

استنتاج الكثافة الكتلية للزيت المعدني SAE 46 عملياً عند ضغوط ودرجات حرارة مختلفة ووضع معادلة تجريبية لحساب الكثافة*

م. عبد الكريم سوادى صالح**

د. جعفر مهدي حسن****

د. فريد أبو حامد***

الملخص

تعدُّ الكثافة خاصية مهمة لأنها تدخل في كثير من التحليلات النظرية للمنظومات الهيدروليكية أو منظومات التزييت. تناولت العديد من البحوث دراسة الكثافة عند الضغط الجوي؛ وذلك لسهولة قياسها عملياً أو نظرياً عند درجات حرارة مختلفة، وهناك بحوث نظرية تناولت تغير الكثافة عند ضغوط عالية ولكن بثبوت درجة الحرارة، وبحوث أخرى تناولت وبشكل نظري حساب الكثافة عند ضغوط ودرجات حرارة عالية. الكثافة تتغير بشكل فعال مع الضغط ودرجة الحرارة فكيف أوجدت عملياً؟ في هذا البحث جرى ذلك بطريقة غير مباشرة وذلك عن طريق استنتاج قيم معامل بلك (Bulk modulus) ضمن ظروف مختلفة من ضغوط ودرجات حرارة ومنها حُسِبَت الكثافة. استُنتج معامل بلك عملياً عن طريق قياس التغير الحجمي للزيت المعدني بسبب الاضغاطية وعند مدى واسع من ضغط ودرجات حرارة، هذا الإجراء تم بتصميم وتركيب منظومة هيدروليكية خاصة لهذا الغرض. تم التوصل إلى قواعد السلوك العام للكثافة الكتلية وهي أنه عند ضغط معين فإن زيادة درجة الحرارة بنسب متساوية يؤدي إلى تقليل الكثافة بنسب متساوية تقريباً أيضاً وتكون النتائج النظرية (الذي فرض فيها ثبوت معامل بلك) والنتائج العملية للكثافة الكتلية متطابقة تقريباً عند درجات الحرارة المتوسطة (25 – 50°C) في حين هي مختلفة فوق (50°C) ويزداد الفرق مع زيادة درجة الحرارة. وإن تأثير الحرارة أكبر من تأثير الضغط في الكثافة الكتلية، وكذلك هناك نقاط يتساوى فيها التأثير المتبادل العكسي للحرارة والضغط فتنتج قيم متساوية للكثافة الكتلية. وُضِعَت معادلة تجريبية لحساب الكثافة الكتلية مستنبطة من النتائج العملية لإعطاء قيم حقيقية أكثر دقة من المعادلات الموضوعية سابقاً.

الكلمات المفتاحية: كثافة كتلية، زيت معدني، الحرارة والضغط، معادلة تجريبية، منظومة هيدروليكية.

* اعد هذا البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس عبد الكريم سوادى صالح بإشراف الدكتور فريد أبو حامد ومشاركة الدكتور جعفر مهدي حسن.

** قسم الميكانيك العام - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

*** أستاذ مساعد - قسم الميكانيك العام - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

**** أستاذ - قسم هندسة المكنات والمعدات - الجامعة التكنولوجية - بغداد.

الكثافة الكتلية للماء Water density

Temp (°C)	Density (kg/m ³)
100	958.4
80	971.8
60	983.2
40	992.2
30	995.6502
25	997.0479
22	997.7735
20	998.2071
15	999.1026
10	999.7026
4	999.9720
0	999.8395
-10	998.117
-20	993.547
-30	983.854

في حين أوجدَ المصدر [3] معادلة حساب الكثافة كمتغير مع درجة الحرارة فقط، المعادلة (2) ومعادلة حساب الكثافة كمتغير مع الضغط فقط، المعادلة (3) بالاعتماد على معادلة معامل بلك. ثم من المعادلتين أوجدَ معادلة عامة لحساب الكثافة بمتغيرين الضغط ودرجة الحرارة،

المعادلة (4)

$$\rho_1 = \rho_0 / (1 + \beta (T_1 - T_0)) \quad (2)$$

$$\rho_1 = \rho_0 / (1 - (p_1 - p_0) / B) \quad (3)$$

$$\rho_1 = [\rho_0 / (1 + \beta (T_1 - T_0))] / [1 - (p_1 - p_0) / B] \quad (4)$$

ولكن هذه المعادلة غير دقيقة وفيها تقريب ولا تعطي النتائج المطلوبة للأسباب التي وُضحت في القسم (2).

1- المقدمة (Introduction):

الكثافة الكتلية (Mass density) هي تعبير عن مقدار الكتلة الموجودة في حجم معين، وهذه الكتلة تتحكم فيها المسافات بين جزيئاتها، كلما صغرت هذه المسافات زادت الكتلة الموجودة في الحجم المحدد وإذا تباعدت الجزيئات عن بعضها قلت الكتلة في الحجم المحدد، أي قل مقدار كثافة المادة. الكثافة لمادة معينة تتحكم فيها خاصيتان أساسيتان هما الضغط ودرجة الحرارة، الضغط يعمل على تقارب الجزيئات وارتفاع درجة الحرارة تعمل على تباعد الجزيئات للمواد كلها إلا في حالة الماء وعند حدود لدرجات الحرارة 4°C - 0. هنا سؤال مهم، هل إذا زاد الضغط وزادت درجة الحرارة ستبقى الكثافة ثابتة؟ وما الحدود أو المعدل في الزيادة المتبادلة بين الخاصيتين لكي تبقى كثافة المادة ثابتة؟ وهل نوع المادة له تأثير.

تناولت العديد من البحوث والدراسات خاصية الكثافة وأكثرها تناول حساب الكثافة كدالة لمتغير واحد فقط هو درجة الحرارة، وبعضها كدالة لمتغير الضغط فقط، المصدر [1] وضع المعادلة (1) لحساب الكثافة عند أي درجة حرارة (عند متغير واحد فقط هو درجة الحرارة):

$$\rho_1 = \rho_{15} - 0,65 (T_1 - 15) \quad (1)$$

إذ:

ρ_{15} : كثافة الزيت عند درجة حرارة 15°C

ρ_1 : الكثافة للزيت عند درجة الحرارة T_1

T_1 : درجة الحرارة (°C)

في المصدر [2] يبين أن الزيادة في درجة الحرارة يقلل الكثافة عند الضغط الجوي، وأوضح الشذوذ الحاصل في الماء عند درجة الحرارة بين 0-4°C

هاتان المعادلتان مستنبطتان من منحنيات الخواص للزيت والماء ومن منحنيات تجريبية.

2- التحليلات النظرية (Theoretical analyses):

المعادلة (4) معادلة مهمة لحساب الكثافة نظرياً بمتغيرين الضغط ودرجة الحرارة، ولكنها ليست متكاملة لأن هذه المعادلة تحوي على قيمة ثابتة لمعامل بلوك. وقد أعطى المصدر [3] بعض القيم لمعامل بلوك وللبعض المواد وهي:

- water : $2.15 \cdot 10^9 (N/m^2)$
- ethyl alcohol : $1.06 \cdot 10^9 (N/m^2)$
- oil : $1.5 \cdot 10^9 (N/m^2)$

ولكن الحقيقة المهمة هي أن معامل بلوك يتغير مع الضغط ودرجة الحرارة ونوع المادة، فالزيت يوجد منه المئات من الأصناف، وكل صنف له خواصه من كثافة ولزوجة التي تتغير أيضاً بحسب الخصائص المحيطة بالزيت، وكذلك يتغير معامل بلوك. جرى إثبات أن معامل بلوك يتغير بتغير درجة الحرارة والضغط وذلك بتصميم منظومة هيدروليكية مخصصة لهذا الغرض وتركيبها، واستخدم الزيت المعدني (SAE 46) كوسيط لإجراء الاختبارات ودونت قراءات التغير الحجمي بسبب الانضغاطية للزيت عند مدى واسع من درجات الحرارة والضغط، ومنها حُسيب معامل بلوك. استخدمت هذه القيم لمعامل بلوك مع المعادلة (4) مع ما يناظرها من ضغوط ودرجات حرارة المسجلة عملياً لغرض حساب الكثافة الكتلية للزيت المعدني (SAE46) وهي القيم الحقيقية.

وبذلك فإن المعادلة (4) ممكن كتابتها بالشكل الآتي:

$$\rho_1 = [\rho_0 / (1 + \beta (T_1 - T_0))] / [1 - (p_1 - p_0) / B(P_1, T_1)] \quad (9)$$

{ للزيت المعدني (SAE 46) تكون الكثافة الابتدائية ($\rho_0 = 876 \text{ kg/m}^3$) وذلك عند ($T_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$)

استنتج الباحثون Hoberock *et al* [4] معادلة حساب الكثافة لخليط من سوائل التقييب مع المادة الصلبة، المعادلة (5):

$$\rho(P_1, T_1) = \frac{\rho_{oo}F_{vo} + F_{vw}F_{vw} + \rho_s F_{vs} + \rho_c F_{vc}}{1 + F_{vo} \left(\frac{\rho_{oo} - 1}{\rho_{o1}} \right) + F_{vw} \left(\frac{\rho_{ww} - 1}{\rho_{w1}} \right)} \quad (5)$$

استنتج الباحث Kutasov [5] معادلة تجريبية لحساب كثافة الماء عند ضغوط ودرجات حرارة مختلفة المعادلة (6):

$$\rho_w = 8.3619e\{3.0997 \times 10^{-6}(p_1 - p_0) - 2.2139 \times 10^{-4}(T_1 - T_0) - 5.0123 \times 10^{-7}(T_1 - T_0)^2\} \quad (6)$$

إذ:

P_0, T_0 = درجة الحرارة القياسية (15) والضغط القياسي ($\approx 1 \text{ bar}$).

الباحثون Sorelle *et al* [6]

اوجدوا معادلة تجريبية لحساب الكثافة لزيت الغاز والماء، المعادلات (7) و (8) على التوالي:

$$\rho_{oil} = A_0 + A_1(T) + A_2(p_1 - p_0) \quad (7)$$

$$\rho_w = b_0 + b_1(T) + b_2(p_1 - p_0) \quad (8)$$

إذ:

$$A_0 = 7.24032$$

$$b_0 = 8.63186$$

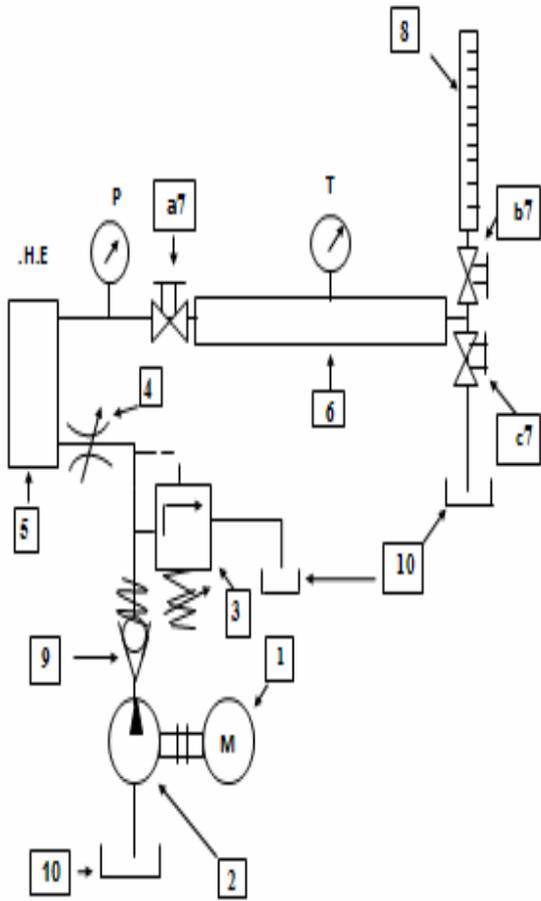
$$A_1 = -2.84383 * 10^{-3}$$

$$A_2 = 2.75660 * 10^{-5}$$

$$b_1 = -3.31977 * 10^{-3}$$

$$b_2 = 2.37170 * 10^{-5}$$

القيم التي عُرِضَتْ لمعامل تلك استنتجت تحت قيم مختلفة من ضغط ودرجة حرارة وعن طريق قراءات للضغط ودرجة الحرارة والتغير الحجمي للزيت المعدني. أمّا معامل التمدد الحجمي الحراري فاستنتج ذلك بقراءات التغير الحجمي للزيت (بوساطة أنبوبة مدرجة) عند فروقات لدرجات الحرارة عدة مرات ثم أُخِذَ المعدل للوصول إلى دقة عالية لقيمة المعامل.



الشكل (1) مخطط الدارة الهيدروليكي

1= محرك كهربائي

2= مضخة هيدروليك

3= صمام تحكم بالضغط

وضغط جوي واحد الذي يساوي صفراً ضغطاً مقياساً (Gage pressure) [1]

استُخْدِمَتِ المعادلات (1) و(2) و(3) للمقارنة، والمعادلة الأساسية (النظرية) (4) وقورنت فيها الفوارق بالنتائج بين الحالة النظرية والحالة العملية.

3- الجانب العملي (Experimental work): سيق

وأن نُوقِشَ أن لقياس الكثافة عملياً يجب معرفة مقدار الكتلة والحجم وبقسمة الكتلة على الحجم نوجد الكثافة، وهذا سهل في الظروف الطبيعية للمادة. ولكن إذا تعرضت المادة للضغط وارتفاع درجة الحرارة فسيكون الأمر صعباً لقياس الكتلة والحجم بالدقة المطلوبة إن لم يكن مستحيلاً لذلك استُعيِنَ بقيم معامل تلك التي سيق وأن استنتجتُ بيحث سابق (عملياً) ومنه استنتجتُ قيم الكثافة عملياً وبالاستعانة بالمعادلة (9). وكذلك استنتجتُ عملياً معامل التمدد الحجمي الحراري (β).

أشيرَ بشكل مبسط إلى ما تم عمله سابقاً، إذ صُمِّمَتِ ورُكِّبَتِ منظومة هيدروليكية لاستنتاج التغير الحجمي للزيت تحت تأثير الضغط ودرجة الحرارة ومنها استنتجتُ معامل تلك عملياً بتطبيق المعادلة (10) الآتية:

$$B = \frac{1}{V \times \Delta p} \quad (10)$$

إذ:

Δv : التغير الحجمي المدون من الأنبوبة المدرجة

V : الحجم الابتدائي الموجود في الأنبوب بين

الصمامين (a7) و (b7).

Δp : فرق الضغط وهو الضغط المسجل من مقياس

الضغط (p) لأنَّ الضغط الابتدائي دوماً هو صفر (ضغط مقيس).

يبين الشكل (1) المخطط الهيدروليكي للدارة ويبين

الشكل (2) صورة عامة للمنظومة الهيدروليكية.

من الأنبوبة المدرجة ومقياس درجة الحرارة أُخِذَتِ القراءات لعدة مديات من درجات الحرارة ويقابلها التغير الحجمي الناتج من تأثير الحرارة، جدولت النتائج كما يأتي:

الجدول (1): نتائج التغير الحجمي مع درجات الحرارة

T0 (°C)	T1 (°C)	Δv (ml.)
30	35	0.8
35	40	0.9
40	44	0.8
44	56	2.3
56	60	0.7
60	66	1.3

الحجم الكلي الموجود في الأنبوب هو (252.7 ml.) ومن معادلة التغير الحجمي مع الحرارة [3] المعادلة (11):

$$\Delta v = v \times \beta \times \Delta T \quad (11)$$

وبالتعويض من القراءات المسجلة في الجدول (1) في المعادلة (11) وإيجاد المعدل للنتائج فإنَّ قيمة معامل التمدد الحجمي الحراري للزيت المعدني (SAE 46) هو:

$$\beta = 0.00074 \text{ m}^3/\text{m}^3/^\circ\text{C} = 1/^\circ\text{C}$$

4-2 نتائج معامل بلك بمؤثري الضغط ودرجة الحرارة: أُدرِجَتْ نتائج معامل بلك المستنتجة عملياً كما يأتي لأنها دخلت بحساب الكثافة الكتلية عملياً وهي مباشرة بحسب الجداول أدناه:

4= صمام تحكم بالتدفق

5= مبادل حراري لتسخين الزيت المعدني

6= أنبوب ذو قطر داخلي 15 mm وسمك 8 mm

7,8,9= صمامات فتح وغلق on - off

8= أنبوبة زجاجية مدرجة

9= صمام عدم رجوع

10= خزان



الشكل (2) صورة عامة لمنصة قياس معامل بلك بمؤثري الضغط ودرجة الحرارة

4- النتائج والقراءات (Results):

4-1 استنتاج معامل التمدد الحجمي:

الجدول (2): نتائج معامل بلك عند حدود درجة الحرارة 5-40 °C

T=40 °C	T=25°C	T=20°C	T=10°C	T=5 °C		
1.0108	1.0108	1.0108	1.0108	1.0108	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 20(bar)
1.2635	1.2635	1.2635	1.2635	1.2635	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 30(bar)
1.2635	1.2635	1.2635	1.2635	1.2635	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 40 (bar)
1.1486	1.1486	1.1486	1.2635	1.2635	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 50(bar)
1.1663	1.3783	1.2635	1.2635	1.2635	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 60 (bar)
1.1792	1.2635	1.2635	1.3606	1.3608	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 70 (bar)
1.3477	1.3477	1.2635	1.3477	1.444	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 80(bar)
1.3778	1.3378	1.4214	1.4214	1.4214	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 90 (bar)
1.33	1.4038	1.4864	1.4864	1.4864	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 100(bar)
1.3898	1.463	1.463	1.5442	1.5442	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 110 (bar)
1.3184	1.5162	1.5162	1.5162	1.5162	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 120(bar)
1.314	1.4283	1.4932	1.5643	1.5643	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 130 (bar)
1.3606	1.474	1.5381	1.608	1.608	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 140(bar)
1.4038	1.4578	1.4578	1.5793	1.5793	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 150 (bar)
1.3942	1.444	1.4974	1.555	1.6172	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 160(bar)
1.4319	1.4813	1.4813	1.5913	1.591	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 170 (bar)
1.4672	1.5162	1.5162	1.5684	1.6245	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 180(bar)
1.4549	1.5004	1.5488	1.6004	1.6556	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 190 (bar)
1.4864	1.5315	1.5793	1.6303	1.6846	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 200(bar)
1.5162	1.5607	1.608	1.6583	1.7118	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 210 (bar)
1.5442	1.5884	1.6351	1.6846	1.7373	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 220(bar)
1.5708	1.6144	1.6606	1.7094	1.7612	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 230(bar)

الجدول (3): نتائج معامل بلك عند حدود درجة الحرارة 90-50 °C

T=90°C	T=80 °C	T=70°C	T=60°C	T=50°C		Δp
0.722	0.8423	0.8423	0.8423	1.0108	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 20(bar)
0.8423	0.9476	0.9476	1.083	1.2635	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 30 (bar)
1.011	1.1231	1.1231	1.2635	1.2635	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 40 (bar)
1.0529	1.0529	1.0529	1.0529	1.1486	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 50 (bar)
1.1663	1.1663	1.1663	1.1663	1.2635	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 60 (bar)
0.9827	1.0405	1.1055	1.1792	1.2635	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 70 (bar)
1.064	1.1231	1.1891	1.3477	1.3477	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 80 (bar)
1.0337	1.083	1.197	1.3778	1.3778	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 90 (bar)
1.0986	1.1486	1.2635	1.4038	1.4038	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 100(bar)
1.1582	1.2085	1.3236	1.3898	1.463	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 110 (bar)
1.1663	1.2129	1.2635	1.3184	1.3783	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 120 (bar)
1.1732	1.1732	1.2167	1.314	1.4283	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 130(bar)
1.1792	1.2199	1.2635	1.3102	1.4151	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 140 (bar)
1.1486	1.2227	1.2635	1.307	1.4038	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 150 (bar)
1.1552	1.2252	1.2635	1.3477	1.444	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 160 (bar)
1.161	1.2274	1.2635	1.3424	1.4813	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 170 (bar)
1.1663	1.2293	1.2635	1.3378	1.5162	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 180 (bar)
1.2003	1.2976	1.2976	1.3718	1.5004	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 190 bar
1.2033	1.296	1.33	1.4038	1.444	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 200 (bar)
1.2314	1.2943	1.3266	1.3965	1.474	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 210 (bar)
1.2354	1.2928	1.3559	1.4254	1.5025	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 220 (bar)
1.2635	1.3209	1.3835	1.453	1.5295	معامل بلك $\times 10^9 (N/m^2)$	عند الضغط 230 (bar)

3-4 استنتاج قيم الكثافة الكتلية:

المبينة إزاء كل منها وكما هو مدون في الجداول أدناه، علماً

بهذه القيم لمعامل بلق وعند درجات حرارة من 5 - 90°C أن:

$$\Delta P = p_1 - p_0$$

وضغوط من 20 - 230 bar ، وتطبيق المعادلة (9)

استنتجنا قيم الكثافة عملياً عند الضغوط ودرجات الحرارة إذ إن:

ضغط مقيس (gage pressure) $p_0 = 0 \text{ bar}$

الجدول (4): نتائج الكثافة الكتلية عند حدود درجة الحرارة النهائية 40 - 5 و فرق الضغوط من 0 - 230 bar

°C T1=40	°C T1=25	°C T1=20	°C T1=10	°C T1=5		ΔP (bar)
860.088	869.565	872.771	879.253	882.53	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	0
861.793	871.289	874.5	880.996	884.28	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	20
862.135	871.635	874.848	881.346	884.63	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	30
862.82	872.327	875.542	882.045	885.332	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	40
863.849	873.367	876.586	882.746	886.036	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	50
864.536	873.367	876.935	883.448	886.741	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	60
865.224	874.409	877.633	883.8	887.1	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	70
865.224	874.758	878.332	884.503	887.446	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	80
865.743	875.455	878.332	884.856	888.153	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	90
866.604	875.804	878.682	885.208	888.5	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	100
866.95	876.153	879.382	885.561	888.862	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	110
867.989	876.502	879.733	886.267	889.57	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	120
868.682	877.552	880.594	886.621	889.925	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	130
869.03	877.903	880.788	886.975	890.281	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	140
869.378	878.605	881.844	887.684	890.992	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	150
870.073	879.308	882.197	888.394	891.348	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	160
870.422	879.66	882.903	888.748	892.062	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	170
870.771	880.012	883.256	889.461	892.418	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	180
871.47	880.718	883.61	889.817	892.775	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	190
871.82	881.071	883.965	890.173	893.133	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	200
872.168	881.425	884.319	890.53	893.491	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	210
872.52	881.778	884.673	890.887	893.849	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	220
872.87	882.133	885.029	891.245	894.21	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	230

الجدول (5): نتائج الكثافة الكتلية عند حدود درجة الحرارة النهائية 90°C - 50°C وفرق الضغوط من 0 - 230 bar

$^{\circ}\text{C}$ T1=90	$^{\circ}\text{C}$ T1=80	$^{\circ}\text{C}$ T1=70	$^{\circ}\text{C}$ T1=60	$^{\circ}\text{C}$ T1=50		Δp (bar)
829.938	835.798	841.741	847.769	853.884	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	0
832.244	837.787	843.744	849.787	855.577	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	20
832.905	838.452	844.414	850.124	855.916	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	30
833.235	838.785	844.75	850.461	856.596	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	40
833.898	839.786	845.757	851.814	857.618	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	50
834.23	840.12	846.093	852.153	857.96	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	60
835.892	841.46	847.105	852.832	858.64	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	70
836.226	841.794	847.442	852.832	858.983	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	80
837.228	842.802	848.118	853.343	859.5	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	90
837.562	843.138	848.456	853.852	860.01	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	100
837.892	843.475	848.795	854.533	860.353	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	110
838.566	844.15	849.812	855.556	861.384	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	120
839.238	845.163	850.832	856.24	861.727	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	130
839.91	845.5	851.172	856.926	862.416	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	140
840.92	846.179	851.854	857.612	863.107	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	150
841.595	846.857	852.537	857.955	863.452	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	160
842.271	847.537	853.221	858.643	863.8	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	170
842.948	848.218	853.9	859.331	864.143	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	180
843.287	848.218	854.25	859.676	864.836	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	190
843.966	848.898	854.592	860.022	865.877	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	200
844.305	849.582	855.28	860.712	866.225	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	210
844.986	850.267	855.624	861.06	866.573	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	220
845.326	850.61	855.968	861.405	866.92	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	230

4-4 القيم النظرية للكثافة الكتلية:

كلها، وهي أقرب قيمة إلى الزيت المعدني المستخدم في هذا البحث، وهي: $(1.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2)$. دُوِّنت النتائج تم في الجدول (6) وهي لدرجات حرارة مختارة : 90°C , 70°C , 50°C , 25°C , 5°C

يمكن من المعادلة (4) حساب القيم النظرية للكثافة الكتلية لأن معامل تلك فرض هنا في هذه المعادلة أنه ثابت القيمة، وأعطيت قيمته بحسب المصادر، وفيها اختلاف، ولكن المصدر [3] أعطى أقرب قيمة وعممها للزيوت

الجدول (6): النتائج النظرية للكثافة الكتلية عند درجات الحرارة المختارة والضغوط المبينة

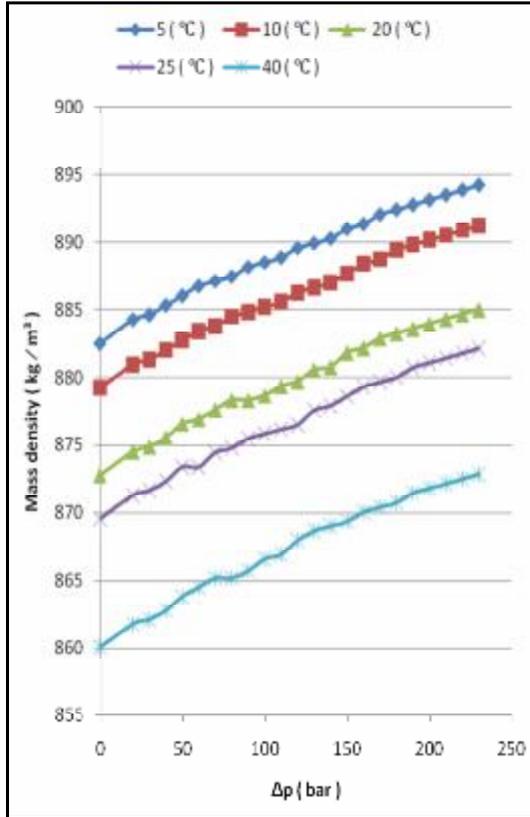
$^\circ\text{C}$ T1=90	$^\circ\text{C}$ T1=70	$^\circ\text{C}$ T1=50	$^\circ\text{C}$ T1=25	$^\circ\text{C}$ T1=5		Δp (bar)
829.938	841.741	853.884	869.565	882.53	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	0
831.046	842.865	855.024	870.726	883.708	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	20
831.6	843.428	855.595	871.307	884.298	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	30
832.157	843.991	856.167	871.89	884.89	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	40
832.714	844.556	856.74	872.473	885.481	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	50
833.271	845.121	857.313	873.057	886.074	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	60
833.83	845.687	857.888	873.642	886.667	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	70
834.388	846.245	858.463	874.227	887.262	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	80
834.948	846.822	859.038	874.814	887.857	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	90
835.508	847.39	859.615	875.401	888.453	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	100
836.07	847.959	860.192	875.989	889.05	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	110
836.631	848.529	860.77	876.578	889.647	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	120
837.194	849.1	861.349	877.167	890.245	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	130
837.757	849.671	861.93	877.757	890.844	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	140
838.321	850.243	862.51	878.348	891.444	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	150
838.886	850.816	863.09	878.94	892.045	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	160
839.452	851.39	863.672	879.533	892.646	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	170
840.018	851.964	864.255	880.126	893.249	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	180
840.586	852.54	864.839	880.721	893.852	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	190
841.154	853.116	865.423	881.316	894.456	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	200
841.722	853.693	866.008	881.912	895.06	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	210
842.292	854.27	866.594	882.508	895.666	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	220
842.862	854.849	867.181	883.106	896.272	$\rho_1(\text{kg/m}^3)$	230

تتغير مع تغير معامل بلوك لأنها مستنبطة من النتائج العملية التي فيها معامل بلوك بقيم مختلفة بحسب الضغط ودرجة الحرارة. وعند تطبيقها على مدى واسع من الخصائص المذكورة أعلاه وجد أن نسبة الخطأ تراوح ما بين (0 - 0.002).

4-5 المعادلة التجريبية لحساب الكثافة الكتلية:

بعد دراسة النتائج ومقدار التغير النمطي الحاصل في القراءات وربطها بتغير الضغط ودرجات الحرارة ومعامل بلوك ومقدار التغير المتبادل وبقواعد رياضية بسيطة، وعن طريق مبدأ التجربة والتصويب، وضعت المعادلة (12) التي يمكن بواسطتها حساب الكثافة لأي زيت معدني عند أي ضغط ودرجة حرارة وهي ضمناً

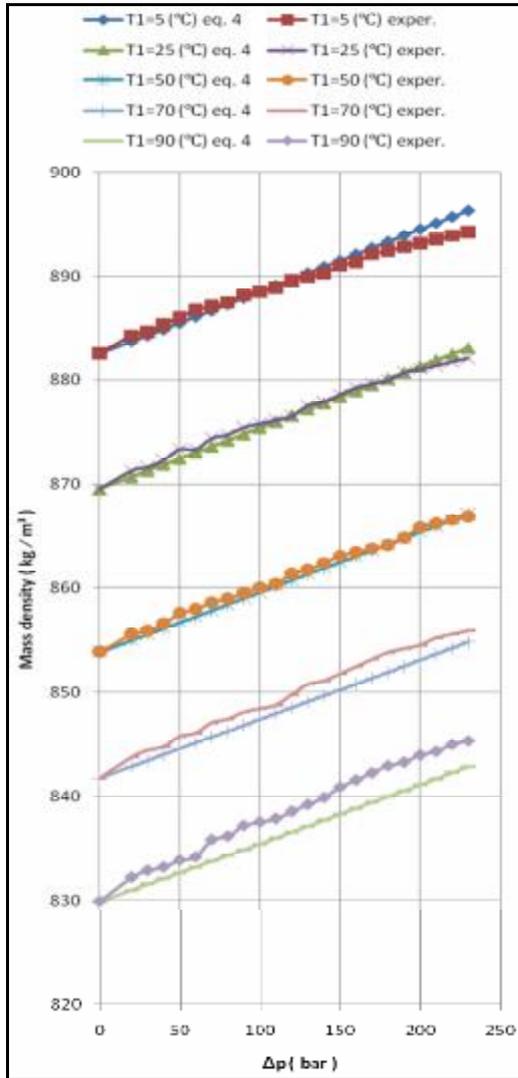
$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{1 + \beta (T_1 - T_0)} + e^{\left[\frac{\Delta p}{235(\text{bar})} + \ln \frac{\Delta p}{50(\text{bar})} \right]} \times \left[1 \text{ kg / m}^3 + \ln \left[\frac{\Delta p}{10(\text{bar})} \right] \times 1 \text{ kg / m}^3 - \ln \left[\frac{\Delta p_a + T_1}{100} \right] \times 1 \text{ kg / m}^3 \right] \quad (12)$$



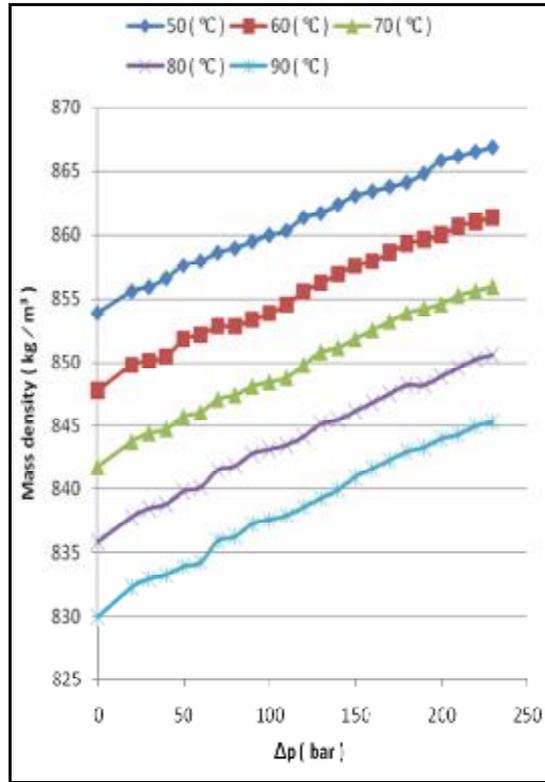
الشكل (3) منحنيات العلاقة بين فرق الضغط والكثافة الكتلية عند درجات الحرارة النهائية 5 - 40 °C (T1)

لتوضيح النتائج أكثر وضعت منحنيات علاقة بين الخصائص كلها، ففي الشكل (3) و(4) نلاحظ العلاقة بين فرق الضغط والكثافة الكتلية عند درجات الحرارة المبينة، والمستنتجة بحسب المعادلة (9) وبالاعتماد على القراءات العملية.

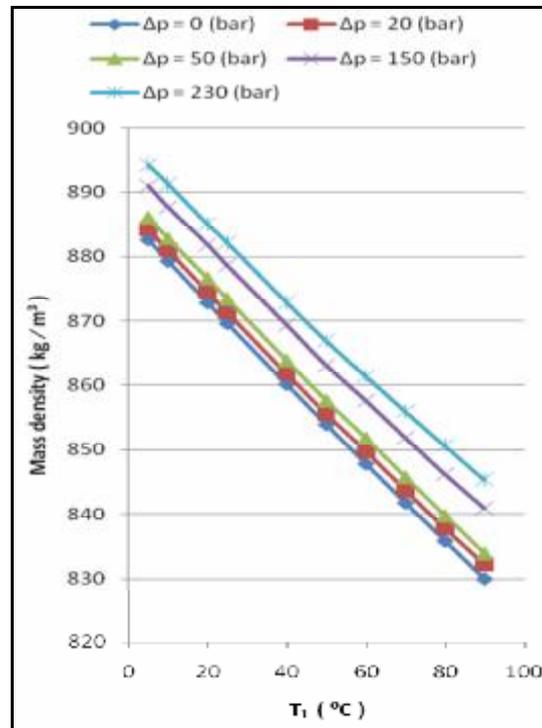
أمّا في الشكل (5) فهو أيضاً مستنتج بحسب المعادلة (9) وبالاعتماد أيضاً على القراءات العملية وفيه العلاقة بين درجة الحرارة والكثافة الكتلية وعند فروقات الضغوط المبينة. في الشكل (6) العلاقة بين فرق الضغط والكثافة الكتلية عند درجات الحرارة المبينة، وهي مستنتجة بحسب المعادلة النظرية (4) ووضعت أيضاً النتائج العملية على المنحنيات نفسها لغرض تسهيل عملية المقارنة. الشكل (7) فيه وضعت المنحنيات المستنتجة بحسب المعادلات (1) و(2) وهي للعلاقة فقط بين درجة الحرارة والكثافة الكتلية إذ في هاتين المعدلتين يهمل تأثير الضغط. يوضح الشكل (8) العلاقة بين فرق الضغط والكثافة الكتلية في حالة كون الزيت المعدني ثابت الحرارة وبفرض ثبوت معامل بلوك ويتعرض إلى ضغط متغير.



الشكل (6) منحنيات المقارنة بين النتائج النظرية (eq. 4) والعملية للكثافة الكتلية



الشكل (4) منحنيات العلاقة بين فرق الضغط والكثافة الكتلية عند درجات الحرارة النهائية (T₁) 50 - 90 °C



الشكل (5) العلاقة بين درجة الحرارة النهائية والكثافة الكتلية عند فرق الضغوط المبينة

1- تأثير زيادة درجة الحرارة أكبر من زيادة الضغط. وهذا واضح من المقارنة لدرجة ميل المنحنيات للأشكال (3) و(4) و(5).

2- عند مقارنة النتائج العملية والنظرية وملاحظة الرسم البياني لبعض درجات الحرارة المختارة الشكل (6) تبين أنه عند درجات الحرارة المنخفضة جداً (5°C) فإن القيم تكون متطابقة تقريباً إلى حد الضغط (30 bar) بعدها تأخذ القيم بالانفراج مع زيادة الضغط.

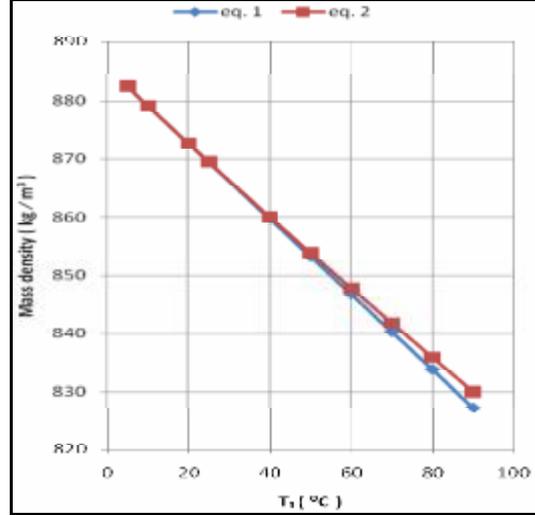
3- عند درجات الحرارة المتوسطة من (25°C - 50°C) تكون القيم للكثافة الكتلية متقاربة وأحياناً متطابقة للنتائج العملية والنظرية، وذلك عند الضغوط نفسها.

4- نلاحظ في هذا الشكل (6) أن الفرق بين النتائج العملية والنظرية يكون واضحاً بعد درجة الحرارة (50°C)، ويزداد الفرق مع زيادة درجة الحرارة والضغط.

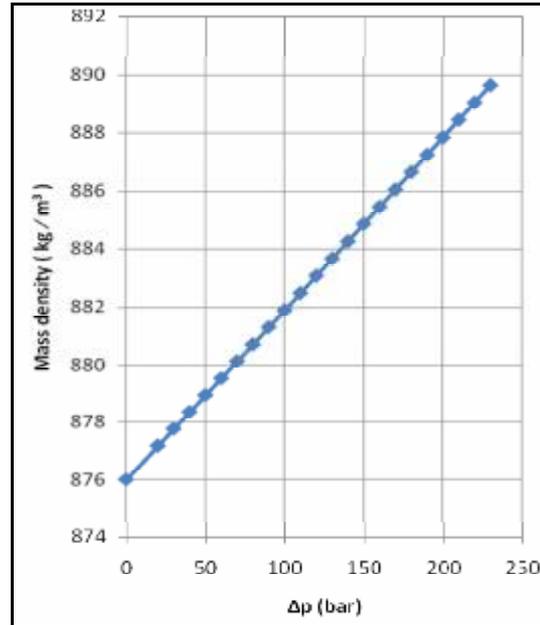
5- سجّلت حالات تساوت فيها قيم الكثافة الكتلية مع أن هذه القيم هي عند درجات حرارة وضغوط مختلفة؛ وذلك بسبب التأثير المتبادل العكسي لدرجة الحرارة والضغط عند نقاط محددة، ويمكن ملاحظتها في جداول النتائج.

6- يوضح الشكل (7) التطابق في النتائج للمعادلتين (1) و(2) وإلى حد درجة الحرارة (55°C) تقريباً، بعدها تأخذ القيم المحسوبة بواسطة هاتين المعادلتين بالتغير.

7- يوضح الشكل (7) أنه بإهمال تأثير الضغط فإن انخفاض الكثافة يكون أكبر مع زيادة درجة الحرارة، وتكون نسبة الانخفاض في الكثافة إلى درجة الحرارة أكبر من النسبة في حالة احتساب تأثير الضغط. وذلك بالمقارنة بين ميل المنحنيات في الأشكال (5) و(7).



الشكل (7) التغير للكثافة الكتلية مع درجات الحرارة بتطبيق المعادلتين (1) و(2)



شكل (8) تغير الكثافة الكتلية مع الضغط عند ثبوت درجة الحرارة على (15°C) وثبوت معامل بلك

5- المناقشة والاستنتاجات:

(Conclusion Discussion and)

يمكن مناقشة القراءات العملية والنتائج النظرية والمنحنيات ممكن مناقشتها كما يأتي:

°C	T ₀ , T ₁ = درجة الحرارة عند الحالة الابتدائية والحالة	8- عند ثبوت درجة الحرارة على الدرجة الابتدائية نفسها (15°C) وثبوت معامل بلوك على القيمة (1.5 × 10 ⁹ N/m ²) لِحظَ وكما في الشكل (8) أن الزيادة في الكثافة الكتلية مع ازدياد الضغط تكون بقيم صغيرة. إذ إنَّ الفرق في الكثافة (13.64 kg/m ³) عند فرق ضغط (Δp = 230 bar).
kg / m ³	ρ _{oil} = التغير في الكثافة للزيت	
kg/m ³	ρ _w = التغير في الكثافة للماء	
الرموز والمصطلحات:		
°C	T = درجة الحرارة	= الكثافة النهائية (kg/m ³) ρ ₁
ml.	Δv = فرق الحجم	= الكثافة الابتدائية (kg/m ³) ρ ₀
°C	ΔT = فرق درجات الحرارة	β = معامل التمدد الحجمي الحراري (M/3m ³ °C)
ml.	V = الحجم الكلي	B = معامل بلوك (N/m ²)
bar	Δp = p ₁ - p ₀ = فرق الضغط المقيس	p ₁ = الضغط النهائي (N/m ²)
bar	p ₀ = ضغط مقيس (gage pressure)	p ₀ = الضغط الابتدائي (N/m ²)
bar	Δp _a = فرق الضغط القياسي	ρ _{o0} , ρ _{w0} = الكثافة للماء والزيوت عند درجة الحرارة T ₀ والضغط P ₀ ، على التوالي . (kg/m ³)
bsolut)	p _{o,a} = الضغط الابتدائي القياسي	ρ _{o1} , ρ _{w1} = الكثافة للماء والزيوت عند درجة حرارة T ₁ والضغط P ₁ ، على التوالي . (kg/m ³)
1 bar ≅	(pressure)	f _{vo} , f _{vw} , f _{vs} , f _{vc} = الحجم الجزئي للإضافات الكيميائية والمادة الصلبة والماء والزيوت على التوالي . m ³
	SAE 46 = زيت معدني من المجموعة 46	P ₀ , P ₁ = الضغط عند الحالة الابتدائية والحالة "1" (N/m ²)

(Society of Automotive engineers) (VG 46)

* المراجع

- 1- Digital Engineering Library@ McGraw-Hill
(www.accessengineeringlibrary.com) Copyright © 2009 The McGraw-Hill Companies.
- 2- Wikipedia, the free encyclopedia
registered trademark of the Nicomedia
Foundation, Inc., 17 December 2011
- 3- The engineering Toolbox Resources, Tools
and Basic Information for Engineering and
Design of Technical Applications!
- 4- Hoberock, L.L., Thomas, D.C., Nickens,
H.V.: "Here's How Compressibility and
Temperature Affect Bottom-Hole Mud
Pressure", OGJ, Mar 22, 1982, p. 159.
- 5- Kutasov, I.M.: "Water FV Factors at
Higher Pressure and Temperatures," Oil &
Gas J. (Mar, 20, 1989) 102-104.
- 6- Sorelle, R.R., Jardiolin, R.A., Buckley, P.,
Barios, J.R.: "Mathematical Field Model
Predicts Downhole Density Changes in
Static Drilling Fluids", SPE 11118, New
Orleans, Sept 26-29, 1982.