

الفصل الثالث

عمليات إحياء البئر

1-3 إحياء البئر:

عملية الإحياء تهدف إلى تحريض السوائل المتواجدة في الطبقة الحاملة للجريان باتجاه قاع البئر، ونظراً للتخريب الحاصل للخصائص الخزنوية للطبقة المنتجة أثناء عمليات الحفرة والسمنتة والتقيب، لذا تحتاج الآبار المنتهية من الحفر إلى عمليات التحسين والإحياء.

1- يمكن أن تبدأ عمليات إحياء البئر عند انتهاء عمليات التقيب وذلك في حال كون الضغط الطبقي أكبر من الضغط الهيدروستاتيكي المطبق على قاع البئر.

2- في حال كون الضغط الطبقي أقل من الضغط الهيدروستاتيكي الناجم عن عمود السائل في البئر فإن الجريان لن يتم من الطبقة إلى قاع البئر وهنا لا بد من اختيار طريقة من طرق الإحياء.

إن اختيار طريقة وضع البئر في الإنتاج تعتمد على:

1- الضغط الطبقي.

2- الخواص الفيزيائية للصخر الخازن والخواص الكيميائية للسوائل التي يحتويها .

3- طريقة فتح الطبقة.

4- زمن وضع البئر في الإنتاج.

إن درجة التشبع والنفوذية للطبقة تتغير مع الزمن ذلك لأن هذه الخواص تابعة لدرجة الحرارة والضغط المتغيرين باستمرار.

كي يبدأ الجريان من الطبقة إلى قاع البئر يجب أن تتحقق المعادلة التالية:

$$P_C > P_p + \frac{H \cdot \gamma}{10} + P_s$$

حيث: P_c : ضغط الطبقة.

P_f : ضغط قاع البئر.

H : ارتفاع عمود السائل في البئر.

γ : الوزن النوعي للسائل داخل البئر.

P_s : ضغوط ضائعة في المنطقة المجاورة للبئر نتيجة الظاهرة الجلدية.

ولتحقيق إنقاص ضغط قاع البئر يجب القيام بإحدى الطرق التالية:

1- الإنقاص التدريجي للوزن النوعي للسائل في البئر وذلك من خلال :

أ- إجراء دوران لسائل ذي وزن نوعي أخف من الوزن النوعي للسائل داخل

البئر / استبدال الطفلة بالماء - الماء والنفط - النفط بالمازوت أو الرغوة/.

ب- تبديل السائل في البئر بسائل آخر مشبع بالغازات .

2- الإنقاص التدريجي لمستوى السائل في البئر من خلال إحدى الطرق التالية:

1- السحب باستخدام المضخات.

2- استخدام الضواغط الهوائية.

3- عملية الإحياء بالنتروجين حيث يتم ضخ النتروجين السائل من خزانات

خاصة به وبواسطة مضخات خاصة في مواسير الإنتاج عند أعماق

محددة حيث يتحول النتروجين السائل إلى الحالة الغازية ويقوم بعملية

إحياء البئر. ومن مميزات هذه الطريقة إنها حديثة - سريعة التنفيذ -

مأمونة لأن النتروجين غاز خامل لا يشكل مزيج قابل للانفجار.

4- إنقاص مستوى السائل في البئر باستخدام مضخات غاطسة.

إن استخدام الضواغط الهوائية لإحياء البئر لها بعض المحاذير لأن الغاز إذا

اختلط وهو بحالة جافة مع الهواء وينسب محددة يصبح خليطاً قابلاً للانفجار لذا

وعند استخدام هذه الطريقة في إحياء الآبار الغازية يجب ترطيب الغاز باستخدام

وسائط مائية.

يضخ الهواء بواسطة ضواغط خاصة بعمليات الإحياء في الفراغ الحلقي على أن تكون مواسير الإنتاج مجهزة بكالات متقبة بثقوب تتراوح أقطارها ما بين 1,5-3 mm ويعتمد توضع أعماقها على استطاعة الضواغط المستخدمة. الهواء المحقون يجبر كمية سائل البئر للخروج من مواسير الإنتاج على السطح. ويوقف الحقن عندما يصبح الضغط الهيدروستاتيكي أقل من ضغط الطبقة ثم يجري تفريغ الهواء المضغوط من مواسير التغليف وتنظيف البئر من الهواء عن طريق ترك البئر مفتوحة إلى الحفرة عدة ساعات ثم يغلق بعدها ويراقب ارتفاع ضغطه.

عند استخدام الضواغط الهوائية لا بد من معرفة مقدار ضغط حقن الهواء في الفراغ الحلقي لإنقاص مستوى السائل في البئر إلى قيمة يصبح عندها ضغط الطبقة أكبر من ضغط عمود السائل في البئر وذلك بهدف ألا يستمر ضغط الهواء وتفريغ البئر من السائل وبالتالي دخول الهواء من نهاية مواسير الإنتاج إن لم تكن مجهزة بكالات متقبة وبالتالي إلى خلخلة هذه المواسير وحصول اندفاع مفاجئ وكبير للسوائل من الطبقة إلى قاع البئر والذي يؤدي إلى تحريك الرمال والأوساخ وتراكمها في المنطقة المجاورة للقاع وفي القاع أيضاً.

بعد حقن الهواء من خلال الضاغط لمدة معينة نقوم بفتح صمام الفراغ الحلقي كي يتم تعادل مستوي السائل داخل وخارج مواسير الإنتاج كما هو مبين في الشكل رقم (1-4) وعند مستوى يتناسب وحجم الهواء المحقون. كي تتمكن السوائل المتواجدة في الطبقة من الجريان فإنه يجب أن تحقق المعادلة التالية:

$$P_c > \frac{(H - h)}{10} \gamma \quad (1 - 3)$$

ومنها يمكن حساب قيمة انخفاض مستوى السائل في البئر:

$$h > H - \frac{10 P_c}{\gamma} \quad (2 - 3)$$

ومن المرحلة يمكن تحديد قيمة ضغط حقن الهواء إذا أهملنا وزنه النوعي بالنسبة للوزن النوعي للسائل أي:

$$P = \frac{H_1 \cdot \gamma}{10} \quad (3-3)$$

يتم حساب قيمة H_1 بفرض تساوي حجم السائل المخرج من البئر عند نهاية عملية الحقن (المرحلة ج) مع حجم الفراغ في البئر بعد تعادل مستويات السائل داخل وخارج مواسير الإنتاج:

$$\frac{\pi}{4}(D^2 - d_1^2)H_1 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d_1^2 + d_2^2)h$$

ومنها:

$$H_1 = \left(\frac{D^2 - d_1^2 + d_2^2}{D^2 - d_1^2} \right) h$$

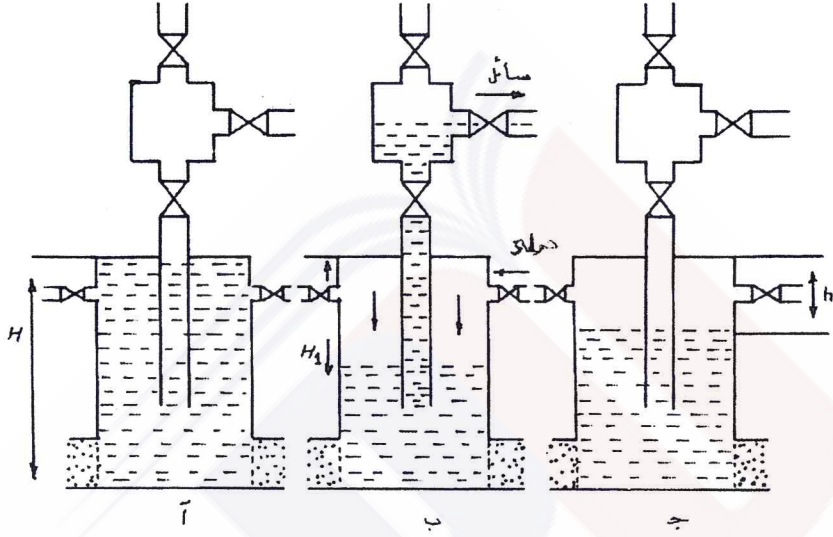
D : القطر الخارجي لمواسير التغليف الإنتاجية.

d_1 ، d_2 : القطر الداخلي والخارجي للمواسير الإنتاجية.

وبالتعويض في العلاقة (3-4) نحصل على قيمة ضغط حقن الهواء

$$P = \frac{h \cdot \gamma}{10} \frac{D^2 - d_1^2 + d_2^2}{D^2 - d_1^2}$$

إن فتح الفراغ الحلقي لاستخراج الهواء يجب أن يتم بشكل تدريجي تلافياً لتشكل فرق ضغط كبير يؤدي إلى تحريك الرمال في الطبقة ..



الشكل (1-3)

إحياء البئر باستخدام الضواغط الهوائية

وأخيراً فإن إنقاص مستوى السائل في البئر باستخدام المضخات الغاطسة التي تنزل في مواسير الإنتاج بواسطة كابل وحتى عمق 150-200 متر مغمورة في سائل البئر منعاً للإنقاص السريع لمستوى السائل في البئر.

أثناء سحب السائل بواسطة المضخة الغاطسة يجب معرفة مستوى السائل في البئر بشكل مستمر للتأكد من بدء الجريان أو لا فعندما نلاحظ بدء الإنتاج يوقف سحب السائل أما إذا لم يلاحظ فتتزل المضخة من جديد تحت مستوى السائل 150-200 متر . هذه الطريقة سهلة الاستعمال ولا تحتاج لأجهزة كثيرة ويمكن تطبيقها على أية بئر.

2-3 - اختيار النظام الأمثل لتشغيل الآبار الذاتية:

بعد الانتهاء من عمليات تحضير البئر وتجهيزه للتشغيل يجب اختيار النظام الأمثل لعمل البئر بحيث يحقق أكبر إنتاجية ضمن نظام استثمار جيد لا يؤثر على الخصائص الخزنوية للطبقة ويحافظ على طاقتها. يتم هذا الاختيار عن طريق تقييم عمل البئر على عدة أنظمة (عدة فالات) وتؤخذ خلال عمل البئر (عند كل نظام) كافة المؤشرات الإنتاجية مثل:

كمية السائل المنتج في اليوم - كمية الغاز المنتجة في اليوم - إمامة السائل - الضغط الديناميكي - الضغط الستاتيكي - ضغط رأس البئر - أخذ عينات وإجراء التحاليل اللازمة للسائل المنتج (نفط + غاز). من خلال دراسة إنتاج البئر على هذه الأنظمة يتم اختيار النظام الأمثل للتشغيل بحيث يحقق هذا النظام كلاً مما يلي:

1- أكبر كمية سائل منتجة باليوم.

2- أقل كمية غاز منتجة.

3- أقل نسبة إمامة ممكنة.

4- أقل فرق ضغط ممكن (ما بين الضغط الديناميكي والطبقي).

5- ثبات ضغوط رأس البئر.

يتم الانتقال من فالة إلى أخرى شريطة ألا ينخفض الضغط الديناميكي عن

الضغط الطبقي ما مقداره % 25 وألا تزيد نسبة المياه عن % 15.

مثال على ذلك:

1- فتح البئر على الفالات:

36	32	30	28	24	22	20	18	16
64	64	64	64	64	64	64	64	64

2- ننتقل من فالة إلى أخرى على ألا تزيد نسبة الإمامة % 15.

3- قياس ضغط رأس لبئر على مواسير التغليف والإنتاج قبل وبعد الفالة.

- وأخذ عينات لتحديد نسبة الماء وإجراء تجارب الغاز والسائل لكل فالة
وقياس لضغط الديناميكي في نهاية استقرار العمل على كل فالة.
- 4- يتم أخذ عينات غازية على كل فالة وتحليلها.
- 5- يتم إجراء تكامل الضغط في نهاية عملية تقييم البئر.

الفصل الرابع

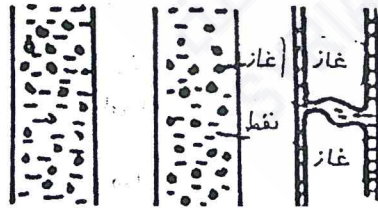
الأسس النظرية لارتفاع السوائل في مواسير الإنتاج

1-4 مبادئ عامة:

في معظم الحالات فإن جريان السوائل في مواسير الإنتاج هو جريان لسوائل غير متجانسة مؤلفة من طورين: غاز + سائل .

* الغازات: تتألف من الغازات الحرة وبخار السائل، أما السوائل فهي مؤلفة من سائلين غير منحلين فيما بينهما وهما الماء والنفط، كما أن الخواص الفيزيائية للطورين غير ثابتة أثناء صعودها في مواسير الإنتاج بل تتغير نتيجة تغير الضغط والحرارة التي تتعرض لها، فعند اقتراب هذا الخليط من السطح فسوف يتناقص الضغط الذي يؤدي إلى تحرر جزء من الغازات المنحلة في النفط وهذه بدورها تؤدي إلى زيادة في لزوجة النفط والتوتر السطحي له كذلك ونتيجة انضغاطية الغازات فسوف يتغير وزنها النوعي تبعاً لتغيرات الضغط، إذن فسرعة جريان هذا الخليط ليست متساوية، فالغازات ذات الوزن النوعي الصغير بالنسبة للسائل تتجه للجريان ضمن السائل وحيث سرعة جريانها أكبر من سرعة جريانها أكبر من سرعة جريان السائل.

إذن يمكن القول بأن حالة المزيج النفطي الغازي تتغير أثناء صعوده في أنابيب الإنتاج تبعاً لنسبة حجوم المادتين السائلة والغازية، وسرعة جريان المزيج الوسطية وقطر أنابيب الإنتاج وبالتالي فإننا نميز ثلاث حالات لجريان المزيج في مواسير الإنتاج (الشكل 1-4).



الشكل (1-4)

تتميز الحالة الأولى بضالة نسبة الغاز إلى النفط وهنا يوجد الغاز بحالة فقاعات غازية صغيرة في النفط (4-1-1). .

أما في الحالة الثانية فنجد نسبة الغاز إلى النفط أكبر وهنا يتألف المزيج الصاعد من أعمدة صغيرة من النفط تحوي على غاز بشكل فقاعات تتوالى بأعمدة من الغاز تحتوي على نقاط من النفط محمولة في الغاز (حالة ب). أما في الحالة الثالثة وحيث تصبح نسبة الغاز إلى النفط كبيرة والنفط يصعد في أنابيب الإنتاج وفقط على الجدران بينما يشكل الغاز معظم المقطع الداخلي مع نقط صغيرة من النفط (حالة ج). أكثر الحالات انتشاراً هي الحالة الثانية ولا تظهر الحالة الثالثة إلا في نهاية أنبوب الإنتاج.

تعمل الآبار المنتجة ذاتياً غالباً حسب الحالة الثانية.

في الحقيقة، لصعود النفط في أنابيب الإنتاج يتحدد فرق الضغط اللازم للإنتاج والكائن بين قاع البئر ورأس البئر بجهد الرفع ومجموع الخسائر التالية:

- أ- الجهد الضائع نتيجة مقاومة الاحتكاك بين السائل وجوانب أنبوب الإنتاج.
- ب- الجهد الضائع نتيجة مقاومة التزحلق (ظاهرة جامان) بين السائل والغاز.
- ج - سرعة الجريان النسبية ما بين الحالتين السائلة والغازية والجهد الضائع نتيجة تغير هذه السرعات عند دخوله في قاع البئر.
- د- بنية وتركيب المزيج.

أ- الضغوط الضائعة نتيجة الاحتكاكات:

وهي تلك التي تضيع نتيجة الاحتكاك ما بين السائل والغازات التي تتحرك بسرعات مختلفة أو من احتكاك السوائل والغازات مع الجدران الداخلية لمواسير الإنتاج والتي تعاكس جريان الخليط في مواسير الإنتاج. هذه الضغوط الضائعة هي عبارة عن فقدان كمية من الطاقة الكامنة في الخليط.

معظم الباحثين درسوا هذه الطاقة الضائعة بتطبيق القوانين الهيدروديناميكية وبفرض أن جريان الخليط في المواسير هو جريان مضطرب.
من أجل طول صغير dh من مواسير الإنتاج فإن قيمة فقدان الضغط نتيجة الاحتكاك هي dp_{fr} والتي يعطى بالعلاقة التالية:

$$dp_{fr} = \lambda \frac{dh}{D} \frac{w^2}{2g} \quad (1-4)$$

فقدان الضغط الكلي داخل المواسير هو:

$$P_{fr} = \frac{\lambda}{2g D} \int_0^L w^2 \cdot \gamma \cdot dh \quad (2-4)$$

إذا فرضنا قيماً وسطية لكل من السرعة والوزن النوعي للخليط $\bar{\gamma}_m$ ، $\bar{w}_m$ فيمكن كتابة العلاقة السابقة كما يلي:

$$P_{fr} = \frac{\lambda \bar{w}_m^2}{2g} \cdot \frac{L}{d} \quad \bar{\gamma}_m \quad (3-4)$$

حيث: λ : معامل المقاومة الهيدروديناميكية نتيجة الاحتكاك وهو تابع لنوع الجريان.

L : طول مواسير الإنتاج.

d : القطر الداخلي لمواسير الإنتاج.

w : سرعة جريان المزيج في مقطع مواسير الإنتاج.

$\bar{\gamma}_m$: الوزن النوعي الوسطي للخليط.

ب- سرعة الجريان النسبية ما بين الحالات المؤلفة للخليط:

الفرق في السرعة التي يمكن أن تصل إليها نقطة من السائل بالنسبة للغازات تعتمد بشكل خاص على نسبة الغازات إلى السائل وعلى الشروط المتواجدة في المواسير وكذلك الفرق ما بين الوزن النوعي لكل من السائل

والغازات وعلى التوتر² السطحي ما بين الغازات والسائل وعلى لزوجة كل من الغازات والسائل.

الوزن النوعي الوسطي في مقطع F من مواسير الإنتاج يعطى بالعلاقة التالية:

$$\gamma_{am} = \frac{F\ell \cdot \gamma_\ell + F_g \cdot \gamma_g}{F} \quad (4-4)$$

حيث:

F_g : السطح الذي يشغله السائل والسطح الذي تشغله الغازات وطالما أن:
 $F = F_g + F_L$ فإن العلاقة (4-6) تصبح:

$$\gamma_{am} = \gamma_g + (\gamma_\ell - \gamma_g) \frac{F\ell}{F} \quad (5-4)$$

النسبة ما بين المعدل الحجمي للسائل والمعدل الحجمي للغازات التي تمر من خلال المقطع F هي:

$$r = \frac{Q_g}{Q\ell} = \frac{F_g}{F\ell} \cdot \frac{w_g}{w\ell} \quad (6-4)$$

حيث:

w_ℓ : هي السرعة المطلقة للغازات والسرعة المطلقة للسائل في المقطع F في حالة تساوي سرعتين $w_g = w_\ell$ ومن أجل نسبة ثابتة للغازات إلى النفط ينتج من العلاقة (4-6) أن السطوح التي تشغلها الغازات وكذلك السطوح التي يشغلها السائل تتناسب وغازة كل منهما ولكن نتيجة تسرب الغازات ضمن السائل فإن سرعة الغازات تزداد بالنسبة لسرعة السائل وبالتالي ينتج أن السطح الذي تشغله الغازات يتناقص بينما يزداد السطح الذي تشغله السوائل ومن العلاقة (5-6) ينتج أن الوزن النوعي الوسطي للخليط يتزايد، ونتيجة لذلك فإن التدرج الوسطي للضغط داخل مواسير الإنتاج يزداد وتزداد بنفس الوقت الضغوط الضائعة نتيجة الاحتكاكات.

إذن فكلما ارتفعت نسبة الغاز إلى النفط كلما ازدادت مقاومات الاحتكاك وكلما كانت سرعة الجريان أكبر كانت المقاومات أكبر وكانت مقاومات الترحلق أصغر.

ج- تركيب وبنية خليط الغازات والسوائل:

إن بنية مزيج الغازات والسائل الصاعد في مواسير الإنتاج العمودية يعتمد بصورة رئيسية على ما يلي:

- 1- النسبة ما بين معدل إنتاج كل من الغازات والسائل.
- 2- السرعة الوسطية لصعود المزيج في مواسير الإنتاج.
- 3- الوزن النوعي والتوتر السطحي لكل من الغازات والسائل.

إن طبيعة هذا الخليط يساهم في تشكيل التراكيب التالية:

- 1- تركيب غروي- في هذا التركيب الغازات تتحرك بشكل فقاعات متفرقة ومتوزعة ضمن كتلة السائل الذي يشكل الجزء الأساسي للمزيج.
- 2- تركيب كتلي - وفيه خليط الغازات والسائل ممثل بشكل كتل من السائل والتي توجد فيها فقاعات غازية متفرقة متباعدة بكتل من الغازات الحاوية على نقاط متفرقة من النفط وهو تركيب غير ثابت.
- 3- تركيب مستحلب - حيث الحالتان الغازية والسائلة متوزعتان في بعضهما البعض ولا توجد حالة مستمرة.
- 4- تركيب حلقي - وفيه السائل يجري بشكل حلقات متلاصقة ومتلاصقا على الجدران الداخلية لمواسير الإنتاج وبداخل هذه الحلقات تجري الغازات مع نقاط متفرقة من السائل (4-1- ج) .
- 5- تركيب ضبابي - حيث يكون السائل بشكل نقاط ميكروسكوبية متوزعة في كتلة الغازات المشكلة للحالة الأساسية للخليط.

نتيجة الأبحاث المخبرية التي أجريت لمتابعة جريان الخليط في نماذج من الزجاج تم التوصل إلى تحديد حدود تشكيل التراكيب المختلفة. هذه الحدود للتراكيب السابق ذكرها تعتمد على عوامل كثيرة ومن أهمها نسبة الغازات إلى السائل.

باستمرار صعود خليط الغازات والسائل في مواسير الإنتاج ذات القطر الثابت فإن الضغط يتناقص على طول هذه المواسير ونتيجة كون السائل غير انضغاطي بعكس الغازات فهذا الأمر يؤدي إلى تزايد المعدل الحجمي للغازات وبالتالي تزايد نسبة الغازات إلى السائل.

إذن من نقطة ما لا على التعيين فإن شروط تواجد التركيب الغروي تختفي لكن كمية الغازات غير كافية لرفع السائل بشكل حلقات، أي أنه ومن أجل زمن معين فإن البئر تنتج كمية من السائل أقل من الكمية التي تعطيها الطبقة وهذا السائل سوف يرفع من وقت لآخر من قبل الغازات بشكل كتل من البترول، أي أن الجريان داخل المواسير هو جريان غير ثابت وهو المميز لكل من التركيب الكتلي والمستحلب، ومع ازدياد النسبة بين معدل إنتاج الغازات والسائل فإن معامل عدم استقرار الجريان ينخفض وحتى يصبح الجريان مستقرًا، هذا التحول يرافقه تبدل في بنية المزيج بحيث أن الغازات تجري ضمن كتلة السائل الذي يصبح بشكل حلقات منقطعة (بنية حلقية).

التركيب الضبابي يتشكل عند نسبة معينة للغازات إلى البترول حيث ينتشر السائل على شكل نقاط صغيرة في كتلة الغازات.

في أية طبقة خازنة للمركبات الهيدروكربونية السائلة أو الغازية فإنه يوجد احتياطي للطاقة مؤلف من الطاقة الكامنة في السائل وفي الغازات الحرة أو المنحلة في كتلة السائل ودور كل من هاتين الطائفتين يعتمد على الشكل العام للطبقة، فمثلاً في الطبقات ذات الدفع المائي الجيد وحيث الضغط الطبقي أكبر

من ضغط التشيع فإن صعود السوائل على السطح يتم بتأثير الطاقة الكامنة في السائل بينما في الطبقات الحاملة والمغلقة وحيث الضغط الطبقي يتناقص باستمرار أثناء الإنتاج فإن العامل الرئيسي في صعود السوائل على السطح هو تمدد الغازات المتحررة من كتلة النفط.

إن الطاقة الكامنة في كل من السوائل والغازات الحرة والمنحلة وبعد عبورها من الطبقة إلى البئر تستهلك أثناء صعود السوائل داخل مواسير الإنتاج بسبب:

1- تحقيق العمل الميكانيكي اللازم لرفع الغازات من البئر على السطح.
2- تحقيق تسارع كتل الغازات والسائل ذلك أن هذه السرعة تزداد باتجاه السطح.

3- لمقاومة الاحتكاكات الناتجة عن جريان الخليط في مواسير الإنتاج وعبر الفالات الموجودة عند القعر أو على السطح.

وطالما أن تركيب خليط الغازات والسائل ليست ثابتة كما أسلفنا، وذلك على طول مواسير الإنتاج وكذلك تغيّر الصفات الفيزيائية للسوائل والغازات بسبب تغير الحرارة والضغط وأيضاً بسبب وجود مقاومات التزحلق والاحتكاك وتغير سرعات جريان المزيج فإن القوانين الهيدروديناميكية لجريان السوائل غير متجانسة لا يمكن تطبيقها. وحتى الوقت الحاضر فإن مسألة صعود الخليط غير متجانس لا زالت مشكلة غير محلولة بشكل كامل (رياضياً). يبقى استعمال العلاقات التي تم التوصل إليها مخبرياً أو من الآبار مباشرة أقرب إلى الواقع. وقد درست هذه المسألة من قبل باحثين عدة والذين أعطوا طرقاً مختلفة لحل هذه المشكلة مثل:

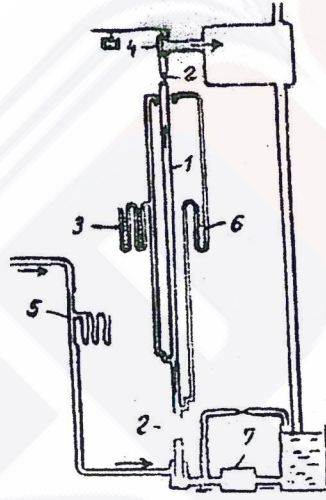
V.S.Melikov , K.E.Brown , N.C.Ros ,
A.P.Krilov , E.C. Babson , W.E.Gilbert , F.H. Pottmann .
P . G . Carpenter

وغيرهم كثير .

سوف ندرس هنا: طريقة كريلوف .

2-4 طريقة كري洛夫 - A . P . KRILOV

درس كري洛夫 صعود الخليط غير المتجانس مخبرياً باستعمال جهاز بارتفاع 20 متراً وبقطر يساوي إلى قطر مواسير الإنتاج المستعملة في آبار الإنتاج.



(الشكل 2-4) .

هذا الجهاز يتألف من عمود مخبري (1) بارتفاع 20 متراً وهو ممثل لأنابيب الإنتاج وحيث يضخ بداخله معدل ثابت من المياه ومعدل ثابت من الهواء وذلك بمساعدة مضخة ذات مكبس (7) وضغط (5) ومن خلال الصمام (4). بعد ثبوتية جريان الخليط في الأنبوب يقرأ الضغط عند قاعدة المواسير بواسطة مقياس الضغط (3). بعد ذلك يغلق الصمام (2) ويعزل داخل الأنبوب كمية من الغازات والسائل.

بعد الإغلاق يبقى حجم من السائل عند الجزء السفلي بارتفاع h_1 الذي يقاس بالمقياس (6).

انطلق كري洛夫 من فكرة ليجاد علاقة من النوع الآتي:

$$f(V.q.d. \Delta H)=0 \quad (7-4)$$

حيث: V : معدل حقن الغازات.

q : معدل حقن السائل.

d : قطر مواسير الإنتاج.

ΔH : تدرج الضغط وهو يعطى بوحدة وزن عمود السائل على واحدة الطول لمواسير الإنتاج.

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\gamma \Delta \ell} \quad (8-4)$$

ΔP : الضغط الضائع في الطول $\Delta \ell$ من مواسير الإنتاج.

ونتيجة تسارع الجريان والاحتكاك الناتج بين مواسير الإنتاج والخليط فإن تدرج الضغط يعطى بشكل ضغوط ضائعة على الشكل التالي:

$$\Delta H = \frac{1}{\gamma} \frac{dP_g}{d\ell} + \frac{1}{\gamma} \frac{dP_a}{d\ell} + \frac{1}{\gamma} \frac{dP_{fr}}{d\ell} \quad (9-4)$$

حيث:

$\frac{dP_g}{d\ell}$: الضغط الضائع في مواسير الإنتاج بتأثير الوزن النوعي للخليط

الذي يجري فيها.

$\frac{dP_a}{d\ell}$: الضغط الضائع في مواسير الإنتاج نتيجة تسارع كل من السائل

والغازات.

$\frac{dP_{fr}}{d\ell}$: الضغط الضائع نتيجة الاحتكاك ما بين الخليط وجدران مواسير

الإنتاج.

ومن جهة أخرى فإن الضغط الضائع نتيجة تسارع الخليط هو صغير جداً بحيث يمكن إهماله وأن :

$$dP_{fr} = h_{fr} \gamma d\ell \quad \text{وأن} \quad dP_g = \gamma_{am} . d\ell$$

وبالتالي فإن العلاقة (9-6) تصبح كما يلي:

$$\Delta H = \frac{\gamma_{am}}{\gamma} + h_{fr} \quad (10-4)$$

حيث:

h_{fr} : الضغط الضائع نتيجة الاحتكاك والمعطى بوحدة عمود السائل على واحدة الطول من المواسير.

$\gamma - \gamma_{am}$: الوزن النوعي للخليط والوزن النوعي للسائل تحت الشروط المتواجدة في مواسير الإنتاج.

من معطيات الجهاز المخبري توصل كريلوف إلى العلاقتين التاليتين:

$$\frac{\gamma_{am}}{\gamma} = \frac{q+a}{q+V+a} \quad (11-4)$$

$$h_{fr} = b \cdot V \cdot q + CV^2 + eq^{1.75} \quad (12-4)$$

حيث:

e, c, b, a : ثوابت تعتمد على قطر مواسير الإنتاج وعلى لزوجة السائل ووزنه النوعي:

فمن أجل خليط من الماء والهواء فإن هذه الثوابت تعطى بالعلاقات التالية:

$$a = 0.785 d^2, b = \frac{1.41}{10^3 d^5}, c = \frac{9.3}{10^7 d^{16/3}}, e = \frac{7.8}{10^4 d^{4.75}} \quad (12-4)$$

الحد: $CV^2 = \frac{9.3 \cdot V^2}{10^7 \cdot d^{16/3}}$ يمثل الضغط الضائع بسبب احتكاك الغازات في

مواسير الإنتاج. معامل الاحتكاك λ يعطى بعلاقة ويموس:

$$\lambda = \frac{0.0094}{3\sqrt{d}} \quad (14-4)$$

الحد: $eq^{1.75} = \frac{7.8}{10^4 d^{4.75}} q^{1.75}$ يمثل فقدان الضغوط بسبب الاحتكاك الناتج

بين السوائل وبين جدران مواسير الإنتاج.

معامل الاحتكاك هنا يعطى بالعلاقة:

$$\lambda = \frac{0.3167}{\sqrt{Re}} \quad (15-4)$$

العلاقة (10-4) يمكن كتابتها بالشكل التالي:

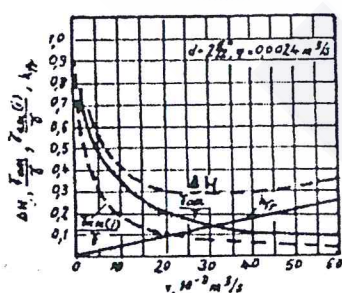
$$\Delta H = \frac{\gamma_{am}}{\gamma} + \frac{\gamma_s}{\gamma} + h_{ff} \quad (16-4)$$

حيث $\frac{\gamma_s}{\gamma}$: يمثل فقدان الضغوط نتيجة مقاومات التزحلق (ظاهرة جامان).

إذا مثلنا بيانياً العلاقة (16-4) كما في الشكل (3-4) نرى المنحنيات المميزة لكل من فقدان الضغوط نتيجة الاحتكاك ما بين مواسير الإنتاج والسائل ومقاومات التزحلق وتدرج فرق الضغط لكامل طول مواسير الإنتاج وذلك من أجل قيمة معينة للتصريف وعند قطر ثابت لمواسير الإنتاج. ونستنتج ما يلي:

1- كلما ارتفعت نسبة الغاز كلما ازدادت مقاومة الاحتكاك h_{ff} .

2- مقاومات التزحلق تصغر كلما ارتفعت نسبة الغاز.



بتعويض العلاقات (11-4) و (12-4)

في العلاقة (10.6) نحصل على المعادلة

العامة لجريان خليط من الغازات

والسائل في مواسير الإنتاج العمودية.

الشكل (3-4)

$$\Delta H = \frac{q + a}{q + a + V} + bq.V + CV^2 + eq^{1.75} \quad (17-4)$$

من العلاقة (15-4) ينتج λ تتناسب عكساً مع الجذر الرابع لعدد رينولدس أي
أن λ تتناسب طردياً مع الجذر الرابع للزوج الديناميكية للسائل إذن:

$$b_p = b \sqrt[4]{\frac{\mu \cdot p}{\gamma p}} \quad e_p = \sqrt[4]{\frac{\mu p}{\gamma p}}$$

حيث: μ : اللزوجة الديناميكية للبترول . C.P.

من ملاحظة العلاقة (12-4) نرى أن:

الحد الأول $b \cdot V \cdot q$ يمثل الضغوط الضائعة نتيجة الجريان الغير متجانس في
مواسير الإنتاج.

الحد الثاني CV^2 يمثل فقدان الضغوط نتيجة الاحتكاك ما بين الغازات
ومواسير الإنتاج.

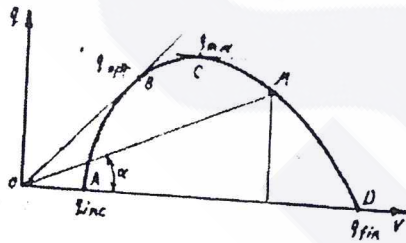
الحد $eq^{1.75}$ يمثل فقدان الضغوط نتيجة الاحتكاك بين السائل
ومواسير الإنتاج.

من أجل تدرج الضغط ΔH ثابت فالعلاقة (17-4) يمكن اعتبارها تابعاً ضمنياً
من نوع $F(q \cdot V) = 0$.

إذا مثلنا بيانياً هذا التابع فإننا نحصل

على الشكل (4-4)

على هذا المنحني يمكن تمييز :



الشكل (4-4)

$$q_{inc} = 0$$

$$q_{fin} = 0$$

$$q = 0$$

أ- النقطتان A و D اللتان تقابلان:

وذلك من أجل :

وهنا العلاقة (17-4) لها جذران موجبان أي أنه في مواسير الإنتاج وفي المجال
0-A تجري الغازات فقط دون أن يتحرك السائل، والتفسير الفيزيائي هو أن

الغازات تنتشر في كتلة السائل دون أن تتمكن من رفع السائل على السطح وكذلك الحال لما يحدث في النقطة D حيث تجري الغازات في المواسير الإنتاجية دون أن يصل السائل إلى السطح وهذه النقطة تقابل النظام النهائي للإنتاج.

ويمكن القول بشكل آخر إنه عند تحرك المزيج بكميات قليلة من الغازات فإن مقاومات الترحلق تكون كبيرة بشكل تفوق فيه الضغط الكلي ولذا فلن يكون هناك إنتاج وحيث يكون السائل بشكل نقاط على الجدران الداخلية لمواسير الإنتاج.

ب- النقطتان C, B المقابلتان للإنتاج الأمثل q_{opt} والإنتاج الأعظمي q_{max} . شروط رفع السائل على السطح تبقى ثابتة فيما إذا بقيت قيم كل من تدرج الضغط والوزن النوعي للسائل وكذلك قطر مواسير الإنتاج ثابتة، بينما الطاقة المستهلكة لرفع واحدة الحجم هو تابع لنسبة الغاز إلى السائل:

$$r = \frac{V}{q} = \frac{1}{\tan \alpha}$$

حيث α : الزاوية التي يصنعها شعاع نقطة ما من المنحني مع المحور الذي يمثل حجم الغازات.

النقطة B تمثل النظام المثالي للإنتاج لأنها تقابل مردوداً أعظماً لرفع السائل على السطح والذي يتم باستهلاك نوعي أصغري للغازات.

النقطة C من المنحني وحيث يصبح مماس هذه النقطة موازياً لمحور حجم الغازات $\left(\frac{dq}{dV} = 0 \right)$ والتي تقابل قيمة عظمى لمعدل السائل الذي ينتج.

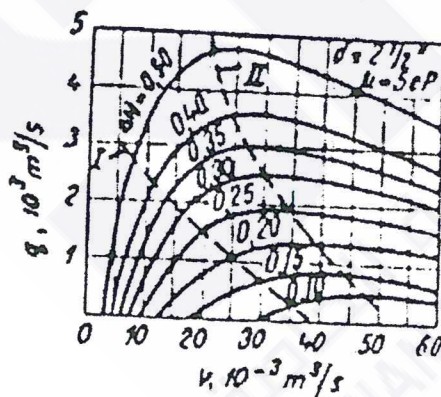
إذن فإن عمل مواسير الإنتاج هو مثالي فقط في المجال B-C من المنحني. وتفسير ذلك هو انه بازدياد نسبة الغازات فإن مقاومات الترحلق تقل حتى تصبح نسبة الغاز إلى حد معين تصبح فيه مقاومة الترحلق أصغر من فرق

الضغط الضروري للإنتاج وعندها يبدأ السائل في البئر في الجريان داخل
مواسير الإنتاج.

وبمتابعة زيادة نسبة الغاز تتخفض مقاومة الترحلق بشكل كبير وتزداد تدريجياً مقاومات الاحتكاك وبالنسبة فإن مقاومات الاحتكاك والترحلق تصغر وتزداد بالتالي كمية الإنتاج (المجال B-C) وحتى إذا ما وصلت نسبة الغاز إلى حد معين فإن المقاومات السلبية تبدأ بالتزايد ومن ثم ينخفض الإنتاج.

وكما أسلفنا فإن كمية الإنتاج المثالية تتعلق بتدرج الضغط والوزن - النوعي وقطر أنبوب الإنتاج.

الشكل (4-5) يظهر لنا قيم الإنتاج المثالية للسائل من أجل قطر ثابت لمواسير الإنتاج ووزن نوعي ثابت للسائل ولكن بتدرج ضغط مختلف. يمكن الحصول على نقاط الإنتاج المثالية بنقاط تقاطع المنحني I بالمنحنيات ونقاط الإنتاج الأعظمية من تقاطع المنحني II مع المنحنيات الممثلة لقيم مختلفة لتدرج الضغط.



الشكل (5-4): $q = f(V)$

ج - معادلة الجريان خلال مواسير الإنتاج الحقيقية:

إن العلاقات السابقة التي توصل إليها كري洛夫 نتيجة أبحاثه المخبرية لا يمكن تطبيقها على مواسير الإنتاج الحقيقية إلا بعد استبدال معدل الغازات بمعدل

وسطي لأنه نتيجة تناقص الضغط على طول المواسير من الضغط P_1 (عند قعر المواسير) إلى الضغط P_2 (على السطح) فإن معدل الغازات يتغير ويتغير أيضاً تدرج الضغط. لذا لا بد أيضاً من استخدام قيمة تدرج ضغط وسطية. أما قيم الحدود في العلاقة (4-17) فتبقى ثابتة.
معدل الغازات الوسطي يحسب من العلاقة:

$$V_m = \frac{1}{L} \int_0^L V \cdot d\ell \quad (4-18)$$

حيث L : طول مواسير الإنتاج وإذا فرضنا أن تمدد الغازات يتم تحت درجة حرارة ثابتة فإننا نحصل على ما يلي:

$$P \cdot V = P_0 \cdot V_0 \Rightarrow V = \frac{P_0 \cdot V_0}{P} \quad (4-19)$$

إذا فرضنا أن تغير الضغط في النهاية السفلى للمواسير وعلى السطح هو تغير خطي فإننا نحصل على:

$$P = P_2 + \frac{\ell}{L} (P_1 - P_2) \quad (4-20)$$

بتعويض العلاقة (4-20) في العلاقة (4-19) وبتعويض العلاقة (4-19) في العلاقة (4-18) نحصل على ما يلي:

$$dL = \frac{P_0 \cdot V_0}{P_1 - P_2} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (4-21)$$

$$V_m = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{P_0 \cdot V_0}{P_2 + \frac{\ell}{L} (P_1 - P_2)} d\ell = \frac{P_0 \cdot V_0 \ln \frac{P_1}{P_2}}{P_1 - P_2} \quad (4-22)$$

ومن جهة أخرى فإن مجال تحول تدرج الضغط هو صغير (0.1 - 0.6) وبالتالي فإنه:

في حالة مواسير إنتاج طويلة فإن قيمة التدرج الوسطي للضغط تعطى بالعلاقة التالية:

$$\Delta H_m = \frac{10 (P_1 - P_2)}{\gamma \cdot L} \quad (23 - 4)$$

حيث ΔH_m : فقدان الضغط المعبر عنه بوزن متر عمود سائل على متر واحد من مواسير الإنتاج.

$P_2 - P_1$: الضغط عند قعر مواسير الإنتاج وعلى السطح kgf/cm^2

γ : الوزن النوعي للسائل gf/cm^3

L : طول مواسير الإنتاج m .

وهكذا فإن معادلة جريان خليط من الغازات والنفط في مواسير الإنتاج بطولها الحقيقي في البئر هي على الشكل التالي:

$$\Delta H_m = \frac{a + q}{q + V_m + a} + bqV_m + CV_m^2 + eq^{1.75} \quad (24 - 4)$$

في هذه العلاقة فإن الحدين الثالث والرابع في الشروط الحقيقية داخل البئر لا يمثلان سوى 5-8 % من تدرج الضغط الوسطي.

وبالتالي فإن معدل إنتاج السائل q هو صغير بالنسبة لمعدل إنتاج الغازات V_m وبالتالي فالعلاقة السابقة تصبح:

$$\Delta H = \frac{q + a}{V_m + a + q} + b \cdot q \cdot V_m \quad (25 - 4)$$

ومنها نحصل على قيمة معدل إنتاج السائل:

$$q = \frac{\Delta H (V_m + a) - a}{1 + abV_m + b V_m^2} \quad (26 - 4)$$

د- مميزات نظم عمل مواسير الإنتاج:

كما أسلفنا سابقاً فإن الإنتاج يجب أن يكون ما بين النقطتين $q_{\max}$ و q_{OPT}

من المنحني $q = f(V)$ الشكل (4-4).

وفي حالة استعمال الصمامات داخل البئر فيجب معرفة الشروط المقابلة للنقطة

1- نظام العمل عندما $q_{inc} = 0$:

شروط العمل في هذا النظام يتم الحصول عليها من العلاقة (24-4) وحيث $q = 0$

$$\Delta H = \frac{a}{V_m + a} + CV_m^2 = f(V_m) \quad (27-4)$$

التابع $\Delta H = f(V_m)$ له قيمة صغرى من أجل قيم V_m التي تمثل جذور للمعادلة:

$$2CV_m^2 + 4aCV_m^2 + 2a^2 \cdot CV_m - a = 0 \quad (28-4)$$

هذه العلاقة لها جذر موجب وبتعويض قيمة هذا الجذر الموجب في العلاقة (27-4) يمكن تعيين قيمة تدرج الضغط الأصغرى:

$$\Delta H_{min} = \frac{0.0208}{\sqrt[3]{d}} \quad (29-4)$$

حيث: d : قطر مواسير الإنتاج مقدراً بالمتر.

$$\Delta H_{min} = \frac{0.077}{\sqrt[3]{d}} \quad (30-4)$$

حيث: d : قطر مواسير الإنتاج بالانش.

وهذا يعني أنه من أجل قيم أصغر لتدرج الضغط الوسطي فإنه لا يرتفع خليط الغازات والنفط في مواسير الإنتاج ومهما كان معدل الغازات. الضغط عند حذاء مواسير الإنتاج المقابل لتدرج الضغط مع الأخذ بعين الاعتبار العلاقة (23-4) يعطى بالعلاقة التالية:

$$P_1 = P_2 + \frac{0.00208 \gamma \cdot L}{\sqrt[3]{d}} \quad (31-4)$$

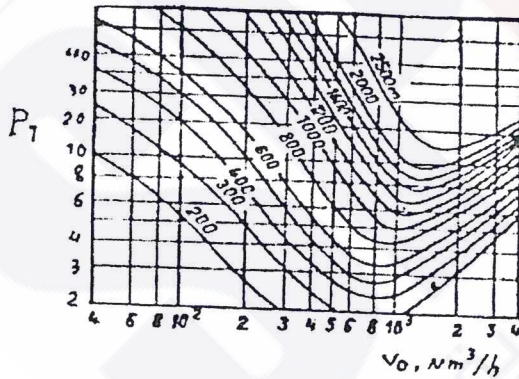
وعندما يعبر عن قطر مواسير الإنتاج بوحدة الانش ($25,4$ مم) فإن العلاقة السابقة تصبح:

$$P_1 = P_2 + \frac{0.0077 \gamma \cdot L}{\sqrt[3]{d}} \quad (32-4)$$

بتعويض قيم التدرج الوسطي للضغط ومعدل الغازات الوسطي في العلاقة (28-4) نحصل على العلاقة التالية:

$$\frac{10(P_1 - P_2)}{\gamma \cdot L} = \frac{a}{PoVo \ln \frac{P_1}{P_2}} + C \left[\frac{PoVo \ln \frac{P_1}{P_2}}{P_1 - P_2} \right]^2 \frac{P_2}{P_1 - P_2} + a \quad (33-4)$$

ولتسهيل حل العلاقة هذه فإننا نستخدم التمثيل البياني $P_1 = f(Vo)$ كما في الشكل (6-4) وذلك من أجل قيم مختلفة لطول وقطر مواسير الإنتاج وللوزن النوعي للسائل وحيث $q_{inc} = 0$.



الشكل (6-4)

العلاقة بين ضغط حذاء مواسير الإنتاج

وتصريف الغازات من أجل عدم وجود إنتاج من السائل $q_{in} = 0$

2- نظام العمل المثالي والأعظمي:

لتعيين شروط عمل مواسير الإنتاج الحقيقية المقابلة للنقطتين B , C في الشكل (4-4) تتطرق من المعادلة (4-17) والتي نفرضها تابعاً ضمناً $F(\Delta H, V, q) = 0$ ، وبعد ذلك نعين النقاط العظمى الموافقة للشرط:

$$\frac{dq}{dV} = 0 \text{ والنقاط المثالية الموافقة للشرط } \frac{V}{q} = \min . \text{ إن مثل هذا الحل هو}$$

في غاية الصعوبة ولهذا فإن كريلوف مثل بيانياً على سلم لوغاريتمي المنحنيات:

$$V_{\max} = f(\Delta H), \quad q_{\max} = f(\Delta H)$$

وذلك من أجل عنصر صغير من مواسير الإنتاج ولاحظ أن هذه النقاط تقع على خطوط مستقيمة والتي تعطى بالعلاقات التالية:

$$q_{\max} = 55 d^3 \Delta H^{1.5}, \quad V_{\max} = \frac{15.5 d^{2.5}}{\Delta H^{0.5}} \quad R_{\max} \frac{0.28}{d^{0.5} \cdot \Delta H^2} \quad (34-4)$$

لاحظ كريلوف أنه بين كمية الإنتاج المثالية وكمية الإنتاج العظمى توجد العلاقات التالية:

$$q_{\text{OPT}} = q_{\max} (1 - \Delta H), \quad V_{\text{OPT}} = V_{\max} (1 - \Delta H)^2, \\ R_{\text{OPT}} = R_{\max} (1 - \Delta H) \quad (35-4)$$

وبالانتقال من عنصر صغير من مواسير الإنتاج بطولها الحقيقي تم التوصل إلى العلاقات الأساسية لصعود الخليط في مواسير الإنتاج العمودية وصالحة من أجل البترول ذي اللزوجة الحركية $\mu = 5C.P$

1- بنظام L , P2 , P1 : يتم حساب الإنتاج المثالي والأعظمي لكميات السائل والغاز آخذين بعين الاعتبار أن:

$$\Delta h = \frac{10(p_1 - p_2)}{\gamma l} \quad (36-4)$$

والعلاقة 35-4 ، فنحصل على ما يلي:

$$q_{MAX} = \frac{2500d^3 \sqrt{(P_1 - P_2)^3}}{\sqrt{\gamma L^3}} \quad (37 - 4)$$

$$V_{max} = \frac{0.8 \sqrt{d^5 (P_1 - P_2) \cdot \gamma \cdot L}}{Lg \frac{P_1}{P_2}} \quad (38 - 4)$$

$$R_{max} = \frac{0.0077 \cdot \gamma \cdot L^2}{\sqrt{d} (P_1 - P_2) Lg \frac{P_1}{P_2}} \quad (39 - 4)$$

$$Q_{OPT} = \frac{2.5 \cdot 10^3 \cdot d^3 \cdot \sqrt{(P_1 - P_2)^3} [\gamma \cdot L - 10(P_1 - P_2)]}{\sqrt{L^5 \cdot \gamma^3}} \quad (40 - 4)$$

$$V_{OPT} = \frac{0.8d^{2.5} [\gamma L - 10(P_1 - P_2)]^2 \sqrt[3]{P_1 - P_2}}{\sqrt{L^3 \cdot \gamma^3} Lg \frac{P_1}{P_2}} \quad (41 - 4)$$

$$R_{OPT} = \frac{0.0077 \cdot L [\gamma L - 10(P_1 - P_2)]}{\sqrt{d} (P_1 - P_2) Lg \frac{P_1}{P_2}} \quad (42 - 4)$$

2- **بنظام** $\Delta H, L$:

مع الأخذ بعين الاعتبار العلاقة (36-4):

$$Q_{max} = 78 \cdot d^3 \sqrt{\Delta H^3 \cdot \gamma} \quad (43 - 4)$$

$$V_{\max} = \frac{0.253 \cdot \gamma \cdot L \sqrt{d^5 \cdot \Delta H}}{Lg \frac{P_1}{P_2}} \quad (44 - 4)$$

$$R_{\max} = \frac{0.077 \cdot L}{\sqrt{d} \cdot \Delta H \cdot Lg \frac{P_1}{P_2}} \quad (45 - 4)$$

$$Q_{\text{OPT}} = 78d^3 \sqrt{\Delta H^3} (1 - \Delta H)\gamma \quad (46 - 4)$$

$$V_{\text{OPT}} = \frac{0.253 \cdot \gamma L \sqrt{\Delta H \cdot d^5} (1 - \Delta H)^2}{Lg \frac{P_1}{P_2}} \quad (47 - 4)$$

$$R_{\text{OPT}} = \frac{0.077 \cdot L (1 - \Delta H)}{\sqrt{d} \cdot \Delta H Lg \frac{P_1}{P_2}} \quad (48 - 4)$$

حيث: Q: تصريف السائل - t / 24h

V: تصريف الغاز - Nm³/ h

R: نسبة استهلاك الغاز إلى النفط Nm³/ t

d: قطر مواسير الإنتاج بالبوصة.

L: طول مواسير الإنتاج m.

γ: الوزن النوعي للسائل gr / cm³

P₂, P₁: النفط عند حذاء مواسير الإنتاج والنفط على السطح at.

3-4 - تحليل عمل مواسير الإنتاج:

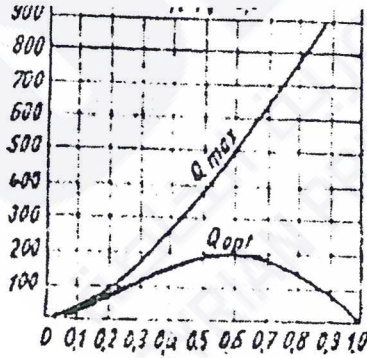
عامل الذي يعين عمل مواسير الإنتاج هو تدرج الضغط ΔH_m والذي يمكن تأنيته بالشكل التالي:

$$\Delta H_m = \frac{10(P_1 - P_2)}{\gamma L} = \frac{h}{L} \quad (49 - 4)$$

عندما يكون $P_2 = 0$ فإن قيمة h تمثل الانغمار الديناميكي لمواسير الإنتاج في نائل البئر، أما ΔH فيمكن اعتبارها الانغمار النسبي. من العلاقة (43-4) ينتج أن التصريف الأعظمي Q_{max} يزداد مع انغمار المواسير ومع زيادة قطرها في وقت الذي يكون فيه التصريف المثالي للسائل Q_{OPT} يزداد مع الانغمار النسبي لمواسير في سائل البئر وحتى القيمة العظمى للانغمار ثم تبدأ كمية السائل الانخفاض (الشكل 7-4). القيمة العظمى للتصريف المثالي للسائل يأخذ قيمة عظمى من أجل قيمة معينة لتدرج الضغط التي هي عبارة عن 0,60 (من العلاقة (47-4)).

ما بينا في الفقرة ج ، ولمعرفة العلاقة بين الاستهلاك النوعي للغازات وانغمار مواسير الإنتاج فإن العلاقات السابقة يجب تغييرها من أجل التعبير عن قيمة (P_1) وذلك حسب انغمار مواسير الإنتاج، من العلاقة (23-6) نحصل على:

$$P_1 = \frac{\gamma \cdot L \cdot \Delta H}{10} + P_2$$



الشكل (7-4)

اختلاف تصريف السائل بنظام Q_{OPT} , q_{max} وذلك حسب

الانغمار النسبي لمواسير الإنتاج ذات القطر $2\frac{1}{2}$ انش

إذا رمزنا بـ: $L - h = h_o$

مع الأخذ بعين الاعتبار العلاقة (50-6) نحصل على:

$$L = \frac{h_o}{1 - \Delta H} \quad (51-4)$$

بتعويض قيم كل من L و P_1 في العلاقات (45-4) و (48-4) فإننا نحصل على ما يلي:

$$R_{\max} = \frac{0.077 \cdot h_o}{\sqrt{d \Delta H (1 - \Delta H)} \text{Lg} \frac{h_o \gamma \Delta H}{10(1 - \Delta H)P_2} + 1} \quad (52-4)$$

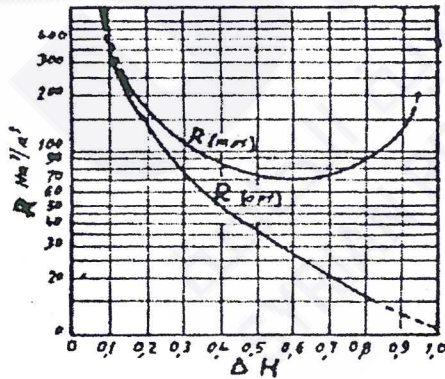
$$R_{\text{OPT}} = \frac{0.077 \cdot h_o}{\sqrt{d \cdot \Delta H} \cdot \text{Lg} \frac{h_o \gamma \Delta H}{10(1 - \Delta H)P_2} + 1} \quad (53-4)$$

حيث: h_o : المستوى الديناميكي للبئر.

في الشكل (8-4) تم تمثيل العلاقات (52-4) و (53-4) والذي يظهر العلاقة بين الاستهلاك النوعي للغازات حسب الانغمار النسبي لمواسير الإنتاج في سائل البئر.

من خلال تحليل العلاقات (52-4) و (53-4) ينتج أنه من أجل $r \rightarrow \infty$ عندما

$$\Delta h = 0$$



الشكل (8-4)

تغير قيمة الاستهلاك النوعي للغازات بتغير الانغمار لمواسير الإنتاج في سائل البئر