تحسين الصفات الإنسيابية للخامات النفطية عالية اللزوجة عند نقلها بالأنابيب

د.ماهر سعادة

م. عبدالسلام حيشية

تبدي الكثير من الخامات البترولية الثقيلة التي تحتوي على كميات كبيرة من البرافين والإسفلت خصائص انسيابية تختلف عن تلك التي تبديها الخامات النيوتونية [1,3]، 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 عن سلوكية جريان السائل بالعلاقة $\boldsymbol{\tau \sim \frac{dV}{dr}}$ القائمة ما بين إجهاد القصshear stress (τ) ومعدل القص أو (تدرج السرعة $\frac{dv}{dr}$) (shear rate) ($1/s$)، وتُدعى المنحنيات الناتجة عن هذه العلاقة بالمنحنيات الانسيابية التي تعبّر بشكل عام عن سلوكية جريان السوائل [1] ،

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 :

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

حيث أن :

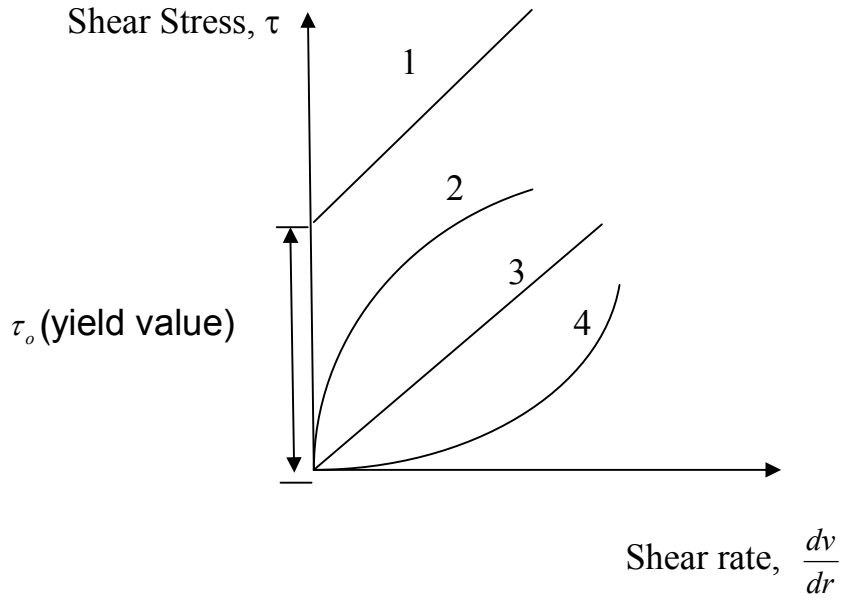
μ : معامل اللزوجة التحريكية (Dynamic Viscosity)

$\frac{dv}{dr}$ – تدرج السرعة Shear rate

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

.....

كلية الهندسة الكيميائية والبترولية – جامعة البعث



1- السوائل البنغامية (البلاستيكية plastic fluids)

2- السوائل البيزوبلاستيكية(*pseudoplastic* or shear thinning)

3- السائل النيوتونية (Newtonian)

4- سوائل الـ (dilatant or shear thickening**)**

الشكل (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 البنغامية Pengham أو البلاستيكية ويمثلها المنحني (1) حيث تتصف بما يسمى الإجهاد الأولي للجريان أو إجهاد الخضوع (τ_o)yield stress value

b - السوائل البيزوبلاستيكية Pesoplastic ويمثلها المنحني (2) حيث تتناقص لزوجة هذه السوائل بزيادة معدل القص كالشامبو و الصلصة وبعض النفوط و مركز عصير الفاكهة وغيرها

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

يلاحظ من 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 (البنغامية) تصفها علاقة بنغهام التالية :

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

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 [4,6]، 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 [7,8] 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 مخرج 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 .

ومن أهم الطرق المتبعة في ذلك : التسخين ، مزج النفط الخام الثقيل مع نفط خام خفيف ، وقد ظهر مؤخراً طريقة تحسين سلوكية النفط عن طريق مزج النفط مع بعض الإضافات الكيميائية المناسبة (منشطات سطحية ، بوليمرات)[2]. 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 .

أجريت الدراسة على النفط الثقيل المنتج في حقول الجبسة السورية والذي يصنّف ضمن الخامات غير النيوتونية ، وقد اختير من هذه الحقول النفط الثقيل المنتج من حقل وادي عبيد الذي يصل المحتوى البرافيني فيه إلى أكثر من 7% ويتميز بالمواصفات التالية :

$$\rho_{20} = 0.9619 g/cm^3$$
$$\rho_{15.5} = 0.9647 g/cm^3$$
$$API = 15.1808$$

أجريت ثلاث سلاسل من التجارب على الخصائص الانسيابية لنفط حقل وادي عبيد السلسلة الأولى هدفت إلى دراسة تأثير درجة الحرارة والثانية إلى دراسة مزج النفط مع نفط آخر خفيف والثالثة تناولت تأثير بعض المضافات الكيميائية على تحسين تلك الخصائص.

أجريت التجارب على جهاز قياس اللزوجة نوع (Brook Field Viscometer DV- I I) **الشكل (2):** يمثل جهاز لقياس اللزوجة الديناميكية بالطريقة الدورانية

يمكن بواسطة هذا الجهاز قياس الخواص الريولوجية للسائل اللزوجة الديناميكية (η) بواحدة قياس (CP) ، إجهاد القص (SS) بواحدة (DYN/cm^2) ، وتدرج السرعة (معدل القص SR وواحدته S^{-1})

يعتمد الجهاز على الطريقة الدورانية في قياس اللزوجة الديناميكية (η) ، حيث عندما يتم تدوير المغزل ذو القطر (r) الموجود ضمن العينة الموجودة بدورها ضمن اسطوانة العينة ذات القطر (R) ، فإن

العينة الموجودة في الفراغ الحلقي بين المغزل وجدار الاسطوانة الداخلي سوف تتشوه وتكون سرعة التشوه هي عبارة عن تدرج السرعة أو معدل القص ($SR = dv / dr$) .

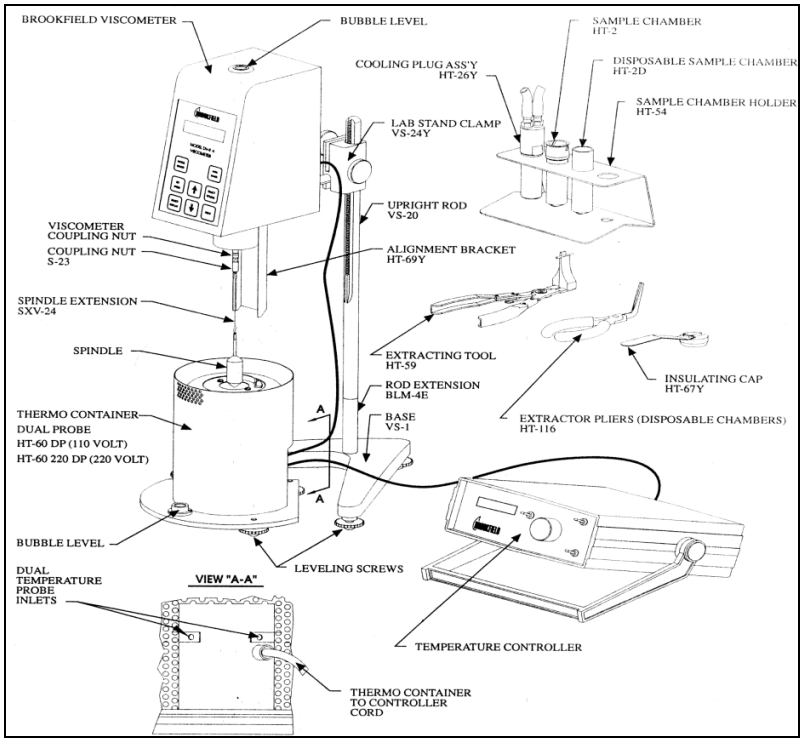
وسيبذل السائل (العينة) مقاومة لهذه الحركة تتمثل في قيمة معينة لإعاقة حركة المغزل ، فيقوم محور المحرك الكهربائي بترجمته على شكل تيار كهربائي يؤدي إلى اختلال توازن جسر واتستون الكهربائي بمقدار α ، حيث أن جسر واتستون متصل مع محور المحرك الكهربائي ، ومحور المحرك متصل عبر نابض مع وصلة تعليق المغزل ، الأمر الذي يؤدي بالنتيجة إلى إظهار قيمة إجهاد القص (SS) على شاشة الجهاز حيث :

$$(SS = Z . \alpha)$$

حيث أن : α – مقدار الاختلال في توازن الجسر

Z – ثابت متعلق بأبعاد الاسطوانات وثابت النابض

ويكون الجهاز قد عالجها ذاتياً وأظهر قيمة (SS) مباشرة .



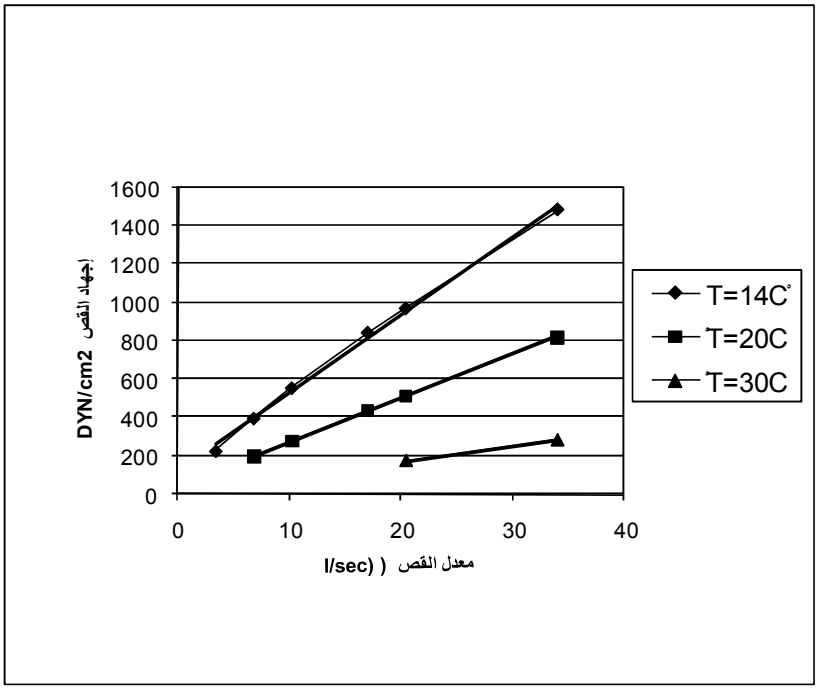
الشكل رقم –2– يوضح أجزاء جهاز مقياس اللزوجة الدوار
(Viscometer DV – I I)

طريقة تحضير العينات للتجارب :

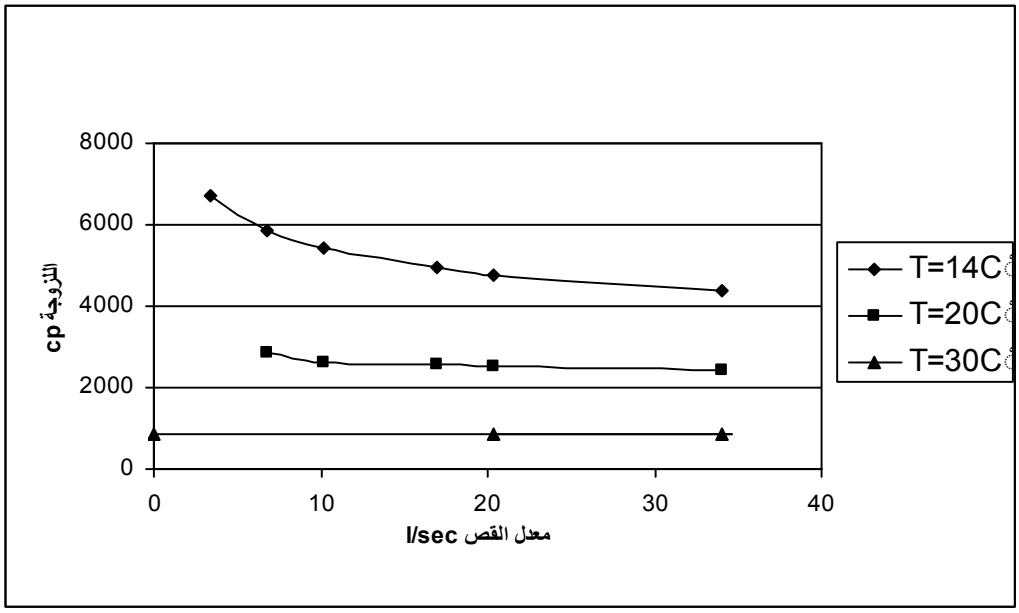
يسخن في البداية حجم معين من النفط (500mL) إلى درجة حرارة (50C°) . فعند طريقة المزج مع نفط خفيف ، أخذت عينة من النفط الخام (دون أية إضافات) للمقارنة ، وأخذت عينات أخرى من نفس النفط الخام ومزجت مع نسب مختلفة من النفط الخفيف مع التحريك الشديد لمدة عشر دقائق وتركت العينات للاستقرار لمدة 48 ساعة . أما عند طريقة المزج مع الإضافات الكيميائية ، وبهدف المقارنة فقد أجريت التجربة الأولى على النفط الخام (بدون أية إضافات) . ومن أجل إظهار فعالية المواد المضافة فقد تمت المقارنة مع نتائج عينة نفط خام مضافاً إليها 2% أوكزايلين ، ومن ثم أجريت التجارب باستخدام المضافات ، حيث في كل مرة مزج المادة المضافة مع نسبة ضئيلة من الأوكزايلين (2%) وزناً بهدف تفعيل انتشارالمضافات ضمن النفط ، وعند نسب مختلفة من المادة المضافة، ومن ثم أضيف المزيج في كل مرة إلى النفط الخام مع التحريك الشديد لمدة عشر دقائق ، وتركت العينات للاستقرار لمدة 48 ساعة .

وفي كل الحالات أجريت التجارب المخبرية على العينات بعد انقضاء مدة الاستقرار المعتمدة، وحيث قسمت كل عينة إلى جزئين ، استخدم أحدهما لإجراء تجارب الخواص الريولوجية ، بينما استخدم الجزء الآخرللمراقبة ولقياس درجة الانصباب . هذا وقد اعتمد عند قياس الخواص الريولوجية أن تبقى العينة في الجهاز لمدة ساعتين ، مع تنظيم درجة الحرارة بواسطة حمام مائي خاص بالجهاز بهدف التأكد من استقرار درجة الحرارة ، ثم تؤخذ القراءات ابتداءً من السرعات الدنيا ، وبحيث تستقر القراءة لمدة عشر دقائق لكل قياس .

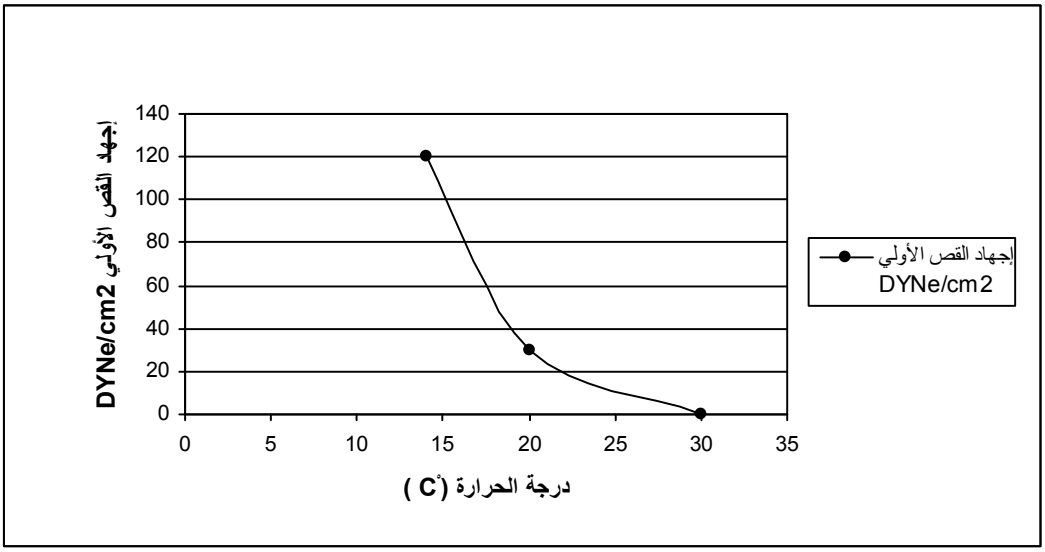
السلسلة الأولى : تم تسخين النفط إلى درجات حرارة (30 , 20 , 14) درجة مؤية ومن ثم تم قياس مؤشرات الخصائص الإنسيابية والنتائج موضحة في الشكل (3) الذي يوضح علاقة إجهاد القص مع معدل القص لنفط خام وادي عبيد عند درجات حرارة مختلفة حيث يتضح أن النفط المدروس هو من النوع البلاستيكي عند درجات الحرارة المنخفضة ويتحول إلى نيوتوني عند الدرجة 30 C بينما يوضح الشكل (4) علاقة اللزوجة مع درجة الحرارة حيث تبدو ثابتة عند الدرجة 30 C .



الشكل(3) يبين علاقة إجهاد القص مع معدل القص لنفط خام وادي عبيد عند درجات حرارة مختلفة



شكل رقم (4) علاقة اللزوجة مع معدل القص لنفط خام وادي عبيد الثقيل عند درجات حرارة مختلفة

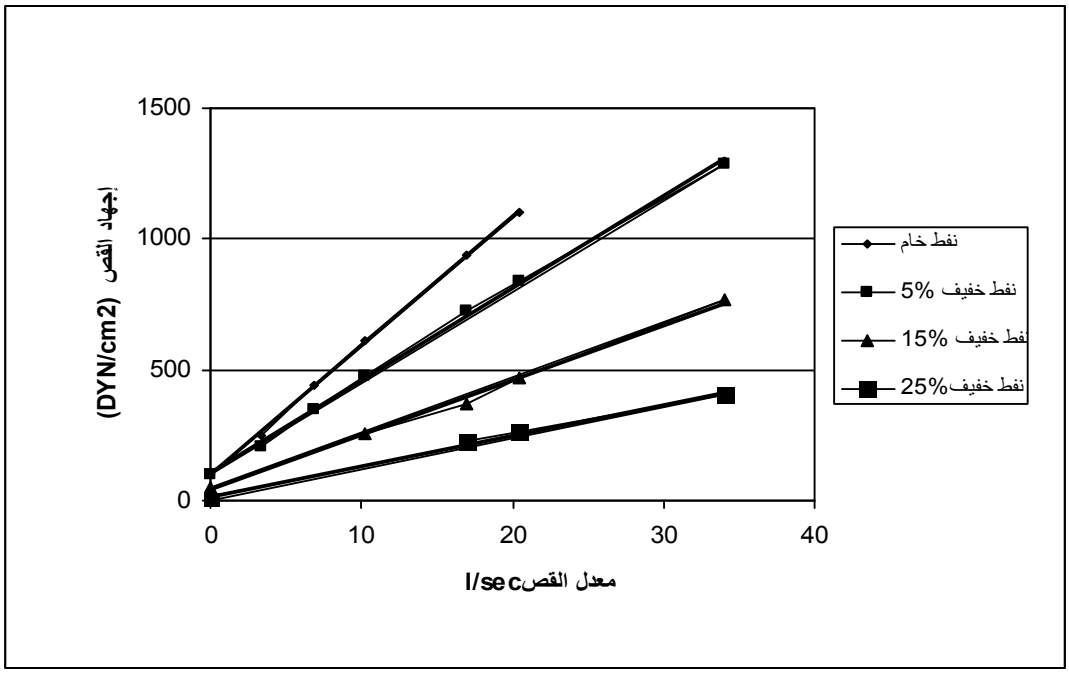


الشكل(5) يبين علاقة إجهاد القص الأولي مع
درجة الحرارة لنفط خام وادي عبيد الثقيل

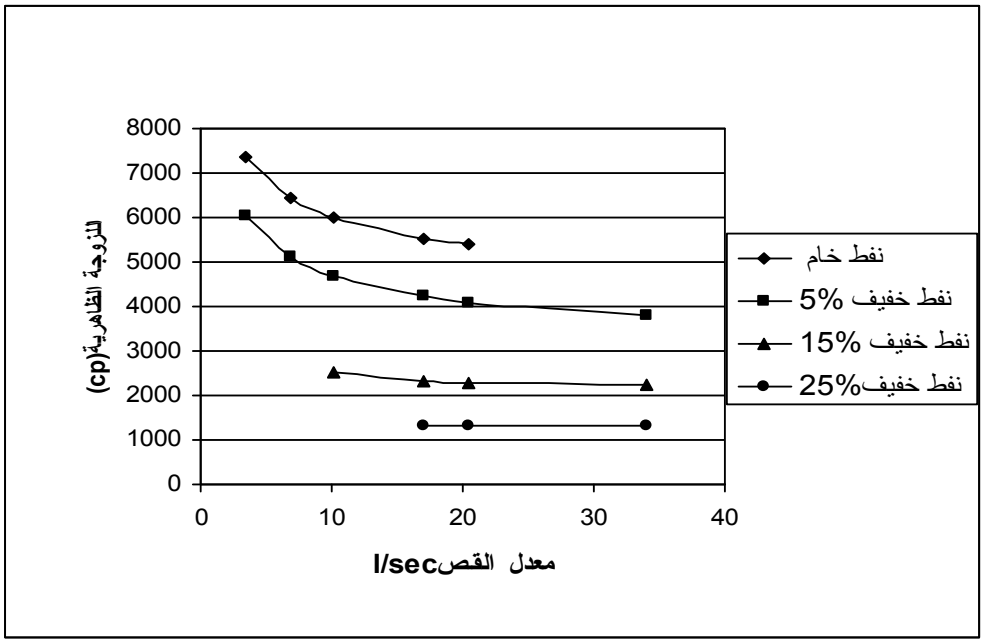
السلسلة الثانية من البحث تركزت على دراسة تأثير مزج النفط المدروس مع نفط آخر خفيف بنسب مختلفة عند درجة الحرارة 14 C وقد أعتمد نفط حقل البشري كنفط خفيف لقربه من حقل وادي عبيد قياس مؤشرات الخصائص الإنسيابية موضحة في الشكل (6) الذي يوضح علاقة إجهاد القص مع معدل القص لنفط خام وادي عبيد عند نسب مختلفة من نفط البشري حيث يتضح أن النفط المدروس يتحول إلى نيوتوني عند نسبة مزج 25% والشكل (7) يوضح تغير اللزوجة مع معدل القص عند نسب المزج المذكورة حيث يتضح ثبات لزوجة النفط المدروس عند نسبة المزج 25%

والشكل (8) يوضح تغير إجهاد القص الأولي لنفط وادي عبيد عند نسب المزج المذكورة حيث يتضح إنعدام الإجهاد عند نسبة المزج 25%

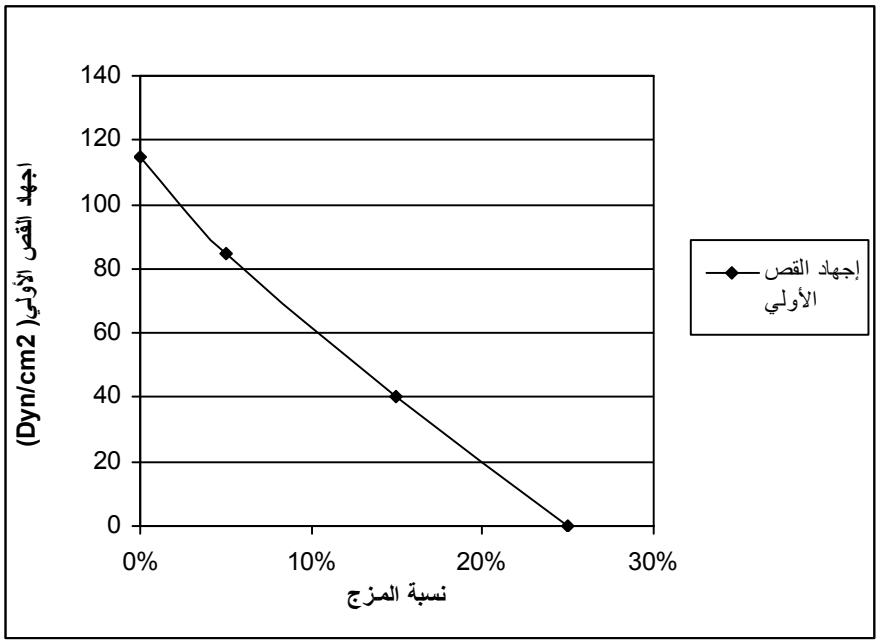
)



شكل رقم (6) علاقة إجهاد القص مع معدل القص لنفط خام وادي عبيد الثقيل عند نسب مزج مختلفة من نفط خام بشري الخفيف



شكل رقم (7) علاقة اللزوجة مع معدل القص عند مزج نفط خام وادي عبيد الثقيل مع نسب مختلفة من نفط خام بشري الخفيف وعند سرعات مختلفة (t= 13 C)



شكل رقم (8) علاقة إجهاد القص الأولي مع نسبة المزج لنفط وادي عبيد مع نفط البشري

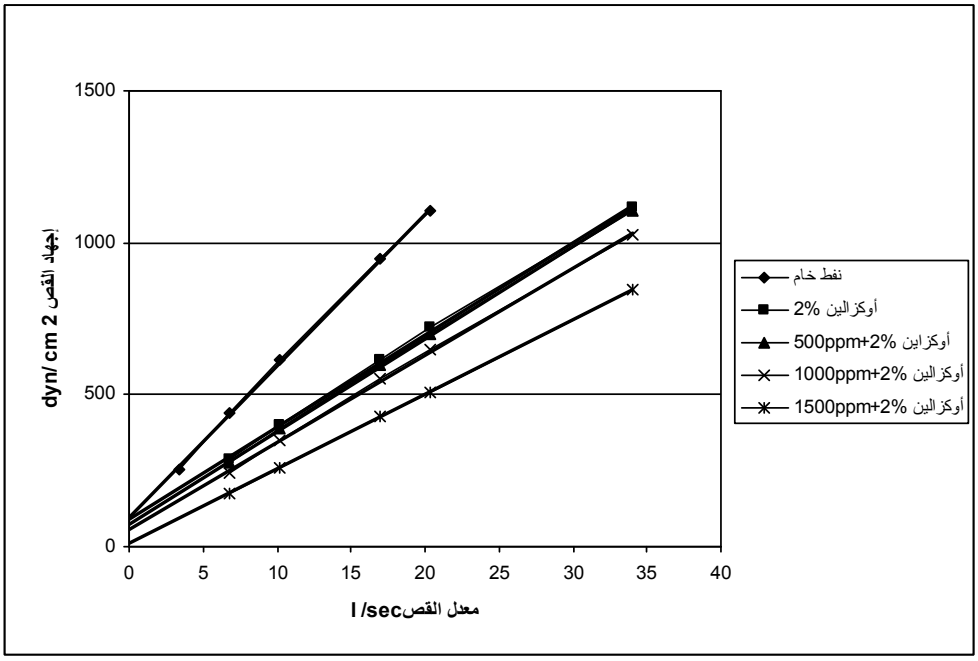
المزج لنفط خام ثقيل (وادي عبيد) مع نفط خام خفيف (بشري)

المرحلة الثالثة تركزت على دراسة تأثير المضافات الكيميائية عند درجة حرارة (C 14) وقد إستخدم نوعان من المضافات :

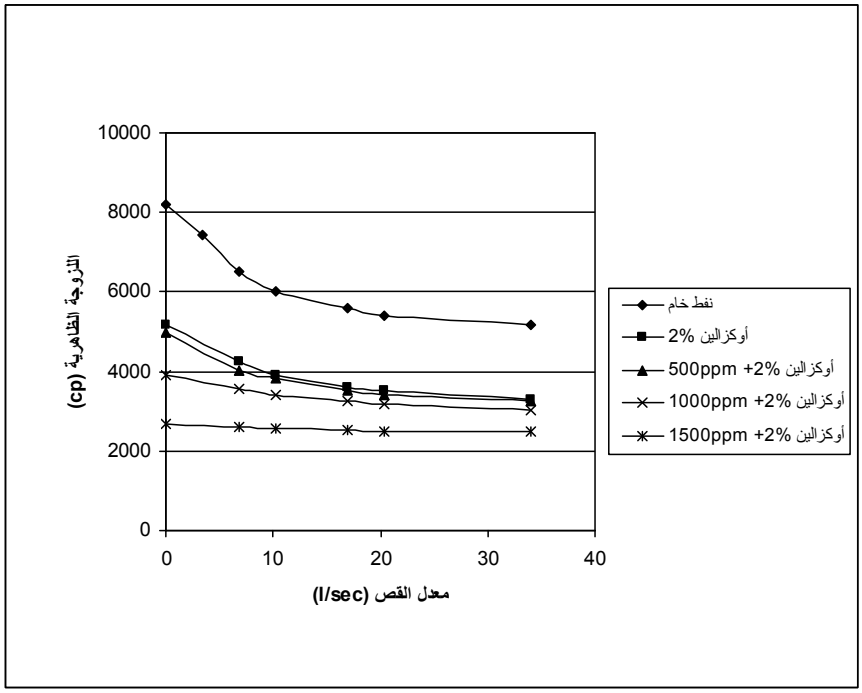
المادة الأولى : REPA 57 عبارة عن منشط توتر سطحي له المواصفات التالية :

- الوزن الجزيئي : M= 80.16 g/mol
- درجة الغليان : Bp= 85 C
- الكثافة : $\rho = 0.887\ g/\ cm^3$
- درجة الحموضة : PH = 7

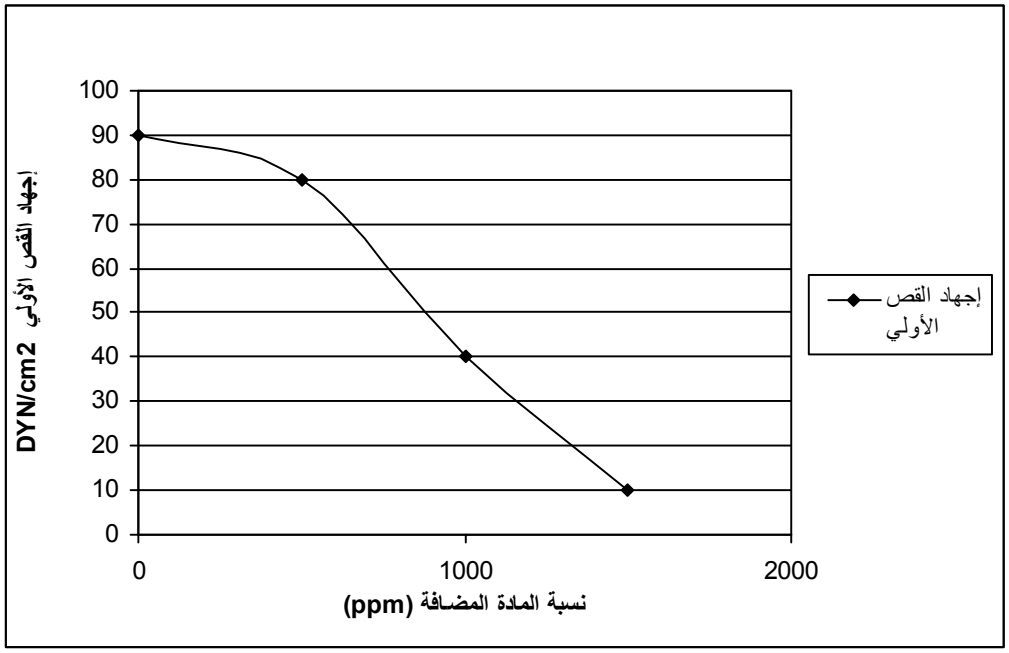
بهدف المقارنة فقد أجريت التجربة الأولى بعد معايرة الجهاز وضبط المؤشرات على عينة من النفط الخام (بدون أية إضافات) ومن ثم أجريت التجارب باستخدام المضافات حيث تم مزج المادة REPA 57 مع نسبة ضئيلة من الأكزايلين بهدف تفعيل إنتشارها ضمن النفط ومن ثم أضيف المزيج إلى النفط الخام مع التحريك الشديد وتركت العينة للإستقرار لمدة 48 ساعة حيث أجريت عليها التجارب المطلوبة . الشكل (9) يوضح نتائج القياسات و الشكل (10) يوضح علاقة اللزوجة مع معدل القص لنفط خام وادي عبيد الثقيل عند نسب إضافة مختلفة من المادة (REPA57) وعند سرعات مختلفة أما الشكل (11) فيبين علاقة إجهاد القص الأولي مع نسبة المضافة من المادة المذكورة .



شكل رقم (9) يوضح علاقة إجهاد القص مع معدل القص لنفط خام وادي عبيد الثقيل عند نسب إضافة مختلفة من المادة (REPA57) وعند سرعات مختلفة



شكل رقم (10) يوضح علاقة اللزوجة مع معدل القص لنفط خام وادي عبيد الثقيل عند نسب إضافة مختلفة من المادة (REPA57) وعند سرعات مختلفة (t= 13 C)

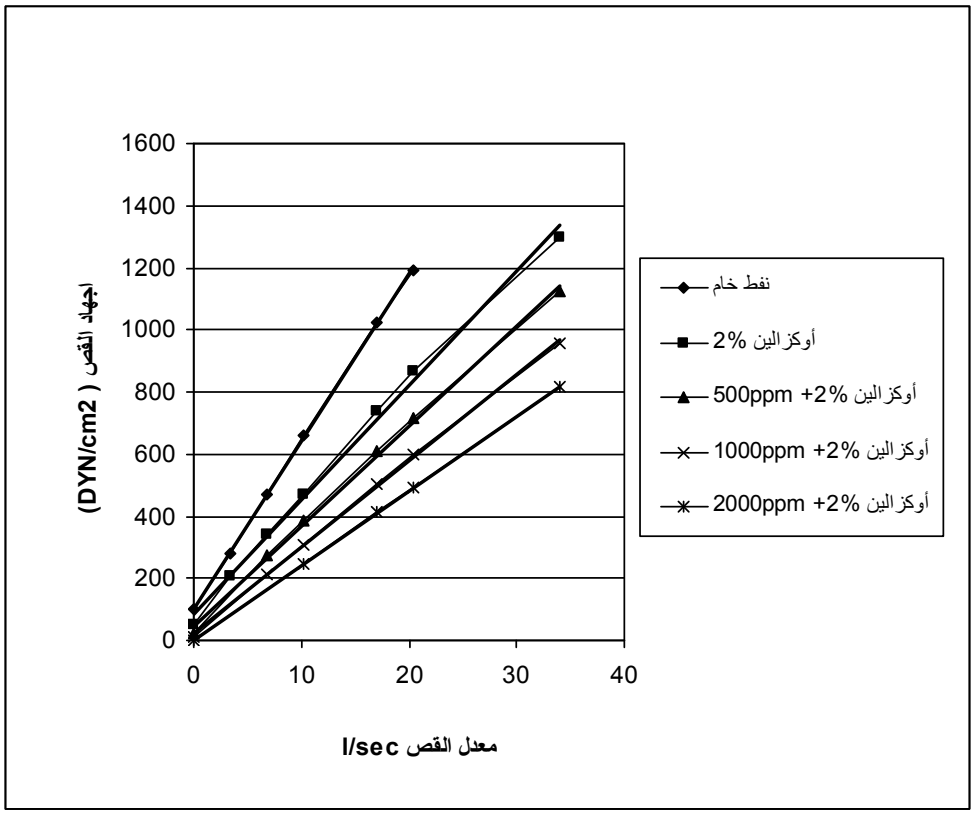


شكل رقم (11) علاقة إجهاد القص الأولي مع النسبة المضافة
من مادة (REPA 57) لنفط خام ثقيل (وادي العبيد)

المادة الثانية المستخدمة كانت Para 2320 عبارة عن وهي عبارة عن copolymer of ethylene and a vinyl ester لها المواصفات التالية :

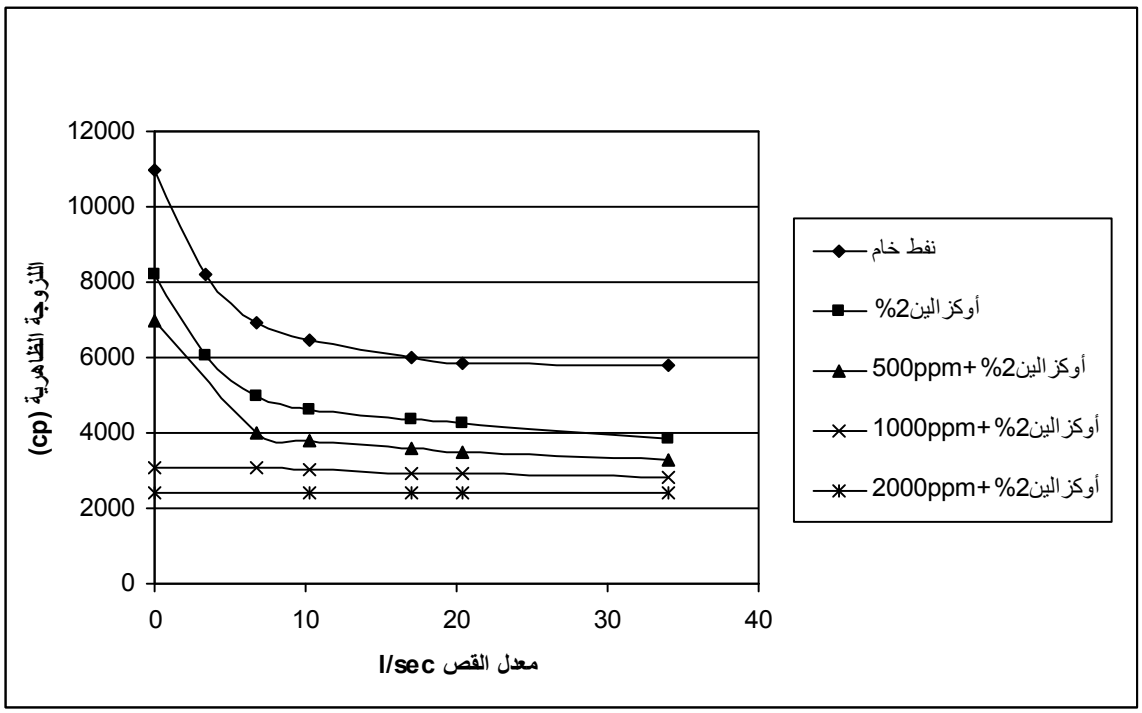
- درجة الغليان : Bp= 105 C
- الكثافة : $\rho = 0.802$ g/ cm^3
- درجة التجمد : P.P : - 13 C

أجريت التجارب بنفس الخطوات السابقة والنتائج موضحة في الأشكال (12، 13 ، 14)



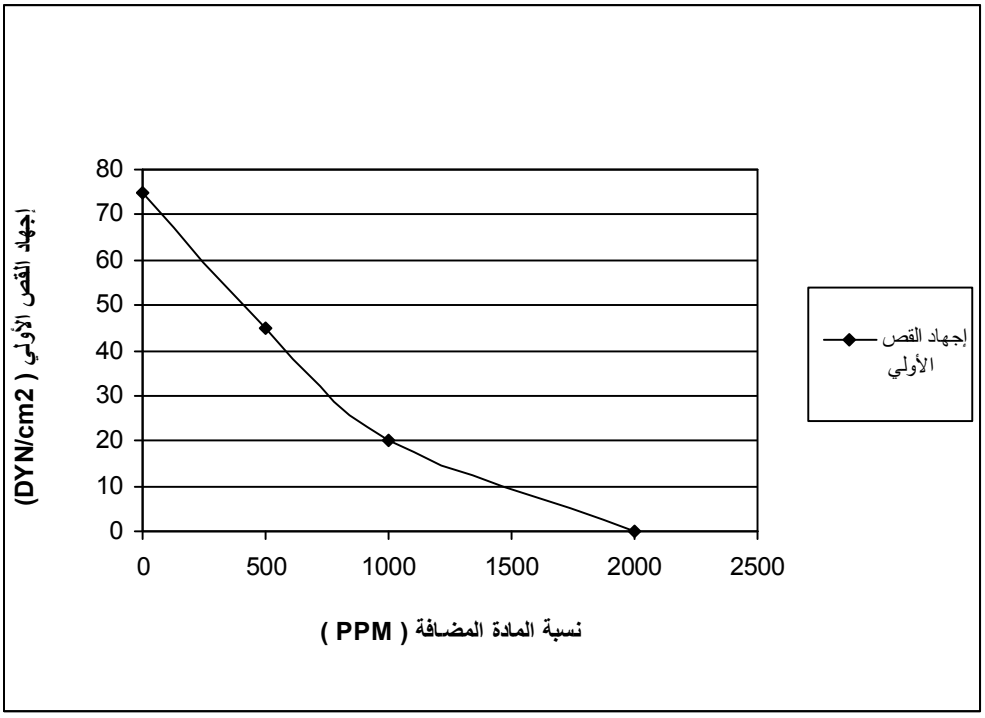
شكل رقم (12) يوضح علاقة إجهاد القص مع معدل القص لنفط خام وادي عبيد

عند نسب إضافة مختلفة من مادة (Para 2320) وعند سرعات مختلفة



شكل رقم (13) يوضح علاقة اللزوجة مع معدل القص لنفط خام وادي عبيد الثقيل عند نسب إضافة

مختلفة من مادة (Para 2320) وعند سرعات مختلفة (t=12 C)



شكل رقم (14) يوضح علاقة إجهاد القص الأولي مع نسبة المادة المضافة (Para 2320) لنفط خام ثقيل (وادي عبيد)

النتائج والمقترحات:

تقود مناقشة وتحليل نتائج التجارب إلى مايلي :

1- إن نفط وادي عبيد هو سائل بنغامي (بلاستيكي) عند درجات الحرارة المنخفضة وقد بلغت قيمة إجهاد القص الأولي $\tau_o = 120\ dyn/cm^2$ at $t = 14\ C^o$ واللزوجة 4700 cp

2- مع زيادة درجة الحرارة تنخفض قيم كلاً من الإجهاد الأولي واللزوجة حيث يصبح النفط نيوتونياً عند الدرجة $t = 30\ C^0$

3- مع زيادة نسبة المزج مع نفط البشري تنخفض قيم كلاً من الإجهاد الأولي واللزوجة حيث يصبح النفط نيوتونياً عند نسبة المزج 25%

4- يلاحظ عند إضافةالمواد Repa 57 ، Para 2320 إنخفاض واضح في قيم كلاً من الإجهاد ، الإجهاد الأولي وكذلك اللزوجة حيث ينعدم الإجهاد الأولي ويتحول السائل إلى نيوتوني عند نسبة إضافة 1500 ppm من مادة Repa 57 ونسبة 2000 ppm بالنسبة لمادة Para 2320

المراجع العلمية

1-نقل وتوزيع النفط والغاز / الدكتور المهندس ماهر سعادة – منشورات جامعة البعث – /1998-1997

2- Keshmirizadeh E., Modarress H.:" A new theory for polymer/solvent mixtures based on hard-sphere limit", P.P.1141-1150 ,European Polymer Journal, Volume 39, Issue 6, , June 2003.

3- Pacheco-Sanchez, J.H.: "Modeling the behavior of asphaltene micelle in petroleum fluids" Paper # 12,P.P. 108-114, Proceedings of the Second International Symposium on Colloid Chemistry in Oil Production , (ISCOP '97), Brazil, August 28-31, 1997.

4- Scort, P.R.:Method of pipe Line transporting of Waxycrude , Houston, Texas, 1996

5-Biao, W. & Lijian, D. "Paraffin Characteristics of Paraffinic Crude Oils in China and the Methods of Paraffin Removal and Inhibition", paper SPE 29954 presented at the 1995, Beijing, 1995

6- - Burguer, E. Striegler, T.K."Studies of Paraffin Deposition in the Trans Alaska Pipeline". JPT, 1986(6), 10

7- - Tuttle, R.N. "High pour-point and asphaltic crude oils in condensates", P.P 1192- 1196, Journal of Pet. Tech., June 1983.

8- Lindsey B. H. and Webster G. M. "Fuels and Lubricants Handbook", P.P. 525-558, Chapter 19 in ASTM Int'l, West Conshohocken, PA, , 2003.

تحسين الخواص الإنسيابية للخامات النفطية عالية اللزوجة

د.ماهر سعادة

م. عبدالسلام حيشية

ملخص البحث

تعد طريقة النقل بالأنابيب من أرخص الطرائق لنقل السوائل فهي توفر نقل كميات كبيرة وبصورة مستمرة ،إلا أنه في حالة نقل النفط غير النيوتوني فإن الصفات الإنسيابية تؤثر سلبا في ظروف ضخ هذه السوائل عبر الأنابيب ، خاصة عند انخفاض درجة الحرارة شتاءً .

يرافق نقل النفوط غير النيوتونية صعوبات جمة بسبب خصائصها السلوكية المعقدة حيث تزداد قيمة الإجهاد الأولي للجريان أو إجهاد الخضوع (yield stress value(τ_o) و ترتفع لزوجتها بشكل كبير عند إنخفاض درجة الحرارة شتاءً الأمر الذي يؤدي غالباً إلى تعذر ضخها عبر الأنابيب ما لم يتم تحسين تلك الصفات للنفط المنقول .

يعالج البحث موضوع تحديد وتحسين الخصائص الإنسيابية لنفط وادي عبيد الثقيل حيث درس تأثير كلاً من درجة الحرارة ، المذيبات وأخيراً المضافات الكيميائية . تجريبياً تم تحديد العوامل (درجة الحرارة ، تركيز المذيب ، نوع و نسبة المضافات) التي يتحول عندها النفط إلى سائل نيوتوني .

باستخدام المضافات تم تخفيض اللزوجة بمعد 24 % وجهد الجريان حتى 100 %

Flow behavior improvement of non-Newtonian crude oil

Abstract

Dr.Maher Saadeh
Eng . Abdulsalam Hichieh
Al-Baath University – College of chemical and petroleum

This paper presents an experimental study of flow behavior for non- Newtonian crude oil wadi-obid - Aljbesi field . The transportation of heavy crude oil can be significantly affected by its flow behavior. In winter and due to low temperature the viscosity and yield stress value τ_o of oil increase and becomes difficult to pump it by pipe lines . Therefore it must improve the rheological properties of cruds some additives. .
The most important methods are : heating, blending with light crude oil , and recently the chemical method by using some additives (surfactants , polymers). The laboratory tests on wadi-obide crude oil using chemical additives showed significant reduction of viscosity and yield value with an average of (24%) for viscosity and 100 % for yield value .