

## النظام النبضي لتبخّر قطرات محلول كربونات البوتاسيوم $K_2CO_3$ في اللهب الهيدروكربوني

الدكتور علي محمد سعد\*

(تاريخ الإيداع 27 / 5 / 2008. قُبِلَ للنشر في 11/1/2009)

### □ الملخص □

يقدم البحث نتائج دراسة ومعالجة النتائج التجريبية في النظام النبضي لتبخّر قطرات المحلول المائي لكربونات البوتاسيوم  $K_2CO_3$  وينسب تركيز تتراوح ما بين (5-60)% في اللهب الهيدروكربوني. بيّنت الدراسة أنّ العملية رباعية المراحل وأن هناك تغيرات لا خطية نبضية في حجم القطرات في المرحلة الثالثة وحيث تمت مناقشة الآلية الفيزيائية لظهور النظام النبضي لتبخّر قطرات المحلول الملحي المدروس.

**الكلمات المفتاحية :** النظام النبضي ، بخار ، اللهب ، المحلول ، الغشاء ، فقاعة ، مشبع .

---

\* أستاذ مساعد - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.  
أجريت البحوث التجريبية في جامعة أديسا الوطنية عام 1988م و تمت الدراسة النظرية لتلك النتائج في جامعة أديسا و جامعة تشرين عام 2007 - 2008م خلال زيارة علمية.

## Pulsating Regime of Evaporation of a Drop of Potassium Carbonate $K_2CO_3$ Water Solution in a Hydro Carbonic Flame

Dr. Ali Muhamed Saad\*

(Received 27 / 5 / 2008. Accepted 11/1/2009)

### □ ABSTRACT □

The experimental results of studying the kinetics of evaporation of a drop of potassium carbonate water solution with a concentration from 5 up to 60% in a hydro carbonic flame are presented.

It is shown that the process is of four-stages and there are nonlinear oscillations of the drop size (pulsations) at the third stage. Physical and mathematical processing of the results is carried out, allowing estimating the mechanism of the proceeding processes.

**Key words :** Pulsating regime , vapour , flame , solution , film , bubble , saturated .

---

\*Associate professor, Department of physic, Faculty Of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

يتم التحكم بضبط الناقلية الكهربائية لبلازما نواتج الاحتراق عادةً بإدخال القلويات سهلة التأين عن طريق ضخ محلول كربونات البوتاسيوم [1,2]. تتبع فعالية استخدام القلويات لسرعة توضع الناقلية الكهربائية الضرورية في تيار البلازما، حيث يحدّد بدوره آلية تبخّر قطرات المحلول. الأعمال التجريبية لأبحاث آلية تبخّر المحلول المائي لكربونات البوتاسيوم مكرّسة [1] بشكل أساسي لنموذج القطرات المتشكّلة لدى ضخّ المحلول (بخاخ) إلى حجرة الاحتراق. والذي لم يسمح بدراسة آلية تبخّر قطرات المحاليل منفردة وبناء نموذج نظري يمثّله.

**أهمية البحث و أهدافه:**

تكمن أهمية البحث في دراسة النتائج التجريبية الخاصة بتبخّر القطرات المنفردة لمحلول كربونات البوتاسيوم في شعلة اللهب الهيدروكربوني والتحليل الفيزيائي للعمليات الجارية خلال حدوث النظام اللامستقرّ لتبخّر قطرات المحلول.

**طرق البحث ومواده:**

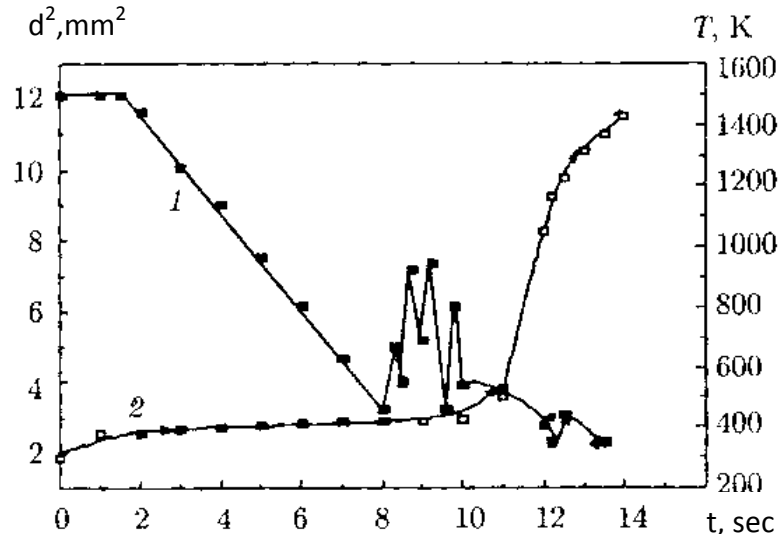
اعتمد البحث الطريقة التحليلية لتلك النتائج وبناء النموذج النظري الخاص بها من خلال تطابقها مع المعطيات الفيزيائية النظرية.

**النتائج والمناقشة:****النتائج التجريبية:**

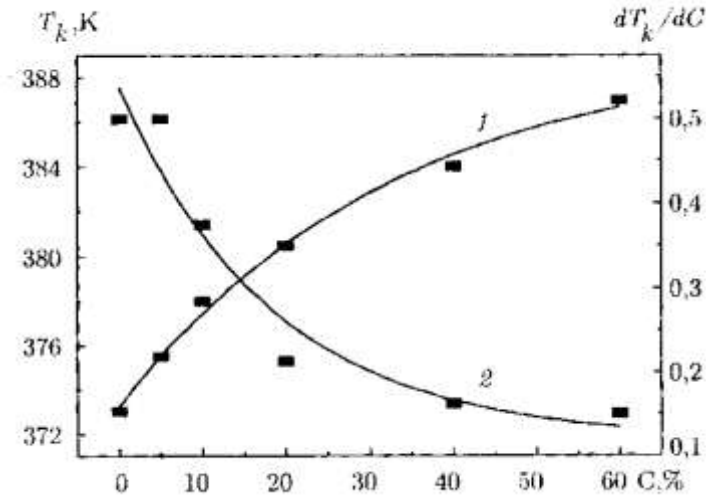
درست آلية تبخّر قطرات المحلول المائي لكربونات البوتاسيوم بطريقة إدخال قطرة معلّقة على مزوجة حرارية في اللهب الهيدروكربوني (بروبان - بوتان) [3]، حُدّدت درجة حرارة القطرة واللهب بواسطة المزوجة الحرارية (ولفرام - رنيوم) قطر الربط بينهما  $0.2 \text{ mm}$ ، كانت درجة الحرارة في مكان إدخال القطرة  $1380 \pm 20 \text{ K}$ . صُوّرت القطرات المتبخّرة بكاميرا سينمائية سرعة صورها 8-10 صور في الثانية، والتي سمحت بتحديد قطر القطرة بتابعية الزمن، حيث استُخدمت خلال التجربة قطرات قطرها (2-4 mm). تراوح التركيز المدروس من 5% إلى 60% لمحاليل  $\text{K}_2\text{CO}_3$ .

خلال عملية تسخين هذه القطرات، حيث درجة حرارة وسط التسخين أكبر بكثير من درجة حرارة غليان الماء، وسرعة تيار نواتج الاحتراق بالمقارنة مع سرعة تبخّر القطرات ليست كبيرة نسبياً، (الناقلية الحرارية الجزيئية تفوق التبادل الحراري بالحمل)، وبالتالي يجب إدخال نظام التبخّر اللامستقرّ والمناسب للتبادل الكتلي والحراري بين الطورين (سائل - غاز).

يبين الشكل (1) التابعية النموذجية لمربع قطر قطرات المحلول ذات التركيز 5% للمحلول المائي لكربونات البوتاسيوم  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (المنحني 1) ودرجة حرارتها، (المنحني 2) لزمن وجود القطرة في اللهب. كما هو واضح يمكن تقسيم عملية التبخّر إلى أربع مراحل أساسية.



الشكل (1) كيفية تغير القطر (المنحني 1) ودرجة الحرارة (المنحني 2) لقطرات محلول كربونات البوتاسيوم في اللهب الهيدروكربوني بدلالة الزمن .



الشكل (2) درجات حرارة الغليان (المنحني 1) ومشتقها (المنحني 2) بتابعة تركيز كربونات البوتاسيوم في قطرات المحلول.

في المرحلة الأولى تستمر عملية تسخين القطرات دون تغير ملحوظ في أبعادها حتى درجة حرارة غليان المحلول. مدة هذه المرحلة عملياً غير تابعة لكثافة المحلول، ولكن تتزايد مع تزايد أقطار القطرات، فمثلاً من أجل القطرات التي قطرها  $d \cong 3.5mm$  تستمر المرحلة الأولى لمدة  $t_1 = 1.5 \text{ sec}$  وتعرف هذه المرحلة بمرحلة القصور الذاتي لتسخين القطرات.

المرحلة الثانية تبين أن تغيرات مربع القطر بدلالة الزمن  $d^2(t)$  خطية وفق قانون سريزنيفسكي:

$$d^2(t) = d_0^2 - k_0 t \quad (1)$$

حيث  $d_0$  - القطر الابتدائي للقطرة ؛  $k_0$  - ثابت التبخر.

تتزايد درجة حرارة القطرات ببطء، حيث تفوق قليلاً درجة حرارة الغليان للماء النقي. ومدّة هذه المرحلة تابعة خطياً لتركيز المحلول (C%) وفق العلاقة الناتجة عن دراسة ومعالجة المعطيات التجريبية:

$$t_2 (\text{sec}) = (7.10 \pm 0.07) - (0.0105 \pm 0.005)(C\%), \text{sec} \quad (2)$$

تجري في هذه المرحلة عملية تبخر القطرة، لذلك استخدمت التابعية  $d^2(t)$  لتحديد سرعة التبخر في حالة التركيزات المختلفة للمحلول. تبين أنّ المقدار  $\frac{ds}{dt} = -\pi k_0$  (حيث S - مساحة سطح القطرات) يتناقص ببطء مع تزايد التركيز في مجال التركيزات المدروسة للمحاليل. إلا أنه ضمن حدود أخطاء قياس سرعة التبخر يمكن اعتبار قيمة الثابت مساوية  $(4.5 \pm 0.5) \text{ mm}^2/\text{sec}$ .

في المرحلة الثالثة تتوافق عملية التبخر بتغيرات نبضية حادة لأبعاد القطرات. وُجد أنّ مدّة المرحلة النبضية لدى دراسة نتائج سلسلة من التجارب تتزايد خطياً مع ازدياد تركيز المحلول.

$$t_n (\text{sec}) = (0.34 \pm 0.01) - (3.8 \pm 0.04) \cdot 10^{-3} (C\%), \text{sec} \quad (3)$$

وتجدر الإشارة إلى أنّه في حدود الأخطاء التجريبية تكون تابعة النسبة بين القطرين الأعظمي والأصغري للقطرات في المرحلة النبضية لتركيز المحلول ضعيفة ويكون المقدار  $\frac{d_{\max}}{d_{\min}} = 1.4 \pm 0.2$ . عند ذلك يمكن أن يتغير حجم القطرات من 2 - 4 مرات. تستمرّ درجة حرارة القطرات بالتزايد ببطء، ثمّ فجأةً تتزايد إلى درجة حرارة تفوق درجة حرارة تفكك  $\text{K}_2\text{CO}_3$  والتي تساوي 1164 K. تظهر ما بين المرحلتين الثالثة والرابعة للعملية بقايا بيضاء للمادة المنحلة. أثناء المرحلة الرابعة من عملية التبخر يتناقص قطر القطرات بشكل مضطرب حتى التبخر الكامل للمواد المضافة. وبشكل مشابه لما ذُكر سابقاً تبدو تابعة  $d^2(t)$  و  $T(t)$  من أجل قطرات المحاليل الأكثر تركيزاً، أحياناً تعاني الخصائص الكمية من تغيرات محدّدة. يبيّن الشكل (2) منحنى  $T_k$  بدلالة تركيز المحلول (منحني 1) والمقدار  $\frac{dT_k}{dT_c}$  عند القيم المختلفة لتركيز محلول القطرات (منحني 2). حيث يلاحظ ارتفاع درجة حرارة غليان المحلول مع تزايد تركيزه. كما ينتج من المنحنيات أنّ درجة حرارة الغليان لمحلول كربونات البوتاسيوم  $\text{K}_2\text{CO}_3$  بتركيز 5% يتزايد من 375 K حتى القيمة 386 K من أجل القطرات بتركيز 60% لمحلول  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . عند ذلك تتخذ تابعة درجة الحرارة للتركيز بشكل واضح الطابع غير الخطي، كما يوضّح المنحني 2 (الشكل 2).

من الجدير بالذكر أيضاً أنّ بعض الارتفاع لدرجة حرارة القطرات على مدى المرحلتين الثانية والثالثة للعملية يُلاحظ خصوصاً من أجل قطرات المحاليل الأقلّ تركيزاً.

#### مناقشة النتائج :

أجري تحليل النتائج التجريبية في جوار الغشاء (film) المتشكّل كغلاف للقطرات أثناء التبخر الذي اختيرت سماكته حيث حصل على الشدّة الحقيقية للنقل الحراري و الحمل الحراري. عند ذلك يُفترض أنّ آلية النقل الحراري و الحمل الحراري ضمن حدود الأغشية تُعتبر جزئية [4]. إنّ سماكة الأغشية المدروسة  $\delta$  تتعلّق بعدد نوسيلت (Nu) ويقطر القطرات وفق العلاقة:

$$\delta = d / Nu \quad (4)$$

يرتبط عدد نوسيلت بعدد رينولس (Re) عند تحرك الفقاعات في تيار غازي وفق علاقة سوكولسكي [4]:

$$Nu = 2(1 + 0.08 \cdot Re^{2/3}) \quad (5)$$

و تبيّن التقديرات ضمن ظروف النتائج التجريبية المدروسة أنه يمكن اعتبار  $Nu = 2$  ، ولذلك تُفترض سماكة الغشاء المدروس مساوية نصف قطر القطرات  $r_0$  ، وبالتالي يكون قطرها الخارجي  $r_f = 2r_0$  . لتوضيح مدى توافق التقريب المفترض مع المعطيات التجريبية، يقدّر قطر الغشاء باستخدام القيمة القابلة للقياس  $ds/dt$  باعتبار أنه في جوار القطرات يكون بخار الماء مشبعاً، وعلى السطح الخارجي للغشاء تكون كثافة البخار مساوية الصفر. كذلك يفرض أنّ القطر الخارجي للغشاء يساوي  $r_f = \alpha r_0$  ، حيث  $\alpha$  - عدد التماثل. نحصل عندئذ في إطار التقريب المعتمد [4]:

$$\frac{ds}{dt} = 8\pi D \frac{\alpha Psa}{(\alpha - 1)Pso} \quad (6)$$

حيث:  $Psa$  - كثافة البخار المشبع (saturated) عند الضغط الجوي النظامي؛  $Pso$  - كثافة المحلول (solution)؛  $D$  - عامل الانتشار للبخار، الذي حدّد عند درجة حرارة اللهب. استخدمت العلاقة (6) من أجل تحديد قيمة  $\alpha$  بنتيجة قياس سرعة التبخّر. حيث بيّنت الحسابات أنّ  $\alpha = 1.9 \pm 0.2$  أي أنّ التقريب المستخدم في الأغشية محقّق تماماً. لاحقاً سنعتبر  $\alpha$  مساوية 2. يفرض أنه في المرحلة الثانية من عملية التبخّر يتمّ تبخّر الماء ، عندئذ يجب أن لا يؤثر تركيز المحلول على كمية حرارة تبخّر الماء من قطرات المحلول، و يمكن التحقّق من ذلك بمعالجة النتائج التجريبية وتحديد كمية الحرارة النوعية لتشكّل البخار. من أجل ذلك للأغشية المذكورة تمت دراسة التبادل الحراري للقطرات مع اللهب الذي يؤمن السرعة اللازمة للتبخّر. و ذلك انطلاقاً من حالة التوازن الطاقوي ويفرض التماثل الكروي للقطرات حيث تعطى العلاقة بين الحرارة النوعية لتشكّل البخار ووسائط الجملة [5]:

$$q = \frac{32\pi^2 \lambda \alpha (T_f - T_0)}{p_{so} (\alpha - 1) ds / dt} \quad (7)$$

حيث  $\lambda$  - المعامل الفعّال للناقلية الحرارية؛  $T_f$  - درجة حرارة اللهب (flame). يدخل في العلاقة (7) قيمة غير معرّفة  $\lambda$  ، والتي يمكن أن تحدّد باستخدام نتائج دراسة مرحلة القصور الذاتي لتسخين القطرات (المرحلة الأولى) بحلّ معادلة التوازن الحراري من أجل كرة بدرجة حرارة ابتدائية  $T_0$  ونصف قطر  $r_0$  ، والموضوعة في درجة حرارة  $T_f$  ، ممّا يسمح وفق النتائج التجريبية إيجاد قيمة  $\lambda$  [5]:

$$\lambda = \frac{Cr_0^2 (\alpha - 1)(T_K - T_0)}{3\alpha t_1 (T_f - T_K)} \quad (8)$$

حيث  $C$  - السعة الحرارية النوعية للمحلول، و حيث اعتمدت و بشكل مقبول القيمة الموافقة للماء النقي؛  $t_1$  - زمن القصور الذاتي للتسخين. تبيّن أنّ قيمة المعامل الفعّال للناقلية الحرارية المحدّد باستخدام المعطيات التجريبية تساوي  $\lambda = (0.21 \pm 0.08) W / \min K$  ، بتعويض هذه القيمة وكذلك القيم التجريبية لـ  $\alpha$  ،  $T_f$  ،  $T_K$  ، في العلاقة (7) نجد أنّ السعة الحرارية النوعية لتشكّل البخار في المجال المدروس لتركيز المحلول مساوية  $q = (2.4 \pm 1.2) \cdot 10^6 J / kg$  والتي ضمن حدود الخطأ تتوافق مع المعطيات النظرية من

أجل الماء  $q = 2.27 \cdot 10^6 J/kg$  . يمكن إذن اعتماد القيمة المحددة تجريبياً للسعة الحرارية النوعية لتشكّل البخار أثناء تبخّر قطرات المحلول موافقة للقيم المعروفة من أجل الماء.

ما سبق يدلّ على أنه أثناء تبخّر محلول كربونات الكالسيوم  $K_2CO_3$  يتبخّر الماء في المراحل الأولى مع جزء يسير نسبياً من المادة المنحلة الأمر الذي يستمر خلال المرحلة الثانية لعملية التبخر. بعد المرحلة الثانية يبدأ النظام النبضي لتبخّر القطرة، وبعبارة أخرى بمرور الزمن تصبح عملية التبخر غير مستقرة. إنّ عدم الاستقرار الملاحظ يحمل طابع التغيّر الحادّ، أي أنّ أبعاد القطرات تكبر، ثمّ تعود بسرعة محدودة إلى قيمتها السابقة ودورياً تتكرّر العملية مع استمرار عملية التبخر حتى تدخل مرحلة أكثر استقراراً وهي التناقص المضطرد لحجم القطرة في المرحلة الرابعة.

واضح أنّ تبخّر الماء من سطح القطرات يؤدي إلى تزايد تركيز كربونات البوتاسيوم وبالتالي ترتفع درجة حرارة الغليان بالقرب من السطح وهذا يقود إلى ظهور تناقص في تركيز كربونات البوتاسيوم باتجاه المناطق الداخلية للقطرات، والتي يتبيّن فيها أنّ درجة حرارة غليان المحلول أقلّ ممّا هي على الطبقات السطحية ممّا يؤدي إلى ظهور تيارات حمل حرارية تؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة المناطق المركزية في القطرات وتتجاوز قيمتها بالنسبة لدرجة حرارة غليان التركيز المعطى. من البديهي الافتراض أنّ مثل هذا الإفراط في تسخين المناطق الداخلية للقطرات يمكن أن يؤدي إلى تشكّل فقاعات بخارية.

من ناحية أخرى ازدياد تركيز  $K_2CO_3$  على الطبقة السطحية يؤدي إلى ظهور تيارات حمل قطرية كتلية منجّهة إلى المناطق الداخلية للقطرات، إلا أنّ انتشار  $K_2CO_3$  في السائل ليس فعالاً كفاية، مما يسمح بإهماله ذلك أن الزمن المميّز للانتشار داخل القطرة هو  $\tau \approx r^2/D$  ، فمن أجل الجزيئات ذات نصف القطر  $r \approx 1mm$  وباستخدام القيمة النموذجية [2] لمعامل الانتشار  $D \approx (2-3) \cdot 10^{-3} mm^2/sec$  معطاة بالمقدار  $300-500sec$  لنحسب الآن انخفاض درجة الحرارة  $\Delta T$  بين درجتي حرارة الطبقة السطحية والمنطقة الداخلية للقطرات، الذي يستطيع تأمين تبخّر الكمية اللازمة من السائل كي تتشكّل فقاعات مليئة بالبخار بحجم مساوٍ للحجم الابتدائي للقطرة  $r_0$  خلال الزمن  $\Delta t \approx 1sec$  (الزمن مرتبة الدور النبضي). كمية الحرارة اللازمة لتبخّر محلول كتلته  $m_n$  تُحدّد بالعلاقة:

$$q = \frac{4\pi r_0 \lambda \cdot \Delta T}{m_n} \quad (9)$$

بافتراض أنّ البخار غاز مثالي نحصل على العلاقة:

$$\Delta T = \frac{q P_r \mu r_0^2}{3RT\lambda} \quad (10)$$

حيث  $P_r$  - ضغط البخار؛  $\mu$  - الكتلة المولية؛  $R$  - الثابتة العامة للغازات.

بالتعويض في العلاقة (10) بالقيم الملائمة نحصل على  $\Delta T \approx 1K$  أما القيمة اللازمة لتغيّر التركيز  $\Delta C$

فتحسب من العلاقة التالية:

$$\Delta T \approx \Delta C \frac{dT_k}{dc} \approx 1 \quad (11)$$

بيّنت معالجة النتائج التجريبية (الشكل 2. الخط المنحني 2)، أنّ درجة الحرارة الناتجة للتركيز تُحسب وفق

الصيغة:

$$\frac{dT_k}{dc} = 0.12 + 0.42 \exp\left(-\frac{c}{18.5}\right) \quad (12)$$

حيث أنّ التركيز يُقاس بنسبة مئوية.

تسمح العلاقاتان (11) و(12) بتقدير القيمة  $\Delta C$  من أجل التراكيز المختلفة للمحلول. نتائج التقدير مبيّنة في الجدول (1)، الذي يوضّح أنّه بتزايد تركيز المحلول من أجل الانتقال إلى النظام النبضي للتبخّر من الضروري ازدياد تغيّر التركيز  $\Delta C$ . ولكن تزايد  $\Delta C$  يجب أن يتمّ خلال زمن حدوث المرحلة الثانية  $t_2$ . بافتراض تزايد التركيز يتناسب طردياً مع تركيز المحلول، نحصل على:

$$dC = C \frac{dt}{\tau} \quad (13)$$

حيث  $\tau$  - الزمن اللازم لازدياد التركيز على الطبقة السطحية ومنه:

$$\Delta C = C_0 \left( \exp\left(\frac{t_2}{\tau}\right) - 1 \right) \quad (14)$$

سمحت النتائج التجريبية بتحديد قيمة  $\tau$ ، فمن أجل قيم التركيز ضمن المجال  $C = (5-40)\%$  فإن  $\tau = (18 \pm 4) \text{ sec}$ .

نشير مرّة أخرى إلى أنّ الزمن المميّز للانتشار هو من مرتبة القيم التي تتجاوز الزمن المميّز  $\tau$ ، هذا يعني أنّ انتقال الكتلة في قطرات المحلول ليست مسؤولة عنه أو تسببه عمليات الانتشار فقط. لشرح هذه النتيجة من الضروري إجراء بحث خاص بذلك، أو دراسة خاصّة بذلك.

لنناقش بعض الجوانب الأخرى لجليان قطرات المحلول (المرحلة الثالثة) التي تؤدي إلى النظام النبضي. من الضروري لتشكّل الفقاعات أن يكون ضغط البخار فيها يفوق الضغط الجوي  $P_a$  إضافة لضغط لابلاس، هذا الشرط يمكن أن يُصاغ بالشكل [2]:

$$P_a \leq P_s \exp\left(\frac{2\sigma\mu}{r_b \rho_v N_a K T_k}\right) = P_{in} \quad (15)$$

حيث  $P_a$  - الضغط الجوي؛  $\sigma$  - معامل التوتر السطحي للماء؛  $P_s$  - ضغط البخار على سطح الفقاعة عند درجة الحرارة  $T_k$ ،  $P_{in}$  - ضغط البخار داخل الفقاعة عند  $T_k$ ؛  $\rho_v$  - كثافة البخار (vapour). الحدّ الثاني من الجداء في الطرف الأيمن من المترابحة (15) يأخذ بالاعتبار تأثير انحناء سطح الفقاعة (bubble) مع نصف القطر  $r_b$  على ضغط البخار المشبع فيه، من السهل التأكّد أن  $P_{in}$  يتزايد بتزايد  $r_b$ ، وعند قيمة محدّدة لـ  $r_b$  مساوية لنصف القطر الحرج  $r_{cr}$  (critical) تتحقّق المترابحة (15).

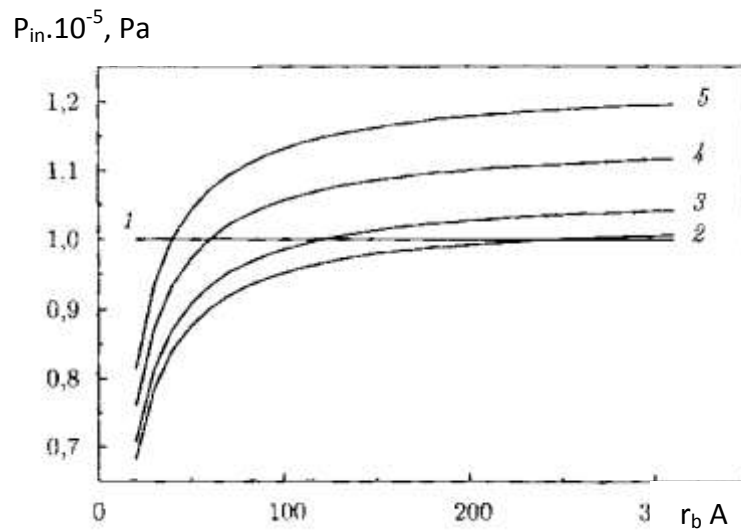
للتوضيح بيّن الشكل (3) المنحنيات البيانية للضغط  $\rho_{in}$  بدلالة نصف قطر الفقاعة  $r_b$  عند درجات حرارة مختلفة للمحلول  $T_v$  ضمن مجال تشكّل فقاعات البخار (المنحنيات 2 - عند  $T_v = 375K$ ؛ 3 -  $T_v = 376K$ ؛  $-4T_v = 379K$ ؛  $-5T_v = 384K$ ). إن الحسابات التي أُجريت على محلول كربونات الكالسيوم ذي التركيز 5%. كما هو واضح من الرسم، المنحنيات من 2 حتى 5 تتقاطع مع المنحني 1 الذي يعطي مستوى الضغط الجوي.

تحدّد نقطة تقاطع المنحنيات نصف القطر الحرج  $r_{cr}$ ، الذي يلعب دور النقطة الحرجة: عند  $r_b < r_{cr}$  تتشكّل الفقاعة وعندما  $r_b$  يتجاوز  $r_{cr}$  يجب أن تنفجر الفقاعة، حيث تصبح عملية نموّها لعاكوسة، إضافة لذلك كلّما كانت درجة الحرارة  $T_v$  أعلى يكون نصف القطر الحرج  $r_{cr}$  أقلّ. وبهذا الشكل فإنّ  $r_{cr}$  تابعة لـ  $T_v$  وفقاً لازدياد قيمتها بالمقارنة مع درجة جليان المحلول  $(\Delta T_v = T_v - T_k)$ .

الجدول (1)



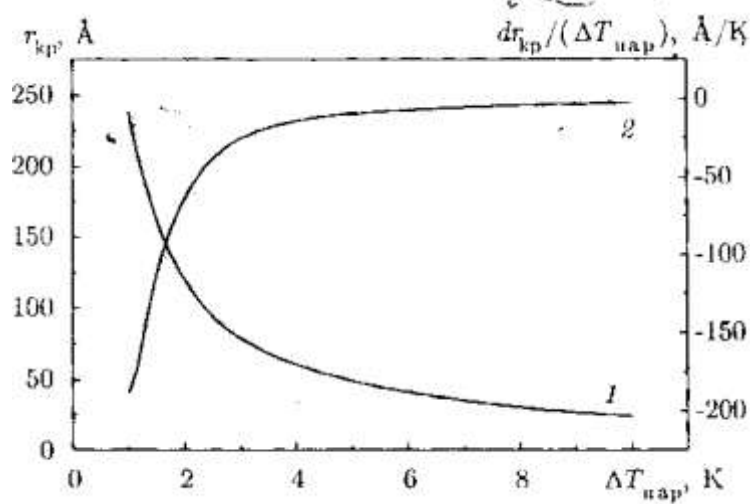
C %	5	10	20	40
$\Delta C$ %	2.3	2.7	3.8	5.9
$t_2$ , sec	6.6	6	4.9	2.9



الشكل (3) يمثل تغير ضغط البخار في الفقاعات بدلالة نصف قطرها عند درجات الحرارة المختلفة: المنحنيات 2 - عند  $T_v = 375K$  ؛ المنحني 1 يحدد مستوى الضغط الجوي. 3 -  $T_v = 376K$  ؛ 4 -  $T_v = 379K$  ؛ 5 -  $T_v = 384K$ . المنحني 1 يحدد مستوى الضغط الجوي.

$$r_{cr}, \text{Å}$$

$$dr_{cr} / (\Delta T_v) \text{ Å} / K$$



الشكل (4) يمثل تغيّر نصف القطر الحرج للفقاعة ومشتقه بالنسبة لـ  $\Delta T_v$  بدلالة المقدار  $\Delta T_v$ .

يبين الشكل (4) منحنى تغيّر  $r_{cr}$  بدلالة  $\Delta T_v$  (المنحني 1). كما هو واضح نصف قطر الفقاعة تابع ومتأثر جداً بالمقدار  $\Delta T_v$ . فمثلاً عند  $\Delta T_v = 1$  فإن نصف قطر الفقاعة  $200 \text{ \AA}$ ، وحتى عند  $\Delta T_v = 4^\circ C$  فإن  $r_{cr} = 50 \text{ \AA}$ . إلا أن الاستمرار بعملية تسخين المحلول سيؤدي إلى تغيّرات بسيطة على  $r_{cr}$  (الشكل 4، المنحني 2). وبهذا الشكل فإن تسخين المناطق الداخلية للقطرات لعدّة درجات مئوية يؤمّن غليان السائل. قيمة  $r_{cr}$  كبيرة بشكل كافٍ من أجل نشوء فقاعات متجانسة بنصف قطر  $r_b = r_{cr}$  وهناك احتمال كبير لتشكّل مراكز البخار غير متجانسة التوزيع بشكل نويات والذي بدوره يؤدي إلى تشكّل الفقاعة في تلك الناحية من قطرات المحلول، حيث نصف قطر تشكّل مراكز البخار تكون متناسبة مع القيمة المحددة لـ  $\Delta T_v$ .

وهكذا بيّنت التقديرات الواردة أعلاه أنه من الضروري لتشكّل الفقاعات تأمين الشروط التالية:

أولاً: يجب أن تكون درجة حرارة البخار  $T_v$  أكبر من درجة حرارة غليان المحلول على الأقلّ من درجة إلى ثلاث درجات مئوية وهذا يؤمّن شرط تشكّل الفقاعات عند قطر جنيني (embryonic) يقلّ عن  $(100-200) \text{ \AA}$ .

ثانياً: الفرق في درجة الحرارة بين الطبقة السطحية للقطرة والمناطق المركزية داخلها يجب ألا يقلّ عن درجة مئوية واحدة من أجل تأمين سريان التيار الحراري الذي عنده الدور النبضي لحجم القطرة يساوي ثانية واحدة (انظر العلاقة 10).

أخيراً يتحقّق النظام النبضي على حساب تدرّج تركيز المحلول أثناء تبخّر الماء من الطبقة السطحية للقطرة خلال المرحلة الثانية من عملية التبخّر.

#### الاستنتاجات والتوصيات:

تبيّن تجريبياً أنّ عدم استقرار عملية تبخّر قطرات المحلول المائي لكاربونات البوتاسيوم في اللهب الهيدروكربوني يُفسّر بتسخين سطح القطرات بالنسبة لمناطقها الداخلية على حساب تزايد تركيز المحلول في الطبقات السطحية خلال التبخّر النشط للماء. يترافق عدم الاستقرار بظهور النظام النبضي، الذي خلاله تتولّد فقاعات البخار داخل القطرات ويقود نموّ الفقاعات إلى تزايد حجم القطرات بشكل واضح ومن ثمّ خروج الفقاعة إلى السطح يؤدّي إلى تناقص حجمها. كما أنّ تزايد تركيز المحلول في الطبقات السطحية للقطرات يحصل بسبب تجاوز سرعة تبخّر الماء من سطحها لسرعة توازن تركيز كاربونات البوتاسيوم داخل القطرات.

### المراجع:

1. ZAKHARKO YO. A., MOSTENSKEE I. L., PINKHASKE M. S., CHERKAS V. L. *About the role of distribution of  $K_2CO_3$  during evaporation of a drop is done in high temperature gase stream* // Thermo physics of high temperature. . 13.Nº2. 1976,386-391.
2. DRAGAN G.S. *Ionisation balance displacement in gas phase of dust plasma* // Vth European Workshop on Dusty and Colloidal Plasmas. Germany. – Potsdam, 23-25 August, 2001. – 39.
3. DRAGAN G.C., SAAD A. M. *kinetic of afire and burn anthracite molecules, treatment with solutions of potassium* // workshop on Electro physics burn. Karaganda. – 1989- 97.
4. FRANK - KAMENSKEE D. A. *Diffusion and thermo conductance in chemical kinetics*- Moscow; Nauka, 1987. – 502.
5. LEKOV A. V, *theory of thermo - conductivity*. Moscow: high school, 1967, 600.

