المكوث (Retention Time):

بعد مزج كاسر الاستحلاب يجب أن يتم الخلط بشكل معتدل لمدة كافية ثم يتبع ذلك سكون (مكوث) تسمح لقطرات الماء بالاتحاد و الترسب.

- الالتئام المستقر كهربائياً (Electrostatic Coalescing):

يمكن أن يساعد اتحاد القطرات بتطبيق حقل كهربائي عالي الفولتية على المستحلب .
هذا مفيد خصوصاً لتنظيف النفط وتقليل محتواه من الماء إلى مستويات متدنِّية جداً (أقل من 0.5%) .
يعمل الالتئام المستقر كهربائياً بشحن قطرات الماء وزيادة تردد اصطدامها والذي يحسِّن فرصتها بالإتحاد.

- إبقاء قاعدة البيانات على الاستعمال و التكاليف Maintaining a Database on (Usage and Costs):

تعتبر كل من التجربة و الخبرة و بيانات كاسر الاستحلاب هامة جدا لأنه من الممكن استخدامها لتنظيم الاستحلاب .

- تتضمن البيانات المثالية لإبقاء قاعدة البيانات ما يلي:

(كل من النفط و الماء – درجات الحرارة – معدلات كاسر الاستحلاب و تكاليفه – وملاحظات بخصوص أي تغيرات أحدثت في وسائل المعالجة).

يزود الجدول (4-1) بيانات مثالية من أجل تشغيل أداة معالجة النفط الخام الخفيف. يمكن تحليل مثل هذه البيانات لتشخيص مشاكل استعمال كاسر الاستحلاب كما يمكن استخدامها أيضا كقاعدة لمقارنة النواتج من أجل كواسر الاستحلاب الجديدة و التجريبية إضافة إلى ذلك فهي تزود بمرجع سهل و سريع من أجل فهم الاختلاف في الاستهلاك و أسباب التكسر, أو زيادة استعمال كاسر الاستحلاب.

MONTH	OIL RATE (1000 BOPO)	WATER RATE (1000 BWPO)	TOTAL RATE (1000 BO)	WATER cut (%)	Demulsifier RATE	Demulsifier cost
JAN	133.0	17.0	150.0	11.3	114.4	4.12
FEB	135.6	18.8	154.4	12.2	115.0	4.02
MAR	145.4	20.4	156.8	12.3	96.2	3.13
APRIL	137.2	18.8	126.0	14.8	89.2	2.97
MAY	128.6	20.8	140.4	13.9	73.6	2.66
JUNE	138.4	22.0	150.4	13.7	79.2	2.67
JULY	138.8	18.4	157.4	11.8	76.3	2.62
AUG	122.6	19.2	141.8	13.5	68.6	2.61
SEP	137.8	20.0	157.8	12.7	85.6	2.93
OCT	112.2	18.2	130.4	14.0	81.9	3.30
NOV	133.0	21.0	154.0	13.4	64.6	3.32
DEC	130.2	15.5	156.8	11.9	115.0	3.96

Table 1-4

12-4- وصف عملية كسر مستحلب من نوع ماء في الزيت:

يتشكل هذا النوع من المستحلبات عند اصطدامه بتركيب يحوي على الأقل كاسر استحلاب واحد قابل للذوبان بالنفط ومنشط سطحي واحد قابل للذوبان بالماء .

هذه الصياغات المائية مفيدة أكثر من الصياغات العضوية التقليدية لكواسر الاستحلاب كما أنه لا حاجة لمذيبات عضوية سامة أو قابلة للاشتعال .

تحدث المستحلبات في مختلف مراحل إنتاج النفط الخام ومعالجته رغم التفاوت من حالة إلى حالة فإن نسبة الماء المنتج من بئر نفطية يمكن أن حتى 90% وزنا أو أكثر من الإنتاج الكلي.

جزء من الماء المنتج يتبعثر على شكل قطرات صغيرة في كافة أنحاء طور النفط مع إمكانية وجود منشطات سطحية طبيعية في النفط الخام بالإضافة إلى منشطات صناعية يمكن إضافتها لاسترجاع النفط الخام المتبقي في الخزان .

كما أيضا ، المستحلبات المتعددة (من نوع ماء - نفط – ماء) التي تتطلب مراحل فصل إضافية يُمكن مصادفتها خلال الإنتاج في الحقول مع نسبة عالية من الماء في النفط وخاصةً عند استخدام البخار لتحريك النفوط الخام الثقيلة .

إن معالجة النفط الخام (التصفية) تشمل تقنيات التحلية المتمثلة بالخلط المتعمد للنفط الخام المنتج مع ماء غسيل نقي وصافي وذلك لانتزاع الأملاح المنحلة بالماء والمواد الصلبة من هناك.

على أية حال ، وجود الماء في النفط الخام يمكن أن يسيء إلى عمليات التنقية حيث ، يسبب تآكل ، يزيد الطاقة الحرارية، ويخفض سعة استعمال خطوط الأنابيب ومعدات التصفية .

يشكل عام يعتقد أن المستحلبات من نوع ماء في النفط تستقر بوجود الأغشية المتشكلة على السطوح الفاصلة بين النفط والماء والتي تمنع اتحاد القطرات المبعثرة .

كما يعتقد بأن النشاط السطحي للنفوط الخام ينتج عن وجود المكونات القطبية والتي تتضمن الإسفلتينات والراتنجات والحموض العضوية . يُستخدم عموماً كل من الطرق الفيزيائية والكيميائية للتغلب على العائق الذي تشكله الأغشية .

تتضمن الطرق الفيزيائية الشائعة : تطبيق حقول كهربائية ، التسخين ، وقوة الجاذبية لزيادة قوة وتردد القطرات لكي تتصادم مع القطرات الأخرى و تترسب .

تتصرف العوامل الكيميائية بشكل نموذجي على الأغشية السطحية إما بواسطة الاستجابة الكيميائية مع مكونات النفط الخام القطبية أو بتعديل بيئة القطرات المبعثرة (كسر الاستحلاب).

تعتمد الصيغ التجارية لكواسر الاستحلاب بشكل كبير على الطرق التجريبية في محاولة للحصول على مواد فعالة بشكل أكبر والتي يمكنها العمل باستخدام جرعات أصغر ومع أزمنة فصل أقصر أيضاً .

تكون الفحوص المخبرية متبوعة نموذجياً بتقييم تحت الشروط الديناميكية الأكثر تمثيلاً بوحدة قياس عملية تجريبية وبوحدة قياس حقلية في النهاية .

إن الحاجة لاختبار تجريبي شامل لكاسر الاستحلاب هي نتيجة مجموعة واسعة من العوامل التي تؤثر على إستقرارية المستحلب والتي تتضمن شروط الاستحلاب كالحرارة والضغط، طبيعة الطور المائي (كالملوحة ودرجة الحموضة) ، نسبة الماء إلى النفط و تركيب النفط الخام .

يعتمد كاسر الاستحلاب الأولي على عكس عامل الاستحلاب لنوع المستحلب المستخدم (مثل منشطات سطحية أيونية) هذه الأنواع المتبوعة بمنشطات سطحية غير أيونية تعتمد على راتنجات أوكسيد الإيثيلين والبروبيلين .

كواسر الاستحلاب االبوليميرية القابلة للذوبان بالماء مثل :

1- emulsion tetrapolymer of methylmethacrylate.
2- butyl acrylate.
3- acrylic acid and methacrylic acid.
4- oxyalkylated alkyl phenol-aldehyde resins and hydrocarbon polymers.

يتم إعداد كواسر الاستحلاب هذه القابلة للذوبان في النفط نموذجيا في مذيبات عضوية لوحدها مثل:

1- toluene
2- xylene, tetrahydrofura
3- dioxane
4- lower alcohols and light gasoline fraction

التي لها حدود غليان من 50c حتى 200c أو في مذيبات عضوية شاملة وماء عن طريق مذيبات عضوية هي غالبا c1-c3.

1- alkanols
2- ethylene diamine
3- diethylene triamine
4- ethanolamines

من بين الأضرار التي يسببها وجود مذيبات عضوية في صياغة كاسر الاستحلاب :
زيادة الكلفة و قابلية الاحتراق السمية .
لذلك تمثل صيغ كواسر الاستحلاب التي لا تتضمن مذيبات عضوية تقدما في مهارة صناعة الاستحلاب.
تم الكشف عن تقنية لكسر الاستحلاب باستخدام كواسر استحلاب قابلة للذوبان بالنفط بالارتباط مع زيادة إضافية من الماء وذلك في الولايات المتحدة.
كما تم الكشف عن مجموعة من كواسر الاستحلاب القابلة للذوبان في النفط و القابلة للذوبان في الماء .
و أعلن في الولايات المتحدة الأمريكية عن كواسر استحلاب قابلة للذوبان بالماء في مزيج مع منشطات توتر سطحي قابلة للذوبان في الماء و أخرى قابلة للذوبان في النفط (براءة اختراع رقم 3756959).
وفقا لذلك فان هدف الاختراعات الحالية هو التزود بعمليات اقتصادية فعالة و مبتكرة لتحليل المستحلبات إلى أجزائها المكونة لها من نفط و ماء أو محاليل ملحية.

هدف أخر للاختراعات الحالية وهو تزويد نظام كاسر الاستحلاب بحيث يقوم بكسر المستحلبات بشكل كامل وسريع عند كل درجات الحرارة المرتفعة و المنخفضة ولا يترك عمليا ماء أو ملح متبقي في المنتج ولا مستحلب متبقي في الماء المنفصل منه.
الهدف الآخر من الاختراع هو استخدام مثل هذه الصيغ لكواسر الاستحلاب من أجل تنفيذ عملية ناجحة لكسر مستحلبات النفط الخام ، حيث تعطي هذه العملية نفط خام خالي من الماء والملح ، ومياه ضائعة تكون خالية جوهرياً من المستحلب .
يتشكل المستحلب عند تلامسه مع تركيب يملك على الأقل كاسر استحلاب واحد قابل للذوبان في النفط و منشط سطحي واحد قابل للذوبان في الماء .
هذه الصيغ المائية مفيدة أكثر من الصيغ العضوية التقليدية لكواسر الاستحلاب حيث لا حاجة لمذيبات عضوية سامة أو قابلة للاحتراق .

الوصف :
الصيغة الحالية لكاسر المستحلب من النوع ماء في النفط يمكن أن تستخدم لكسر استحلاب الماء في النفط وذلك للخدمات النفطية القطبية خلال عمليات الإنتاج والتصفية المختلفة .
في عملية التصفية ، يتم خلط النفط الخام القادم مع ماء غسيل بتأنٍّ لإزالة الأملاح المنحلة والملوثات الأخرى .
لاستخراج الماء من المستحلب (ماء في النفط الخام) الناتج ، يتم خلط المستحلب مع كمية فعَّالة من صيغة كاسر الاستحلاب الحالية .
النفوط الخام التي يمكن كسر مستحلباها بشكل ناجح باستخدام صيغ التركيب الحالية هي بشكل عام نفوط خام قطبية (نموذجياً فوق 10% قطبية في الهيدروكربون وبشكل خاص فوق 20%) .
تمتلك هذه النفوط محتوى عالي من الإسفلتينات (نموذجياً 1-14% من الإسفلتينات)، ومحتوى عالي من المركبات العطرية (نموذجياً 15-30% من المركبات العطرية في الهيدروكربون)، ومحتوى منخفض من البارافينات (نموذجياً أقل من 5% من البارافينات في الهيدروكربون وبشكل خاص أقل من 30%).
لا يقتصر استخدام كواسر الاستحلاب في هذا الاختراع بمستحلبات النفط الخام فقط بل يمتد لكسر المستحلبات الهيدروكربونية المشتقة من (النفط المعدني المصفَّى ، غازولين gasoline، كيروسين kerosene .... الخ) .
يزوِّد استخدام كواسر الاستحلاب بطريقة هي أيضاً ذات قيمة هامة في إزالة الشوائب المنحلة بالماء (كالأملاح اللاعضوية المنحلة) من التراكيب الهيدروكربونية الأساسية خصوصاً في عمليات تحلية النفط الخام .
تستخدم كواسر الاستحلاب كثيراً في مزيج من النفط الخام بنسبة وزن تتراوح بين 1:5000 – 1:50000 ومن الأفضل أن تتراوح بين حوالي 1:10000 و 1:30000 جزء من حجم كاسر مستحلب النفط الخام .
يمكن لكواسر استحلاب أن تستخدم في كلا العمليات المستمرة والمتقطعة من أجل كسر الاستحلاب في النفط الخام.
في عملية المعالجة المتقطعة ، يتم بشكل عام خلط النفط المستحلب في الخزان مع كاسر استحلاب وذلك بتهيُّج مناسب .
يمكن لكاسر الاستحلاب أو لخليط كاسر الاستحلاب مع النفط الخام أن يحسِّن تشتُّت الكاسر في النفط الخام وذلك عند تسخين مستحلب النفط الخام .
بشكل عام ، يتم تسخين الخليط المذكور إلى درجة حرارة حوالي 100F وبشكل أفضل حوالي 130F إلى 140F .

يمكن أيضاً تحقيق تشتُّت كافي لكاسر الاستحلاب في النفط الخام باستخدام مضخة تدوير حيث تقوم هذه المضخة بسحب جزء من مستحلب النفط الخام من الخزان ثم تعيد إدخالها من جديد في أعلى الخزان على سبيل المثال .
في هذا الإجراء يمكن إضافة كاسر الاستحلاب في جهة الامتصاص لمضخة التدوير .
عندما يتم الانفصال إلى طبقات متميزة من الماء والنفط الخام يمكن استخدام طرق ووسائل مختلفة من أجل سحب الماء الحر وفصل النفط الخام المُصفَّى .
يُمكن استخدام كواسر الاستحلاب تحت السطح في البئر النفطية نفسها إمَّا بشكل مستمر أو بشكل دوري وبشكل مخفَّف أو غير مخفَّف وذلك لتحقيق تشتُّت كاسر الاستحلاب ، لذلك وبناءً على مستحلب النفط الخام المُعطى على السطح ، يُمكن للمستحلب أن يُعالج لإحداث الفصل بدون الخطوة الإضافية لدمج كاسر الاستحلاب اللاحقة لانتاج النفط الخام من البئر .
كما يمكن رؤيته ، فإن العملية الواسعة المتأمّلة لكاسر الاستحلاب هنا تتألف من اندماج كاسر الإستحلاب في مستحلب النفط الخام أو الهيدروكربونات الأخرى سامحاً للمستحلب أن يستقر في حالة تخامد حتى يتم الفصل المطلوب إلى طبقات مميزة من النفط والماء .
بشكل عام ، يكون زمن الانفصال أو الترقيق لطبقات النفط والماء حوالي 5 إلى 50 دقيقة والمفضل بحدود 10 إلى 30 دقيقة. بعد ذلك يتم فصل النفط الخام المنقَّى المطلوب.
إن العملية المثالية لكسر الاستحلاب للنفط الخام هي كالتالي :
يجهز الخزان ليحمل تركيب كاسر الاستحلاب إمَّا بشكل مخفَّف أو بشكل غير مخفَّف ويكون متاخماً للنقطة التي عندها يغادر النفط المتدفق البئر .
ولكي يكون ذلك ملائماً ، يُوصل الخزان إلى مضخة حقن قادرة على حقن كاسر الاستحلاب داخل السوائل التي تغادر البئر والتي تمر بعد ذلك خلال خط التدفق إلى حوض الترسيب .
بشكل عام ، تعبر السوائل من البئر إلى حوض الترسيب عند أسفل الحوض لذلك فإن السوائل القادمة لن تفسد الترتيب الطبقي لطبقات النفط و الماء والذي حصل خلال عملية كسر الاستحلاب .
تبدأ عملية كسر الاستحلاب بوضع مضخة الحقن لتغذِّي بنسبة كبيرة نسبياً من حجم كاسر الاستحلاب 1:5000 من كاسر استحلاب النفط الخام).
وهذه النسبة تتناقص لاحقاً إلى أن تتحقق عملية كسر استحلاب مرضية لمستحلب النفط الخام ، لذلك يتم استعمال كمية كافية فقط من كاسر الاستحلاب (مثلاً الكميات مقابل حجم جزء واحد من كاسر الاستحلاب هي من 50000 to 10000 جزء من النفط الخام) .
تعتمد الكمية الفعلية المطلوبة من كاسر الاستحلاب على نظام المعالجة المعيَّن الذي سوف يتم استخدامه .
من ميزات كاسر الاستحلاب وجود تركيب مائي يشمل أساساً على :
1- كاسر استحلاب واحد على الأقل قابل للذوبان في النفط .
2- منشط سطحي واحد على الأقل قابل للذوبان في الماء .
3- ماء للموازنة .
قد يكون كاسر الاستحلاب المنحل بالنفط متواجداً بتركيز من حوالي 10% – 50% من الوزن في الصيغة المائية بينما يتواجد المنشط السطحي المنحل بالماء بتركيز من حوالي 0.2% الى8% من الوزن في الصيغة ذاتها .
ربما يكون الكاسر المنحل بالنفط عبارة عن مجموعة من :

(dicarbamate and apolyoxy alkylated alkylphenol resin)

(dicarbamate) تتشكل كنتيجة لتفاعل حوالي 1-15% من الوزن (diisocyanate) مع حوالي 85-90% من الوزن
(poly oxyalkylated) وتؤلف الصيغة التالية :
H(OCH2CH2) x (OR1)YOR2
حيث :
Y : عدد صحيح من 2 to 7 .
R1 : نصف القطر المختار من المجموعة المؤلفة من -CH2CH2

R2 : نصف القطر المختار من المجموعة المؤلفة من H- و CH(CH2CH2OH)2
X : عدد صحيح من 0 to 40 .
و poly oxylated alkyl phenol resin)) المذكور يُكوِّن الصيغى حيث :
a : عدد صحيح من 1 to 8 .
b : عدد صحيح من 1 to 40 .
c : عدد صحيح من 0 to 40 .
R1 : نصف القطر المختار من المجموعة المؤلفة من -CH2CH2-
R3 : مجموعة هيدروكربونية تتكون من 4-12 ذرة كربون على طول السلسلة .

علاوةً على ذلك (dicarbamate) قد ينتج عن تفاعل (toluene disocyanate) مع (oxyalkylated polyol) قد يكون الراتنج المذكور عبارة عن (ethoxylated / propoxylated nonylphenol formaldehyde condensate)

أما منشط التوتر السطحي المنحل بالماء فربما يكون عبارة عن مجموعة من :
(sulfated nonyl phenol ethoxylate and octylphenol ethoxylate)
نسبة منشطات توتر سطحي من حوالي 0.2:1 إلى حوالي 1.2:1
هناك ميزة أخرى لهذا الاختراع تتمثل بطريقة فصل الماء من مستحلب النفط الخام والتي تتضمن الخطوات التالية :

1- يعالج المستحلب المذكور مع كميَّة فعَّالة من التركيب المائي المذكور في الميزة الأولى لهذا الاختراع .
2- تقترب قطرات الماء من بعضها في المستحلب المذكور حتى تتحد .

- قد يتم اختيار كاسر الاستحلاب المنحل بالنفط من المجموعة المؤلفة من :

1- oxyalkylated alkyl phenol resins
2- oxyalkylated amines, glycol resin esters
3- bisphenol glycol ethers
4- bisphenol glycol esters
5- salts of alkylaryl sulfonic acid

تتفاعل هذه المركبات مع تركيبات أخرى يتم اختيارها من المجموعة التي تشتمل على :

1- diepoxides and polycarboxylic acids
2- unreacted oxyalkylated polyols
3- unreacted oxyalkylated phenolic resins

نتيجة لذلك , يمكن لكاسر الاستحلاب أن يكون بشكل مفرد أو كمجموعة أو بشكل مزيج من أكثر من كاسر استحلاب واحد.
ان كاسر الاستحلاب الذي سيستخدم سواء كان مفردا أو بشكل مزيج فانه سوف يعتمد على النظام المحدد للمعالجة , لذا من المتوقع أن أي كاسر استحلاب قابل للذوبان في النفط يمكن استخدامه لتطبيق هذه الطريقة.
- كاسر الاستحلاب المفرد المفضل هو (Dicarbamate) و الذي ينتج عن تفاعل (Di- isocyonate) مع (polyoxyalkylated) .
مزيج كاسر الاستحلاب المفضل هو (dicabamate) في مزيج مع oxyalkylated (nonylphenol) resin.

13-4- منشطات التوتر السطحي القابلة للذوبان في الماء:
(The water soluble surfactants water):

تعد هذه المنشطات مفيدة لتطبيق هذه المعالجة و تتضمن :

1-sodium isopropyl naphthalene sulfonate
2- alkylaryl sulfonates
3-mixed octyldecylamine octyldecylguanidine polyoxyethanol

بالإضافة إلى منشطات أخرى يتم الحصول عليها بموجب التنوع الكبير للأسماء في الصناعة وتضم :

1- sodium dodecylbenzene sulfonate
2- sodium lauryl sulfate
3- sodium octadecyl sulfate
4- sodium alkyl sulfates
5- ethoxylated nonylphenols
6- phosphated fatty alcohol ethoxylates

- المنشطات الكاتيونية تفيد أيضا في تطبيق المعالجة و من بينها مركبات الامونيوم :

1- C12-Cl6 alkyl quaternary ammonium salts
2- dimethyl benzyl ammonium chloride

- إن كمية منشطات التوتر السطحي المستعملة سوف تتبع بشكل متناسب لكمية كاسر الاستحلاب أو مزيج كاسر الاستحلاب المستخدم في الصيانة.
- منشطات التوتر السطحي المستعملة سواء كانت مفردة أو كمزيج فإنها سوف تعتمد على كاسر الاستحلاب المختار لمعالجة النظام المحدد و الذي يحقق الفائدة المطلوبة .
تتضمن خلائط منشطات التوتر المفضلة المنحلة بالماء ما يلي :

1- octylphenol ethoxylate with nonylphenol ethoxylate sulfat
2- sodium dodecyl sulfate with C8-Clo alkyl glucopyranoside ether

يتمَّ تركيب كاسر الاستحلاب (dicarbamate) المنحل بالنفط وذلك وفقاً للإجراء التالي :
تفاعل (diisocyanate) مع مركب (polyoxyalkylated) وذلك عند درجة حرارة بحدود 40c- 120c ولمدَّة زمنية تتراوح بين 5 دقائق و 3 ساعات .
يُعدُّ هذا التفاعل بسيط وسريع نسبياً .
حالما تدمج المكونات عند درجة الحرارة الملائمة فإن التفاعل يحدث عملياً بشكل آني رغم ذلك يتم الإبقاء على درجة الحرارة لبعض الوقت للتأكد من تمام التفاعل .

الفصل الخامس :
طرق نقل النفط ومنتجاته

لنقل النفط الخام ومنتجاته المكررة إلى مسافات قصيرة أو بعيدة يستخدم في العالم عدداً من الطرق نذكر منها :

5-1- النقل بواسطة صهاريج السكك الحديدية

: (Transporting by railroad tankers)

تعتمد هذه الطريقة بصورة أساسية على نقل النفط ومشتقاته المكررة والغاز المميع باستخدام صهاريج السكك الحديدية ولهذا تسعى الشركات النفطية إلى بناء مراكز توزيع واستقبال النفط الخام أو منتجاته بالقرب من خطوط السكك الحديدية بغية الاستفادة من وجودها و الاستغناء عن إنشاء سكك حديدية لأن كلفتها عالية جداً .



الشكل (5 -1)قطار السكك الحديدية

أما صهاريج السكك الحديدية فهي عبارة عن خزانات معدنية أفقية مركبة على عجلات خاصة تربط ببعضها البعض وتعبأ بالنفط أو البنزين أو الكيروسين... ليتم قطرها إلى مراكز الإستهلاك والتوزيع . و تصنع أنواع متعددة من الصهاريج بسعات مختلفة
(m^3(120- 90- 60- 50-25) وتعتبر الصهاريج من حمولات (50) أو (60) m^3 من أكثر الأنواع انتشاراً .
تجهز هذه الصهاريج بكافة المعدات والأجهزة التي تضمن لها عمليات التعبئة والتفريغ .
ولحماية هذه الصهاريج من ارتفاع الضغط بداخلها أو تخلخله فيجهز كل صهريج بصمام أمان، كما أن الصهاريج المخصصة لنقل المنتجات النفطية العالية اللزوجة (الفيول) مثلاً تجهز بوسائل تسخين خاصة تسمح لنا برفع درجة حرارة المنتج العالي اللزوجة لتسهيل عملية تفريغ الصهاريج وعادة يستخدم بخار الماء بإرساله ضمن وشيعة خاصة تركب داخل الصهريج أو بإمرار بخار الماء من خلال قميص خارجي يحيط بجدار الصهريج في الجزء السفلي منه .
لهذه الطريقة خصائص وصفات معينة منها :
1-إمكانية نقل كل أنواع النفط الخام ومنتجاته المكررة والغاز المميع غير أن استخدام هذه الطريقة لا يسمح بنقل كميات كبيرة جداً وبصورة مستمرة .
2- تعتبر هذه الطريقة إحدى الطرق الأساسية لنقل كميات محدودة وغير كبيرة من المنتجات البترولية المكررة ولمسافات بعيدة.

3- يتم النقل بهذه الطريقة في كل أيام السنة وبصورة منتظمة وبفترات زمنية (فواصل زمنية ما بين رحلات القاطرة).
4- يجب تجهيز أماكن توزيع واستقبال المواد البترولية بأجهزة ومعدات خاصة لتعبئة أو توزيع الصهاريج .

2-5- النقل بواسطة الصهاريج (Transportation by tankers) :

لما كانت طرق السيارات منتشرة في العالم بصورة شاسعة لذلك يمكننا إيصال المنتجات البترولية إلى مراكز الاستهلاك المتواجدة في كل مكان باستخدام الصهاريج , يجهز كل صهريج بصمام أمان وبجهاز لقياس مستوى السائل وبالمعدات اللازمة لتعبئته وتفريغه.. .

- أما الصهاريج المخصصة لنقل المنتجات البترولية العالية اللزوجة كالفيول مثلاً فتجهز أيضاً بوسائل تسخين خاصة.
- تصنع أغلب الصهاريج المستخدمة في العالم بحجوم تصل حتى ($30m^3$).



الشكل (5 -2)صهريج لنقل النفط

غالباً ما تستخدمالصهاريج لنقل المنتجات البترولية البيضاء (كالبنزين والكيروسين و ...) والمنتجات العالية اللزوجة كالفيول والغاز المميع من معامل التكرير ومستودعات التخزين إلى مراكز الإستهلاك والتوزيع .
إن كل صهريج مجهز بداخله بصفائح معدنية لتهدئة حركة السائل أثناء سير الشاحنة ومجهز أيضاً بجهاز إطفاء خاص وبسلسلة معدنية خاصة للتأريض بهدف تفريغ شحنات الكهرباء الساكنة التي قد تحدث شراراً مسببةً حدوث حريق .

3-5- النقل المائي (watery transportation):

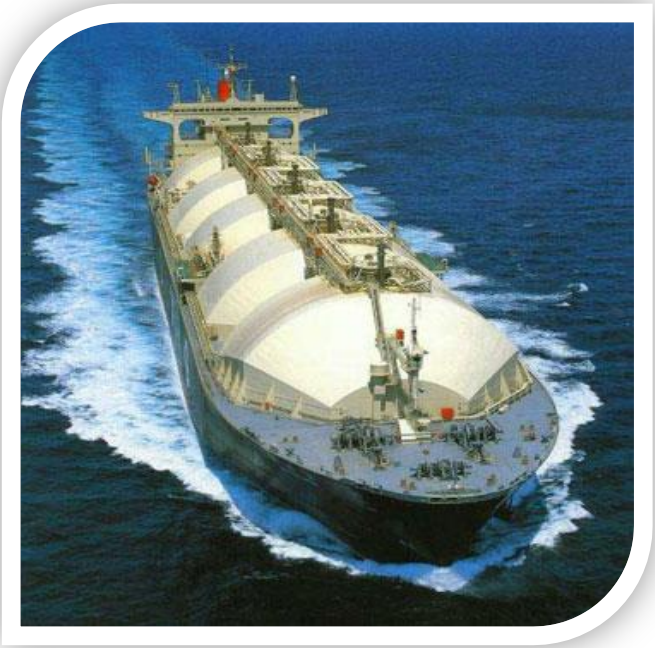
نظراً لأن المحيطات والبحار والبحيرات والأنهار / الصالحة للملاحة / تشغل مساحة واسعة من الكرة الأرضية فقد استغلت دول العالم هذه الناحية الجغرافية فأنشأت أساطيل مائية بحرية ونهرية لنقل النفط ومنتجاته المكررة والغاز المميع, وتتألف هذه الأساطيل من ناقلات البترول والبوارج .

يمكن تصنيف النقل المائي كما يلي :

- النقل البحري
- النقل النهري / في الأنهار الصالحة للملاحة /

ويمتاز النقل المائي خاصة البحري عن النقل بصهاريج السكك الحديدية بما يلي:

1- كميات الوقود المستهلكة في النقل المائي أقل من الكميات



الشكل3 (5 -3) باخرة لنقل النفط

المستهلكة بطريقة صهاريج السكك الحديدية .

2- وزن المعدن اللازم للنواقل البترولية أقل من وزن المعدن اللازم لسلسلة صهاريج السكك الحديدية (بالنسبة لكمية المواد البترولية المنقولة) .

3- الرأسمال الموظف في النقل المائي أقل من رأس المال الموظف للنقل بصهاريج السكك الحديدية .

4- عدد العمال اللازم لتعبئة وتفريغ الناقلات المائية أقل من عدد العمال اللازم لخدمة الصهاريج .

5- إمكانية نقل النفط ومنتجاته والغاز المميع بكميات كبيرة .

- أكثر الناقلات البترولية البحرية انتشاراً هي التي حمولاتها تتراوح بين (5000 و حتى 50000) tons وكلما زادت حمولة الناقلة كلما ازدادت اقتصادية النقل بهذه الطريقة , لكن النقل المائي في بعض البلدان الباردة موسمي حيث أن مياه الأنهار والبحيرات والبحار تتجمد في الفصل البارد مما يستدعي بناء مستودعات تخزين إضافية .

4-5 - النقل بواسطة الأنابيب (Transporting by pipeline):



وهي تعتبر أحدث طرق النقل وأرخصها من الناحية الاقتصادية . يحتوي كل حقل على خط أنابيب لنقل الخام من الآبار إلى مستودعات التخزين ومنها إلى المصافي أو إلى مرافئ التصدير و تستخدم الأنابيب لنقل الخام أو مشتقاته أو حتى لنقل الغاز .

الشكل (5 -4) أنبوب لنقل النفط

- يتضمن المشروع الفني لتصميم خط الأنابيب :

1- البحث عن المسار الأكثر ملاءمة من الناحية الفنية والإقتصادية من خلال المسوحات الجوية والطبوغرافية .
2- دراسة الاحتياطي الموجود من النفط مع كميات إنتاجه والتي تسمح لنا بالاستثمار والتشغيل الطويل الأمد لخط الأنابيب و بدون انقطاع .
3- إعداد الجزء التكنولوجي للمشروع بما فيه الحسابات الهيدروليكية والحرارية التابعة لخط الأنابيب .
4- اختيار مسار الخط مع تحديد عدد ومواقع محطات الضخ وانتقاء قطر خط الأنابيب الأمثل والأكثر اقتصادية .
5- تحديد حجم الأعمال اللازمة لإنشاء خط الأنابيب .
6- حساب تكلفة المشروع مع تكلفة نقل المتر المكعب الواحد من النفط أو الغاز أو المنتجات النفطية .

- المنشآت الرئيسية التي يتألف منها أي خط أنابيب :

1- محطة الضخ الرئيسية التي يصل إلى خزاناتها النفط الآتي من محطات تجميع آبار الحقول أو المنتجات البترولية المكررة الصادرة عن مصافي البترول.
2- خط الأنابيب ذاته (يتألف من أنابيب فولاذية ملحومة ببعضها وممدودة على طول المسار).
3- محطات الضخ الإضافية الموزعة على طول مسار الخط وهي تؤمن عملية ضخ وحركة النفط المتدفق ضمن هذا الخط حتى يصل السائل إلى محطة النهاية.
4- محطة النهاية التي تتألف من خزانات استقبال ومراكز توزيع إلى أماكن الإستهلاك.
5- الصمامات البوابية المركبة على طول المسار بهدف عزل أجزاء خط الأنابيب.
6- المنشآت الإضافية الأخرى كمحطات الحماية المهبطية، خطوط الاتصال وورشات الصيانة.

5-6- طرق نقل الخامات النفطية الثقيلة :

تنطلق جميع طرق نقل النفط الثقيل من تحسين الخصائص الريولوجية له ومحاولة تحويله من نفط غير نيوتوني إلى نفط نيوتوني بغية تسهيل نقله . إن اللجوء إلى الطرق السابقة يؤثر بشكل فعال على الخصائص الانسيابية للخامات ، حيث تخفض اللزوجة وإجهاد القص الأولي ودرجة الانصباب مما يؤدي إلى تحسين سلوكيتها أثناء جريانها عبر الأنابيب وتحويلها من خامات غير نيوتونية إلى خامات لها سلوك السوائل النيوتونية ، تبقى قابلةً للضخ والانسياب عبر الأنابيب بدون أية مشاكل .

5-6-1- ضخ النفط الثقيل بمزجه مع المذيبات الهدروجينية :

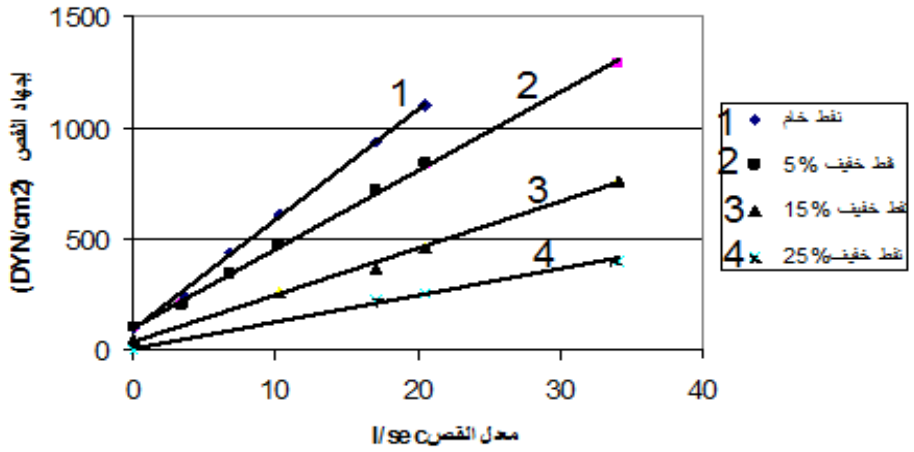
تعتبر طريقة مزج النفط الحاوي على كميات كبيرة من الاسفلت والبرافين مع بعض المواد الهيدروكربونية الخفيفة والتي غالباً ما تكون احدى المنتجات النفطية الخفيفة (كيروسين ، مازوت ، بنزين ، كونديسات) من الطرق القديمة في النقل وقد انطلقت من ضرورة تحسين الصفات السلوكية للنفط المتمثلة في لزوجة النفط وإجهاد القص الأولي للجريان ، فمن المعروف أن إضافة مواد نفطية خفيفة ذات لزوجة خفيفة إلى النفط الثقيل يؤدي إلى تخفيض اللزوجة وتحسين بقية الصفات السلوكية وقد اعتمدت هذه الطريقة في الحقول النفطية . في الوقت الحاضر أصبحت مكلفة بالقياس مع الطرق الأخرى وذلك لسببين:

1- بسبب وجوب مد خط خاص لجر المنتجات النفطية من أماكن تصنيعها إلى الحقول .

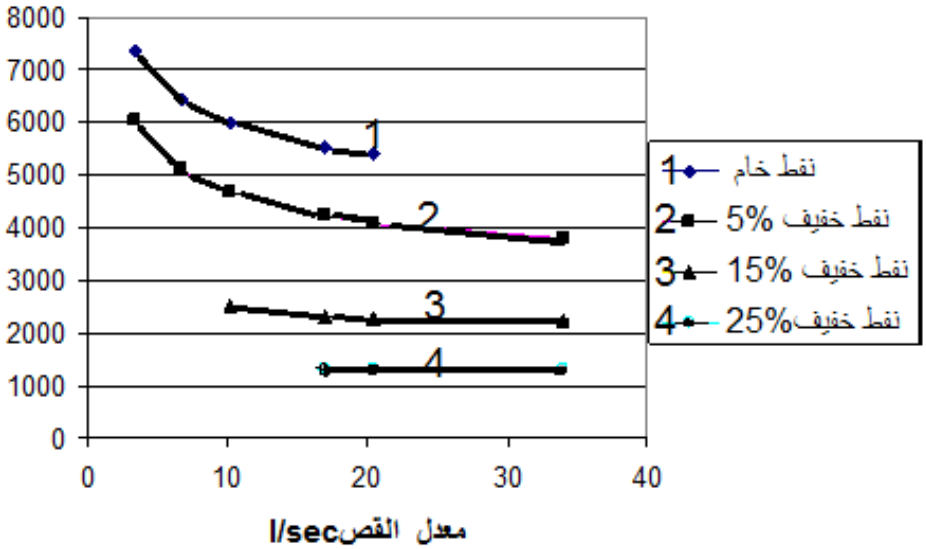
2- بسبب كلفة فصل هذه المواد الخفيفة من جديد .

لهذا السبب فقد أصبحت هذه الطريقة تلاقي صعوبة في التطبيق الحقلي رغم أنها استعملت في كل من أمريكا وكندا وروسيا يمكن أن يبرر استعمال هذه الطريقة عند مزج نفط ثقيل مع آخر خفيف من نفس الحقل وبالتالي تختصر التكاليف وتغدو العملية اقتصادية وهذا ما يطبق الآن في الحقول السورية حيث يمزج نفط كراتشوك لزوجته 3 st مع خام السويدية والرميلان ذو اللزوجة 0.56 st . بشكل عام كلما كانت كثافة ولزوجة المذيب صغيرة كلما كان تأثيره أكثر إيجابية على صفات المزيج المتشكل .

تحدد النسبة المثالية للمزج تجريبياً بحيث تنخفض اللزوجة و تنعدم قيمة الإجهاد الأولي . كمثال نبين سلوكية خام ثقيل عند مزجه بنسب مختلفة من نفط أخر خفيف .الشكلينالتاليين يوضحان تغير إجهاد القص و اللزوجة لنفط ثقيل عند مزجه مع نفط خفيف .



الشكل رقم (5-5) :علاقة إجهاد القص مع معدل القص عند مزج نفط خام ثقيل مع نسب مختلفة من نفط خام خفيف



الشكل رقم (5-6) علاقة اللزوجة مع معدل القص عند مزج نفط خام ثقيل مع نسب مختلفة من نفط خام خفيف الخفيف وعند سرعات مختلفة

5-6-2- ضخ النفط بطريقة التسخين :

تقضي هذه الطريقة بتسخين النفط الخام في المحطة الرئيسية الأولى بهدف تخفيض لزوجته وتحسين بقية خصائصه الانسيابية ومن ثم ضخه عبر الأنابيب المعزولة حيث توجد على مسار الأنابيب وفي مناطق محددة غلايات تؤمن رفع درجة حرارة النفط، وتتراوح المسافة بين الغلايات الموزعة على مسار الأنابيب بين 100 – 25 كم. أما الحرارة التي يجب تسخين النفط إليها فهي تختلف من نفط لآخر، ومن تصميم إلى آخر، وتتعلق بما يلي:

آ – تركيب النفط ودرجة انصهار البرافين فيه .

ب – درجة حرارة تفحم الأنابيب .

جـ- الخواص الترموديناميكية للغلايات والمبادلات الحرارية المستعملة .

بصورة عامة يحافظ على درجة الحرارة التي تسمح بالوصول إلى أفضل نتائج من حيث تحسين الخواص السلوكية للنفط المسخن ، وفي كافة الأحوال يجب أن تكون دائماً أقل من 100C˚ حتى لا يتفكك النفط ويتبخر. من ناحية أخرى يراعى أن يصل النفط إلى النقطة النهائية في الأنابيب بدرجة حرارة أعلى بمقدار 10-5 درجات من درجة تجمد النفط.

إذا تم ضخ النفط في بداية الأنابيب بدرجة حرارة t_H ، فعلى البعد X من بداية الأنابيب ستكون درجة حرارة النفط الوسيطية بحسب معادلة شوخف:

$$t = t_o + (t_H - t_o).e^{-\frac{\pi..R.D.X}{Q.\rho.C_P}}$$

حيث أن :

t - درجة حرارة النفط الوسطية عند النقطة X عن بداية الأنابيب ، C˚ .

t_o - درجة حرارة الوسط المحيط (الأرض) ، C˚ .

R - معامل انتقال الحرارة من النفط إلى الوسط الخارجي ، $kcal/m^2.h.C˚$.

R=1 من أجل الرمل الجاف

R=1.25 من أجل الغضار الرطب

R=3 من أجل الرمل الرطب

D - القطر الداخلي للأنابيب m .

Q- الغزارة الحجمية ، m^3/s .

ρ - كثافة السائل ، kg/m^3 .

C_P- الحرارة النوعية للنفط ، $kcal/kg.C˚$.

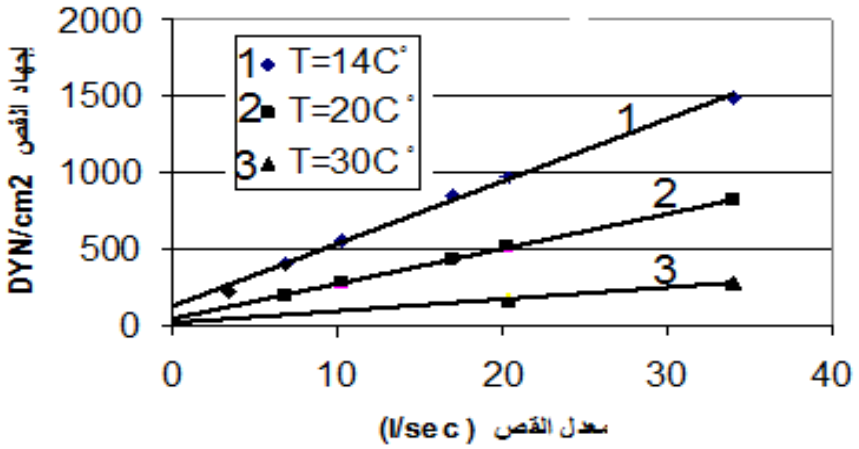
عند نهاية الأنبوب أي عندما تكون X = L تكون $t = t_K$.

يمكن تعيين مواقع الغلايات عن طريق حساب X .

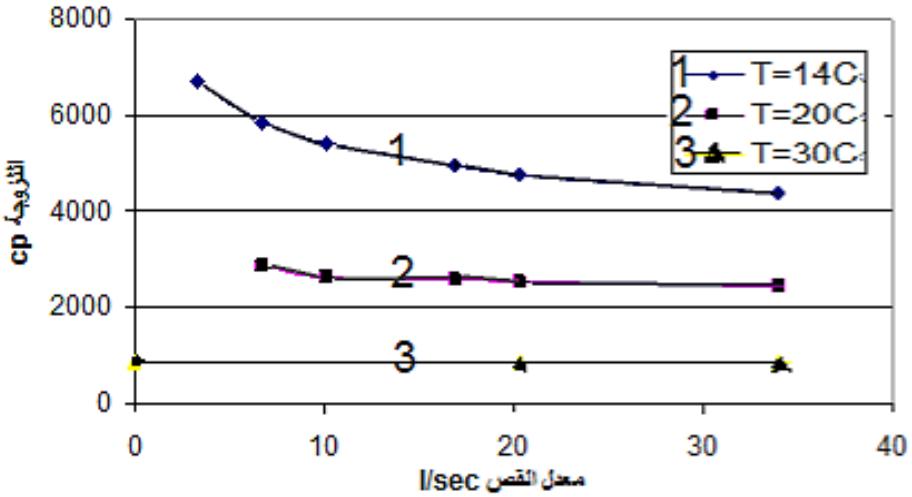
في هذه الطريقة ، تتناقص درجة حرارة النفط الخام المسخن على طول الخط بسب التبادل الحراري مع الوسط الخارجي ، وحتى يؤدي التسخين دوره ، من الضروري تخفيض الضياع الحراري حيث يستخدم من أجل ذلك عادةً العزل الحراري للأنابيب .

استخدمت هذه الطريقة في بلدان مختلفة ويمكن اعتبارها إحدى الطرق الاقتصادية و الفعالة في نقل الخامات النفطية الثقيلة ، ولكن قد يكون من غير الملائم استخدام هذه الطريقة من الناحية الإقتصادية من أجل خطوط الأنابيب الطويلة بسبب الكلفة العالية للعزل الحراري والغلايات الموضعية وهذا ما يقرره دراسة الجدوى الإقتصادية لهذه الطريقة .

عند تطبيق هذه الطريقة يجب معرفة سلوك السائل عند تسخينه وتحديد درجة الحرارة التي يتحول عندها السائل غير النيوتوني إلى سائل نيوتوني إضافة إلى تغير اللزوجة بالعلاقة مع درجة الحرارة .



الشكل(5-7) علاقة إجهاد القص مع معدل القص لنفط خام ثقيل عند درجات حرارة مختلفة



الشكل رقم (5-8) علاقة اللزوجة مع معدل القص لنفط خام ثقيل عند درجات حرارة مختلفة

يحسب ضياع الضغط على طول الأنبوب بطريقتين :

الطريقة الأولى تقضي بحساب ضياع الضغط H دفعة واحدة على طول كل قسم من الإنبوب بين محطتي تسخين L مع الأخذ بعين الإعتبار تغير اللزوجة مع المسافة بسبب التبادل الحراري مع الوسط الخارجي بحسب المعادلة التالية المعادلة التالية :

$$H = h_f.\theta$$

حيث :h_f ضياع الضغط على طول الأنبوب على إعتبار أن درجة الحرارة ثابتة ومتساوية على طول مسار خط الأنابيب وتساوي درجة حرارة النفط في بداية خط الأنابيب $t = t_H$

$$h_l = \frac{\lambda}{D_i}.\frac{V^2}{2g}.L = \beta\frac{Q^{2-m}.\nu_H{}^m}{D_i^{5-m}}L$$

حيث أن :

D_i - القطر الداخلي للأنابيب ، m .

V - السرعة ، m/S .

g - تسارع الجاذبية الأرضية ، m/S^2 .

ν_H- لزوجة النفط المسخن حتى الدرجة t_H مباشرة بعد السخان

β, m - ثوابت في معادلة ليبنزون تتعلق بنظام الجريان .

θ- عامل تصحيح ضياع الضغط الناجم عن تغير درجة حرارة النفط على طول القسم المدروس من الخط وكذلك على طول مقطع الأنبوب(المعادلة (3-9) التالية :

$$\theta = \frac{Q.\rho.C_p}{\pi.R.D.L}.e^{um(t_H - t_o)}.\left\{\left[-u(m-\frac{1}{3}\frac{R}{\alpha_1})\times(t_H - t_o)\right]-\left[-u(m-\frac{1}{3}\frac{R}{\alpha_1})(t_K - t_o)\right]\right\}$$

U - معامل الميل لمنحني اللزوجة 1/C° ويحسب من العلاقة الآتية للنفط المنقول بمعرفة لزوجة النفط عند درجتي حرارة مختلفتين :

$$U = \frac{1}{t_1 - t^*} Ln \frac{\nu^*}{\nu_1}$$

α_1- عامل إنتقال الحرارة الداخلي من النفط إلى السطح الداخلي للأنبوب أو الترسبات العالقة به من أجل خطوط الأنابيب المطمورة تحت سطح الأرض والتي يكون نظام الجريان فيها مضطرباً فإن قيمة (α_1) تتراوح مابين 50-400 $W/m^2.C$

m – دليل الجريان حيث يمكن أن يكون الجريان مضطرباً في بداية الأنبوب وخطياً في نهايته بسبب إرتفاع لزوجة النفط

t_K درجة حرارة النفط فيي نهاية الأنبوب .

الطريقة الثانية : وهي أبسط من الأولى وهي تقضي بتقسيم كل قسم من الأنبوب إلى أقسام متساوية طول القسم الواحد بحدود 5 كم حيث يتم حساب درجة حرارة السائل في بداية كل قسم و في نهايته بحسب معادلة شوخوف ومنه تحسب اللزوجة الموافقة ومن ثم تحسب اللزوجة الوسطية :

$$\gamma_c = \frac{1}{3}\gamma_H + \frac{2}{3}\gamma_k$$

γ_C- اللزوجة الوسطية

γ_H- اللزوجة في بداية القسم

γ_K- اللزوجة في نهاية القسم

بعد ذلك يحسب ضياع الضغط بالإحتكاك بالنسبة لكل قسم من أقسام الخط من معادلة دارسي فيسباخ $h_l = \frac{\lambda}{D_i}.\frac{V^2}{2g}.L$ ويكون المجموع الكلي للضغط الضائع في كافة أقسام الأنبوب مع الأخذ بعين الإعتبار الفرق الجيوديزي بين بداية ونهاية الأنبوب هو الضياع الكلي لخط الأنابيب

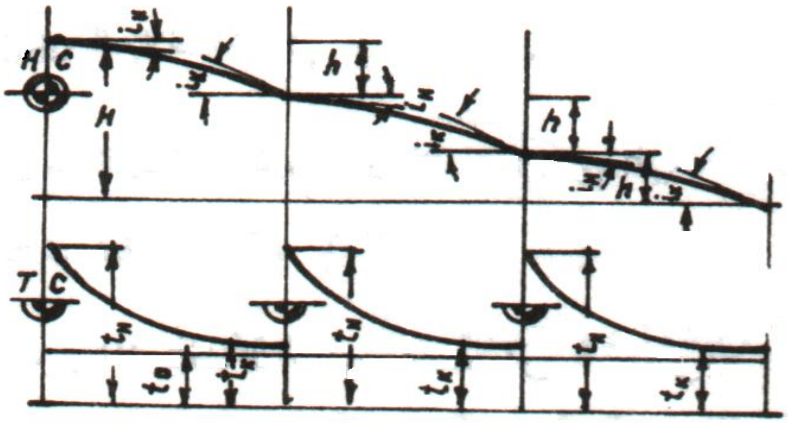
$\Delta z = Z_2 - Z_1$ $\qquad$ $H = h_f + \Delta Z$

تعتبر هذه الطريقة أبسط من غيرها من الطرق الخاصة بحساب ضياع الضغط في خط أنابيب مسخن حيث تحسب الحرارة الحسابية في كل قسم من المعادلة التالية :

$$t_{cl} = \frac{1}{3}t_H + \frac{2}{3}t_k$$

ملاحظة : t_k تحسب من معادلة شوخوف السابقة مع الأخذ بعين الأعتبار أنها يجب أن تكون أعلى بخمس درجات كحد أدنى من درجة حرارة بدء تصلب البارافين أو بمعنى آخر من درجة الحرارة التي يتحول فيها النفط إلى غير نيوتوني . الشكل التالي يبين تمثيلياً تغير هبوط الضغط ودرجة الحرارة على طول الخط

معامل المقاومة الهيدروليكية λ : يمكن تعيينه كما مر سابقاً

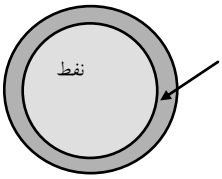


الشكل (5-9): شكل تمثيلي لخط أنابيب يتم تسخين النفط فيه في ثلاث محطات تسخين T_C

ويحتوي الخط على محطة ضخ رئيسية واحدة H_C كما يبين الشكل تغير درجة الحرارة بين كل محطتي تسخين و الضغط على طول الأنبوب .

5-6-3- : نقل النفط باستخدام الماء :

أ-ضخ النفط ضمن خاتم مائي :



يعتمد جوهر هذه الطريقة على فرق اللزوجة بين النفط والماء وبما أن الماء يتميز بلزوجة منخفضة جداً بالنسبة للزوجة النفط الثقيل فإن ضياع الضغط بالاحتكاك بين سطح الأنبوب والماء أقل بكثير منه بين النفط وجدار الأنبوب وعلى هذا الأساس وضع مبدأ هذه الطريقة الذي يتلخص في أن الماء والنفط يتم ضخهما في وقت واحد إلى الأنبوب بحيث يشكل الماء خاتماً مائياً على جدران الأنبوب الداخلية ويتم ذلك باستخدام أنابيب محلزنة من الداخل ومصممة لهذا النوع من الضخ وبحيث يدخل الماء إليها بشكل حلزوني وبنتيجة فرق الكثافة بين الماء والنفط فإن السائل الأثقل (الماء) وبفعل قوى الطرد المركزي المتشكلة سوف يتوجه نحو الجدران دائماً بينما يبقى السائل الأخف وهو النفط ضمن الحلقة المائية .

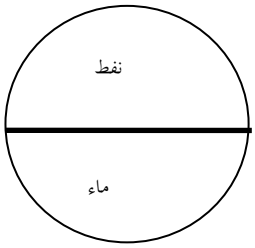
باستخدام هذه الطريقة يمكن زيادة استطاعة الأنابيب إلى حوالي 20 مرة قياساً فيما لو تم ضخ النفط بنفس استطاعة المضخات المستعملة وبدون استخدام المياه غير أن هذه الطريقة لم تلاق ترحيباً في الصناعة النفطية وذلك للأسباب التالية :

1- صعوبة حلزنة الجدران الداخلية للأنابيب .

2- استحالة استخدام هذه الطريقة في الضخ لمسافات طويلة إذ أنه في المسافات الأولى تكون العملية فعالة جداً غير أنه مع ازدياد المسافة يبدأ الخلل في إمكانية بقاء الخاتم المائي على

الجدران وبالتالي تنخفض إمكانية نجاح الطريقة وخاصة لو كانت على الخط محطات ضخ إضافية ذلك لأن الطوق الخاتمي سوف يتكسر وبالتالي تنتهي العملية .
3-في حال توقف مفاجئ أو حتى عادي ينفصل الماء عن السطح الداخلي للأنابيب ويحل محله النفط وبالتالي تنتهي فعالية العملية من جهة أما من الجهة الأخرى فإن أي خلل في دقة تكنولوجيا الضخ سيؤدي التشكيل مستحلب (ماء - نفط) مستقر تصعب معالجته فيما بعد .

ب- ضخ الخامات عالية اللزوجة على وسادة مائية :



يتم ذلك بضخ النفط والماء معاً بحيث يشغل الماء القسم السفلي من الأنبوب ويطفو فوقه النفط. تسمح هذه الطريقة بتخفيض نسبة التلامس بين النفط وجدار الأنبوب وبالتالي تخفيض المقاومة الهيدروليكية، وعيب هذه الطريقة أنه لا يمكن ضخ الخام بسرعات عالية حتى لا يتشكل مستحلب بين الماء والنفط.

ج- ضخ الخامات عالية اللزوجة على شكل مستحلب مع الماء :

عند إختلاط النفط و الماء وبسبب إحتواء النفط على مواد محلبة (Emulsifying agent) (resins , asphaltenes ,phenols , organic acids) فإن الجملة تتجه فوراً لتشكيل مستحلب من النوع ماء في النفط W/O وهنا نميز بين نوعين رئيسيين من المستحلبات ماء في النفط W/O ومستحلب معاكس أي نفط في الماء O/W. الجدير بالذكر أنه يمكن أن يتواجد أيضاً (كما يمكن تشكيلها أيضاً) مستحلبات نوع (نفط /ماء/نفط O/W/O) أو نوع (ماء/نفط/ماء W/O/W).

تختلف لزوجة المستحلبات عن لزوجة النفط الخام بحسب نوع المستحلب، فإذا فرضنا أن لزوجة النفط الخام μ_o فإن لزوجة المستحلب W/O ستكون أكبر من لزوجة النفط الخام $\mu_{w/o}>\mu_o$ وبالمقابل فإن لزوجة المستحلب نفط في الماء O/W ستكون أصغر من لزوجة النفط الخام $\mu_{o/w}<\mu_o$ وبصورة عامة فإن نوعية المستحلب نفط في الماء أو ماء في النفط تحدده طبيعة المواد المحلبة بحسب قاعدة بانكروفت (Bancroft's rule) التي تنص:

" الطور الذي تكون فيه المواد المحلبة (Emulsifying agent) أكثر ذوباناً سيكون هو الطور المستمر continuous phase والطور الآخر سيكون الطور المشتت"
(The phase in which an emulsifier is more soluble constitutes the continuous phase)

وهذا يعني أنه لكي يتشكل مستحلب من النوع نفط في الماء O/W يجبإضافة مواد محلبة (منشطات توتر سطحي) تذوب في الطور المائي وبحيث يضاف النفط تدريجياً إلى الماء المعالج لاحقاً والعكس صحيح.

تهدف طريقة نقل النفط الثقيل على شكل مستحلب نفط في الماء(O/W) إلىالتقليل من لزوجة النفط بحيث تحاط كل جزيئة من النفط بغشاء من الماء الأمر الذي يحول دون تماس النفط الخام

مع جدران الأنبوبة وبالتالي تخفيض قيمة المقاومة بالاحتكاك الأمر الذي يؤدي إلى زيادة إستطاعة الأنبوب .

يضخ للنفط على شكل مستحلب مستقر من النوع نفط في الماء حتى لا يحدث رجوع عكسي ويتشكل مستحلب من النوع ماء في النفط. وتؤثر بصورة كبيرة على استقرارية المستحلب نوع وتركيز المواد الفعالة، درجة الحرارة، شدة الخلط وزمنه، ونسب تركيز كلاً من النفط والماء.

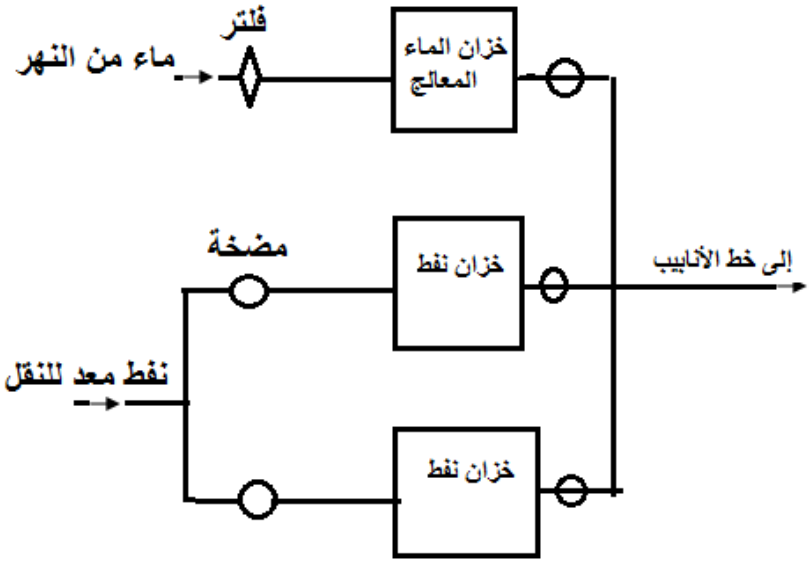
أما المادة الفعالة المستخدمة في تحضير المستحلب فيجب أن تحقق الشروط التالية :

1- أن تكون قادرة على تكوين غشاء من الماء حول الجزيء النفطي .

2- أن لا تمتلك خصائص أكالة تؤثر على معدن الأنبوب .

3- أن تكون رخيصة الثمن.

من المواد الفعالة التي تستخدم في هذا المجال نذكر السولفانول، Oleic acid وهناك بعض المنتجات التجارية Triton-100 – non ionic, surfactant ونشير إلى أن زيادة تركيز الماء في المزيج يساعد بشكل ملحوظ على تحسين استقرارية المستحلب، غير أنها تخفض من القيمة الإقتصادية لطريقة الضخ، وقد بينت الأبحاث والتجارب أن كمية الماء في المزيج يجب أن لا تقل عن 30 % من الحجم الكلي للمزيج المضخوخ . تتم عملية تشكيل المستحلب بتسخين النفط إلى درجة حرارة بحدود 50 م°، ويدفع إلى خط الأنابيب، أما الماء فيؤخذ من نهر مجاور أو بئر قريب ويمرر على فلتر للتصفية ثم يعالج بالمواد المنشطة ويدفع بخط آخر ليلتقي بالنفط في نفس الخط المجهز ببعض التجهيزات المساعدة بحيث تؤمن الخلط الجيد وبسرعة معينة ليتشكل المزيج المطلوب، وتوضع في نهاية الأنابيب عادةً محطات لفصل الماء عن النفط.



الشكل (5-10) مخطط عملية تشكيل المستحلب

النتائج والمقترحات

1- من الشائع وجود مستحلبات من النوع (ماء في نفط) في الصناعة النفطية لذلك يشار إلى المستحلبات من النوع (نفط – ماء) في بعض الأحيان كمستحلبات عكسية .
2- الطور الذي تكون فيه المواد المحلبة (Emulsifying agent) أكثر ذوباناً سيكون هو الطور المستمرcontinuous phase والطور الآخر سيكون الطور المشتت"
3- المستحلبات المتعددة (complex emulsions): وهي الأكثر تعقيدا , تتألف من قطرات صغيرة جدا معلقة ضمن قطرات كبيرة من مائع مختلف و التي بدورها تكون معلقة ضمن طور أخر مستمر .
4- تعتبر درجة المزج ووجود المواد المحلبة عامل حاسم في تشكيل المستحلب.
5- لون المستحلب يتغير بشكل واسع بالاعتماد على محتوى كل من النفط و الماء و خصائص كل منهما. الألوان الشائعة للمستحلبات هي: بني غامق محمر - رمادي أو بني مسود .
6- عندما يحتوي المستحلب على قطرات ذات أقطار صغيرة (مساحة سطح كبيرة) يظهر بلون فاتح ولامع في حين يبدو معتما وأقل لمعانا عندما يحتوي على قطرات ذات أقطار كبيرة
7- كقاعدة عامة: عندما يكون معدل حجم قطرات الماء المشتتة صغيرا تكون المستحلبات المتشكلة أشد لذلك فان الوقت المطلوب للفصل سيكون أطول.. يمكن أن تكون لزوجة المستحلب أكبر من لزوجة الماء أو النفط كل واجدة على حدا وذلك لأن المستحلبات تسلك سلوك السوائل غير النيوتونية .
8- مهما كان مجال كاسر الاستحلاب وجرعته فقد يكون من الممكن تقليل وتحسين استعمال كاسر الاستحلاب بواسطة تقييم المكونات المختلفة في برنامج المعالجة .

المراجع

1- نقل وتخزين النفط / الدكتور المهندس ماهر سعادة – منشورات جامعة البعث - حمص (2012-2013).

2. Petroleum Transportation hand book. M.C GRAW – hill book, NEWYORK1989

3. Petroleum Transportation. B.A.Yofen Moscow .1986

4- Barry ,E.G.,' pumping non – Newtonian waxy crude oils ' J. of the Institute o petroleum , vol . 57,No . 554, p.p. 74-85,(1971).

5- Bueche F. , " Principles of physics ", second edition , MCGRAW – Hill Book Compang , New york , (1965) .

6- EL- Emam , N.A ., " The Rheological characteristics of non – Newtonianthixotropic crude oils under pressure " , ph .D. Thesis , Technical University of heavy Industries , Hungary , (1980) .

7- Knudsen , J.G and D.L Katez ," Fluid Dynamic and Heat transfor " , second edition, McGraw – Hill , New york (1958) .

8- stiffer man , .R . , " FLOW properties of Difficult to Handle waxy crude oils " , J.P.T ., P.P. 1042-1050 , August , (1979) .

9- Gomes, M.G.F.M, pereira , F.B., Lino , A.C.F " solution and procedures to AssureThe Flow in Deep waters condition" , paper OTC 8229 Presented at the 1996 . Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1996

10- Donaldson, J.D." The Application of Magnetic Devices to control scale" .Tube International . 1988.39.

11- Baker, S.B., Judd. S.J. " Magnetic Amelioration of Scale formation " , Wat.Res.Vol.30, No, 2PP247-260 – 1996

12- Castellan, G.W.: Physical chemistry, Addson Wesley publishing Company,Inc. 1971 .

13- Hunt, E.B.J.r: Laboratory study of paraffin deposition , J.pet. tech. (nov.1962)1259-69; trans., AIME, 237 .

14- Robert , N. , " High pour point and Asphaltic crude oils and condensate " J.P.T., P.P . 1192 – 1196 , June , (1983).

15. Scort, P.R.:Method of pipe Line transporting of Waxycrude , cdn. Patent No. 960726 (Jan. 7, 1975)