

الفصل الثاني

التوتر السطحي

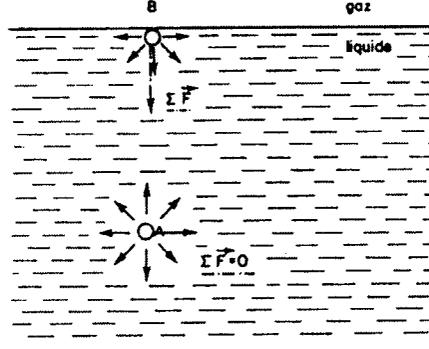
I - طبيعة ودور خافض التوتر السطحي الرئوي:

تتغذى الحويصلات الرئوية بطبقة رقيقة مائية من الداخل سماكتها حوالي 300 mm حيث يوجد سطح بيني ما بين الطور السائل المستقرب والطور الغازي (المزيج الحويصلي) مساحته $(80 - 100) m^2$ ويخضع عند كل دورة تنفسية لاتساع (عند الشهيق) يتبعه تقلص (عند الزفير) بسعة سطحية تقدر حوالي $10m^2$ وأن هذه العملية هي الوحيدة التي تستهلك كمية هامة من الطاقة (15000 جول في اليوم تقريباً). وبالإضافة لذلك يطبق السطح البيني سائل - غاز على الحويصلات قوى تسعى لتقليصها وأنه بمقدار ما تكون الحويصلات الرئوية صغيرة بمقدار ما يكون هذا التأثير كبيراً.

وبالتالي فالحويصلات الرئوية الصغيرة تفرغ في الحويصلات الكبيرة وأن دور المادة الفعالة توترياً هو الحد من استهلاك الطاقة التي يتطلبها توسع الحويصلات الرئوية واستقرار الصغيرة منها عند الزفير .

II - فيزياء السطوح البينية : سائل / غاز

1 - التوتر السطحي



الشكل 1

لنعتبر سطحاً بينياً سائل / غاز وجزأتين من السائل A و B واقعتين على التسلسل داخل السائل وفي جوار السطح البيني (الشكل 1) يطبق ما بين جزيئي السائل قوى تجاذب كهراكدية.

فبالنسبة للجزيء A تطبق هذه القوى في جميع المناحي وبالتالي محصلتها معدومة. أما بالنسبة للجزيء B فالمحصلة موجهة نحو الأسفل (يمكن اهمال التجاذب المطبق من جزيئات الغاز).

وكذلك بالنسبة لجميع الجزيئات السطحية التي تشكل غشاء رقيقاً يضغط على السائل وبغية زيادة السطح البيني بكمية S من الضروري التغلب على توتر الغشاء السطحي مما يستدعي ذلك استهلاك طاقة δW متناسبة مع δS كما يلي:

$$\delta W = \sigma \cdot \delta S$$

إن معامل التناسب σ دائماً موجب ويسمى التوتر السطحي ويعبر عنه في الجملة الدولية (بالجول/متر²)، أما في الجملة السغئية فيعبر عنه (بالأرغمة/سم²) وأن معامل التحويل هو:

$$1 \text{ joule} \cdot \text{m}^{-2} = 10^3 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2}$$

إن التوتر السطحي المميز لسطح بيني سائل/غاز مستقل عن طبيعة الغاز ولا يتعلق إلا بطبيعة السائل ودرجة الحرارة. وأن التوترات السطحية للسوائل المستقطبة أكبر من التوترات السطحية للسوائل غير المستقطبة بسبب كبر قوى الترابط ما بين جزيئاتها. وأنه عند درجة الحرارة 20°C نجد القيم التالية:

$$\sigma = 72,8 \text{ erg} \cdot \text{Cm}^{-2} \text{ الماء}$$

$$\sigma = 63 \text{ erg} \cdot \text{Cm}^{-2} \text{ غليسرو}$$

$$\sigma = 28,5 \text{ erg} \cdot \text{Cm}^{-2} \text{ بنزن}$$

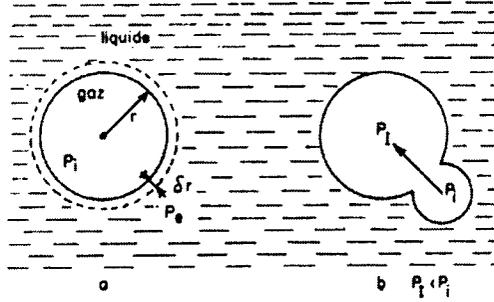
$$\sigma = 24 \text{ erg} \cdot \text{Cm}^{-2} \text{ كحول دهنية}$$

$$\sigma = 20 \text{ erg} \cdot \text{Cm}^{-2} \text{ فحوم مشبعة بالدهون}$$

عند ازدياد درجة الحرارة، فإن التهيج الحراري الذي يزداد يسعى لحجب تأثيرات قوى الترابط ما بين الجزيئات وينخفض التوتر السطحي وعند الدرجة 37°C تكون قيمة التوتر السطحي للماء $70 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2}$.

2 - الظواهر السطحية في الفقاعات الغازية:

يبين (الشكل 2) فقاعة غازية داخل سائل توتره السطحي σ



الشكل 2

تأخذ هذه الفقاعة عند التوازن شكلاً كروياً نصف قطره r يوافق حجماً داخلياً بسطح أصغري، وهذا بدوره يوافق طاقة سطحية صغرى للحملة فقاعة/سائل (متناسبة مع مساحة السطح البيني سائل/غاز وهذا يعني مساحة الفقاعة).

ليكن P_i الضغط السائد داخل الفقاعة، و P_e ضغط السائل عند مستوى الفقاعة مفترضين بأن نصف القطر r للفقاعة يزداد بكمية صغيرة δr وأن مساحة الفقاعة تزداد بمقدار $\delta S = 8\pi r \cdot \delta r$ وحجمها يزداد بمقدار

$$\delta V = 4\pi r^2 \cdot \delta r \quad (\text{تفاضل } S = 4\pi r^2 \text{ و } V = \frac{4}{3}\pi r^3)$$

وأثناء زيادة نصف القطر هذا فإن الطاقة الداخلية للحملة (سائل+فقاعة) تزداد بفعل اتساع السطح البيني بطاقة سطحية قدرها:

$$\sigma \cdot \delta S = 8\sigma\pi r \cdot \delta r$$

- تنخفض بفعل تمدد غاز الفقاعة بطاقة قدرها:

$$(P_i - P_e)\delta V = (P_i - P_e)4\pi r^2\delta r$$

وعند التوازن تتساوى هاتين الكميتين أي:

$$8\sigma\pi r.\delta r = (P_i - P_e).4\pi r^2\delta r$$

$$(قانون لابلاس) \quad P_i - P_e = \frac{2\sigma}{r} \quad \text{ومنه}$$

أي يسود داخل فقاعة الغاز فرق ضغط $P_i - P_e$ يتناسب مع σ وأنه كلما كان نصف قطر الفقاعة صغيراً كلما كان فرق الضغط كبيراً؛ لذا عند تلامس فقاعتين أنصاف أقطارها r و R , فإنهما تندجان والصغيرة (حيث يسود ضغط $(P_i = P_e + \frac{2\sigma}{r})$ تنفرغ في الكبيرة (حيث يسود ضغط أصغر $(P_i' = P_e + \frac{2\sigma}{R})$).

3 - الطبقات السطحية أحادية الجزيئات:

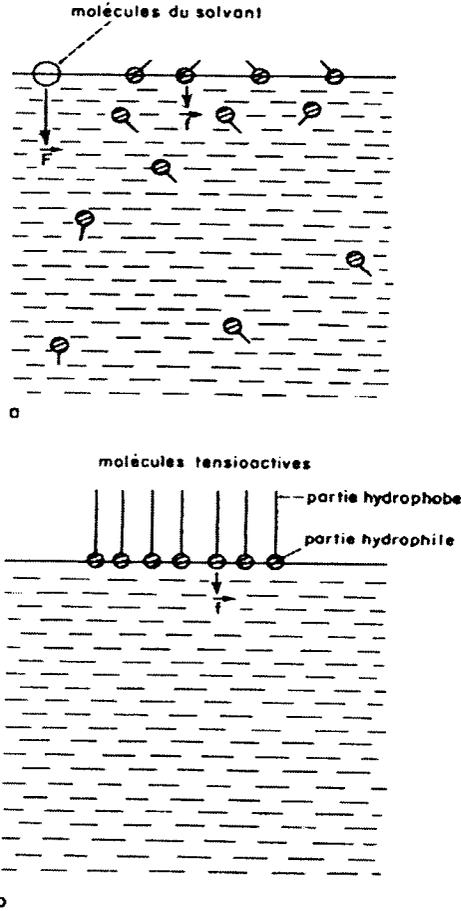
تتكون هذه الطبقات بالانتشار على سطح السائل من طبقة أحادية الجزيء لبعض المواد. ويمكن الحصول على طبقات جزيئية بطريقتين.

a - طبقات الامتزاز:

إذا أذبنا في (الماء مثلاً) جسماً قابلاً للذوبان، بحيث تكون قوى الترابط ما بين جزيئات المذيب والمذاب أصغر بكثير من قوى تجاذب جزيئات المذيب نفسها. وينتج عن ذلك ظاهرتان:

- تجمع لجزيئات المذاب على السطح أو في جواره المباشر (الشكل 3a) توافق طاقة صغيرة للحملة، فنقول بأنه يوجد امتزاز إيجابي للمذاب.

- جذب نحو الأسفل لجزيئات المذاب الممتزة على السطح أصغر بكثير من الجذب المطبق على جزيئات المذيب التي تشغل المكان نفسه. ولهذا ينتج توتر سطحي للمزيج مذيب - مذاب أصغر من التوتر السطحي للمذيب النقي. فنقول بأن المذاب هو جسم فعال توترياً.



(الشكل 3)

وكمثال على طبقة الامتزاز الحموض الدهنية المشبعة بـ C_4 حتى C_{12} في محلول مائي.

b - طبقات الانتشار:

إذا وضعنا على سطح الماء مادة غير قابلة للذوبان في العمق، لكنها تمتلك ألفة كافية للماء لتستطيع الانتشار على السطح، فنحصل على طبقة انتشار (الشكل 3b) وينتج عن ذلك انخفاض في التوتر السطحي. ونستطيع على سبيل المثال صناعة طبقات انتشار بحموض دهنية مشبعة غير قابلة للذوبان في العمق (من C_{13} وحتى C_{16}) أو بفوسفوليبيدات وأنه في جميع الحالات فالجزيئات التي تحقق الطبقات السطحية (امتزاز أو انتشار) تكون متميزة بوجود جزأين ألفتها للماء مختلفة.

- جزء محب للماء مكون من مجموعة مستقطبة (NH_2 و CH_2OH و $COOH$) تؤمن تثبيت الجزيء على سطح الماء.

- جزء كاره للماء على سبيل المثال سلسلة دهنية طويلة تجعل قابلية الذوبان أكثر ضعفاً كلما كانت السلسلة أطول. وغالباً ما تكون الجزيئات متوضعة على سطح الماء بحيث يدور الجزء المحب للماء نحو الماء والجزء الكاره للماء نحو الهواء (حالة الفوسفوليبيدات أو الحموض الدهنية، تتوضع الجزيئات عمودياً على السطح).

4 - قياس التوتر السطحي، الضغط السطحي:

يمثل (الشكل 4a) حوض لانكموير، فهو عريض ومسطح بحيث إن سطح السائل يلامس الأطراف، تنزلق عليه وبدون احتكاك مسطرة صغيرة غير قابلة

للتبلل طولها L تفصل من جهة طبقة سطحية (توتر سطحي σ) ومن الجهة الأخرى سطحاً مديباً نقيماً (توتر سطحي $\sigma_0 = 73 \text{erg.Cm}^{-2}$ في حالة الماء) وبما أن $\sigma < \sigma_0$ فالسطح البيني مديب/هواء يميل للانكماش بمقدار أكبر من السطح البيني طبقة سطحية/هواء وأن المسطرة الصغيرة تحافظ على توازنها بالقوة الخارجية F (القابلة للقياس بسهولة) لنفترض بأن المسطرة انزاحت بمقدار δx وفق اتجاه القوة F (الشكل 4b) وبالتالي فالطاقة التي تتلقاها الحملة (عمل القوة F و $F \cdot \delta x$) توافق تزايد طاقتها الحرة (التي تزداد بمقدار $\sigma \cdot L \cdot \delta x$ لتزايد السطح البيني طبقة سطحية/هواء) وعند التوازن يكون:

$$(F \cdot \delta x) + (\sigma L \cdot \delta x) - (\sigma_0 L \cdot \delta x) = 0$$

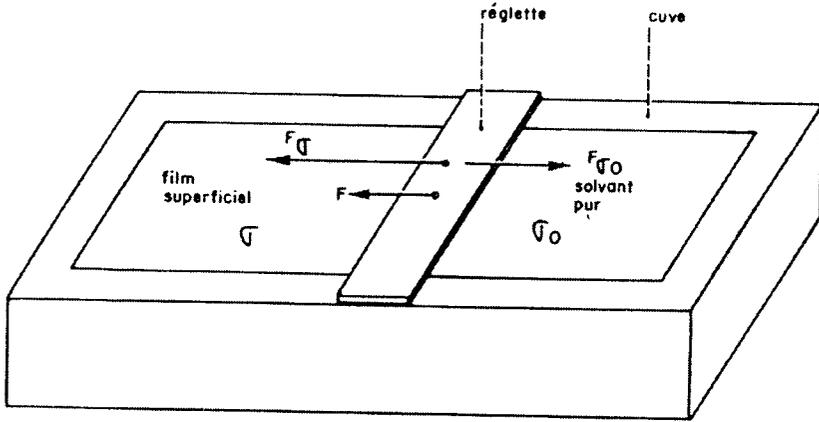
$$\sigma_0 - \sigma = \frac{F}{L} \quad \text{ومنه:}$$

وما يحدث هو كما لو أن الطبقة تطبق على المسطرة الصغيرة قوة

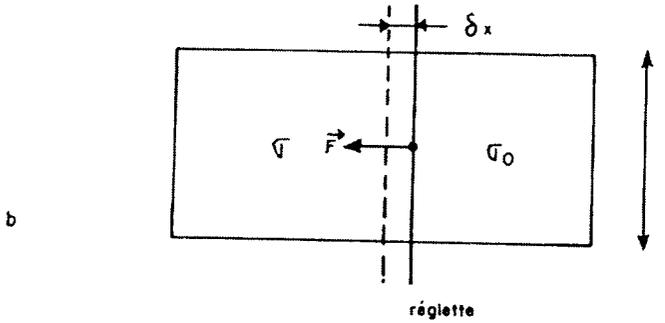
$$F = L(\sigma_0 - \sigma)$$

نطلق اسم ضغط سطحي على حاصل قسمة القوة على الطول أي:

$$P = \frac{F}{L}$$



a



b

الشكل 4

وأن الضغط السطحي P للطبقة الرقيقة يعطى بالعلاقة:

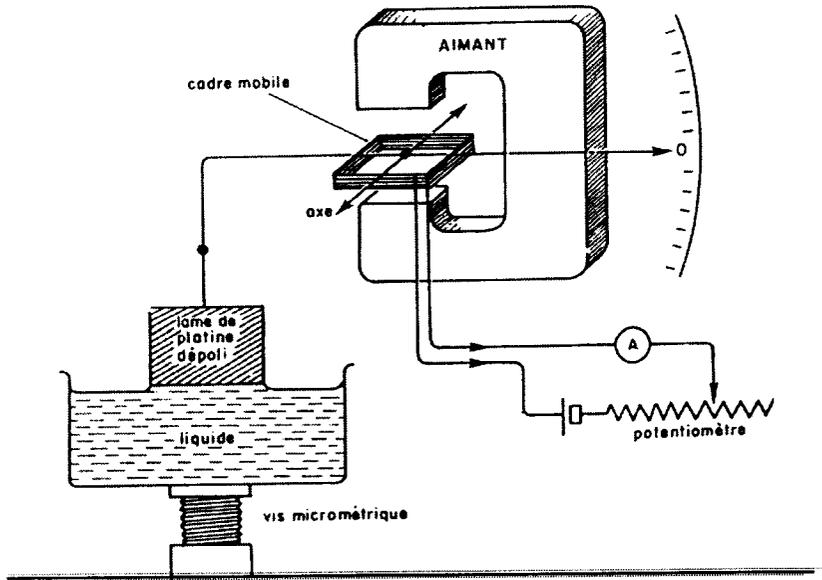
$$P = \sigma_0 - \sigma$$

وهذا يفسر سبب التعبير عن التوترات السطحية بواحدات الضغط dynes.Cm⁻¹

$$\text{أو } \left(\frac{\text{N}}{\text{m}} \right)$$

يسمح هذا الحوض بمعرفة σ بعد معرفة σ_0 وقياس F . وتغيره بتابعة درجة الحرارة أو بتابعة سطح الطبقة السطحية. كما أن قياس التوتر السطحي يقودنا إلى قياس القوة.

كما يوضح (الشكل 5) طريقة الطبقة المغمورة الأكثر استخداماً والتي تتركز على قياس القوة التي يطبقها السائل (حيث نريد قياس σ) على طبقة البلاتين النظيفة والخشنة والتي تلامس سطحها. فإذا كانت L طول الطبقة الرقيقة فإن: $F = 2L\sigma$



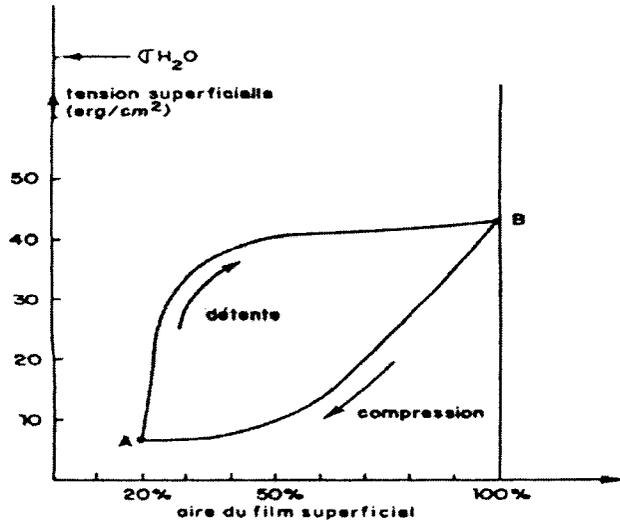
الشكل 5

إن هذه الطريقة دقيقة جداً (الدقة من مرتبة $0,005 \text{ dgnes.cm}^{-1}$ باستخدام ميزان كهروطيسي عالي الدقة) وسريعة وتسمح بتسجيل مستمر لتغيرات σ مع الزمن.

III - خواص الفعالية التوترية للمادة الخافضة توترياً:

تتصف المادة الخافضة توترياً بخاصتين، فهي تخفض بشكل واضح التوتر السطحي للماء والانضغاط الذي يتبع تمدد طبقة سطحية مادة خافضة توترياً فتظهر دورة بطاء للتوتر السطحي.

فإذا أعدنا التجربة الموصوفة سابقاً بأخذ طبقة سطحية مادة خافضة توترياً نستطيع متابعة تطور σ مع الزمن وذلك من خلال دورة انضغاط/تخلخل للطبقة (يتم الحصول على هذه الدورة بتحريك المسطرة) يوضح (الشكل 6) النتائج التي تم الحصول عليها للمادة الخافضة توترياً في الرئة.



الشكل 6

- عندما لا تكون الطبقة مضغوطة، ينخفض التوتر السطحي للماء بحوالي 60% من القيمة الطبيعية (أي حوالي 40 erg.cm^{-2}).

- يتسبب انضغاط الطبقة بانخفاض متتال لتوترها السطحي حتى قيمة حوالي (10erg cm^{-2}) .

- وبالعكس فإن التمدد يقود التوتر السطحي للطبقة إلى قيمته البدائية. وهكذا نحصل على دورة بطء (ظاهرة التمدد ليست متناظرة تماماً مع الانضغاط). ويتم الحصول على دورات البطء هذه في المختبر وأنه من الصعب تعميم خواص الفعالية التوتيرية للمادة الخافضة توترياً على الجسم الحي لأن سطح انتشارها وبنيتها في الجسم الحي لا تكون معروفة تماماً.

IV - الدور الفيزيولوجي للمادة الخافضة توترياً:

ماذا يصبح استهلاك الطاقة أثناء الشهيق عند غياب المادة الفعالة توترياً؟

إذا فرضنا أن التوتر السطحي (TS) بحدود $0,07\text{J.m}^{-2}$ (TS للماء عند 37°C)

فالطاقة الضرورية لزيادة السطح البيئي بمقدار 10m^2 هي:

$$0,07 \times 10 = 0,7\text{joule}$$

أي أن استهلاك الطاقة هو بحدود (0,7) جول لكل دورة أو حوالي (15000) جول في اليوم الواحد لتردد تنفسي قدره 15min^{-1} .

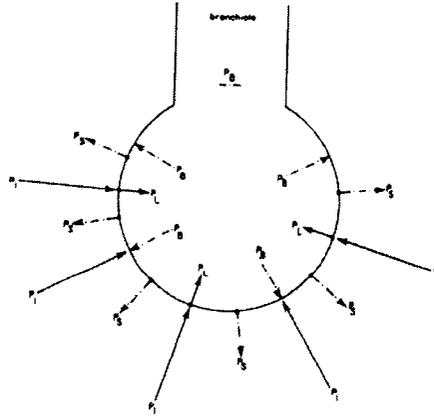
إن دور المادة الخافضة توترياً هو إنقاص استهلاك الطاقة إلى حوالي نصف

القيمة المحسوبة أعلاه. وإن الطاقة المستهلكة عند كل شهيق للتغلب على قوى التوتر السطحي تبقى بحدود $\frac{3}{4}$ مرة أكبر من الطاقة الضرورية للتغلب على نسيج الرئة

الإسفننجي (يتم الحصول على هذه النتيجة من قياس الطاقة الضرورية عند تمدد رئة طبيعية مملوءة بالهواء ومن ثم مقارنتها بالطاقة الضرورية لتمدد الرئة ذاتها المملوءة بالماء، وهذا يعني عدم وجود سطوح بينية سائل/غاز).

إن هذا الدور أساسي عند الولادة حيث إنه عند الصرخة الأولى تتولد جميع السطوح البينية الرئوية سائل/هواء.

يخضع جدار الحويصلات الرئوية (تمثلها بكرات ناقصة متصلة بقصبة اسطوانية) إلى أربعة ضغوط مختلفة (الشكل 7)



الشكل 7

- الضغط الجوي P_B داخل الحويصل.
- التوتر الذي يطبقه لبوس الكولاجين والايلاستين على جدار الحويصلات وهو انعكاس لحالة اتساع القفص الصدري.

إذا رمزنا F_S إلى القوة المرتبطة باللبوس والمطبقة على جزء من حويصل سطحه S

$$P_S = \frac{F_S}{S} \quad \text{فإن:}$$

يمثل الناتج عن القوة F_S وجهة هذا الضغط هي لخارج الحويصل الذي يميل

للافتتاح. أما الضغطين الباقيين فهما مطبقان باتجاه معاكس وهما:

- ضغط لابلاس P_L الناتج عن التوتر السطحي. فإذا كانت r نصف قطر الحويصل

فإن:

$$P_L = \frac{2\sigma}{r}$$

- الضغط البيئي P_I :

عندما يكون الحويصل متوازناً، تكون محصلة الضغوط الأربعة معدومة

$$P_B + P_S = P_L + P_I$$

وبما أن الحويصل ينتفخ ابتداءً من وضعية الفراغ الكامل (الشكل 8a)

(مفترضين بأن σ ثابتة) فإن ضغط لابلاس يمر من قمة عظمى P_L وذلك عندما

يكون نصف قطر الحويصل أصغرياً (الشكل 8c) وهذا يعني أنه يساوي r_b للقصة إذاً:

$$P_L = \frac{2\sigma}{r_b}$$

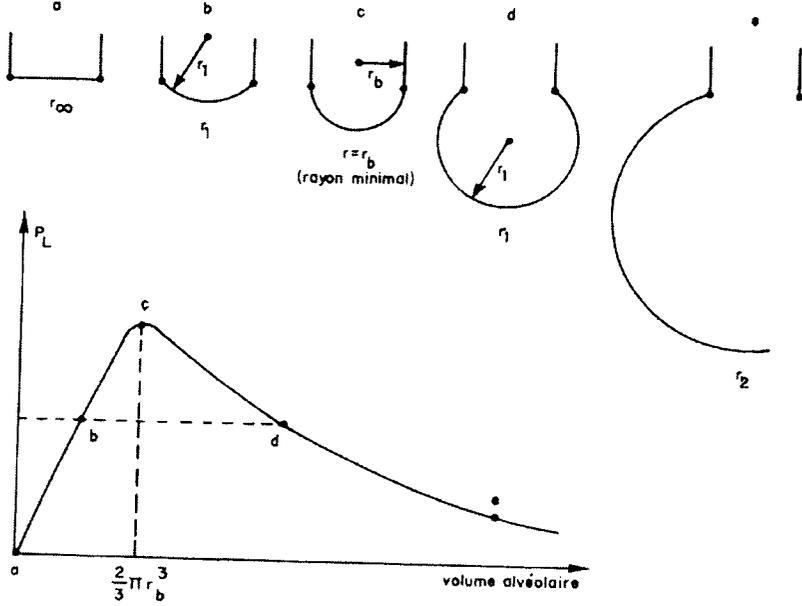
وبعد ذلك يزداد نصف القطر r فيتناقص P_L .

وعندما ننطلق من وضعية الفراغ فالحويصل لا ينفث إلا إذا تجاوز الضغط

المرتبط باللبوس P_S قيمة العتبة التي تساوي إلى:

$$P = P_L + P_I - P_B = \frac{2\sigma}{r_b} + P_I - P_B \quad \text{عتبة.}$$

وإن قيمة σ التي تؤخذ بعين الاعتبار هي القيمة العظمى (TS) للمادة الخافضة توترياً (النقطة B من الشكل 6) وإنه كلما كانت القصبة التي تخرج الحويصل صغيرة كلما كان ضغط العتبة كبيراً.



الشكل 8

في نهاية الزفير يكون للضغط P_S قيمة صغرى لكل حويصل. وبالتالي فإن في بداية الشهيق يزداد الضغط P_S تدريجياً بالنسبة لجميع الحويصلات التي بدورها ستنتفح وتمتلئ، بمرتبة من ضغط عتبة الانفتاح المتزايدة.

لقد رأينا سابقاً بأن المادة الخافضة توترياً، عند الشهيق، تخفض σ وبالتالي ينخفض ضغط عتبة الانفتاح.

أما في نهاية الشهيقي فتكون الحويصلات مفتوحة وإن طبقة المادة الخافضة توتريا تكون منبسطة وبالتالي فإن (TS) للطبقة يكون أعظمية (نقطة B من الشكل 6). كما أن الضغط P_s يكون أكبر في الحويصلات الصغيرة مما هو عليه في الحويصلات الكبيرة. وبما أن ضغط الغاز الحويصلي متجانس في الرئة فإن اللبوس الليفي المرن لنسيج الرئة الإسفنجي يعمل على استقرار الحويصلات الصغيرة ويمنعها من التفرغ في الكبيرة.

وإنه أثناء الزفير تنتج ظاهرة مماثلة لكن دورة البقاء للمادة الخافضة توتريا تحدث تأخرا في انغلاق الحويصلات الرئوية، وإن هذا الانغلاق يحدث من أجل ضغط P_s أقل بكثير من ضغط عتبة الانفتاح. وبالفعل عندما ينخفض P_s ينخفض نصف قطر الحويصل مما يتسبب بانضغاط طبقة المادة الخافضة توتريا فيحصل انخفاض في σ و P_L .

هكذا نرى بأن المادة الخافضة توتريا تؤخر انغلاق الحويصلات وأن تأثيرها يطبق بشكل أساسي على الحويصلات الصغيرة.

كما أن النقص بالمادة الخافضة توتريا كالذي نراه في بعض التطبيقات التنفسية للولادات الحديثة أو الشذوذات الوظيفية للمادة الخافضة توتريا (مرض الأغشية الشفافة) المتسببة بإضرابات التهوية المرتبطة بوهن الحويصلات.

مسائل غير محلولة

- احسب مقدار قوة الشد المطبقة على الأنبوبة والناشئة عن التوتر السطحي إذا علمت بأن التوتر السطحي هو $0,074 \text{ Nm}^{-1}$.
- أنبوبة زجاجية قطرها الخارجي 4cm وقطرها الداخلي 3,5cm تستقر شاقوليا وأحد طرفيها في الماء.
- احسب مقدار قوة الشد المطبقة على الأنبوبة والناشئة عن التوتر السطحي، إذا علمت بأن التوتر السطحي للماء هو $0,074 \text{ Nm}^{-1}$.
- سلك أفقي دائري قطره 8cm غمر في عينة زيت خام، فإذا كانت القوة الإضافية (نتيجة التوتر السطحي) واللازمة لشد السلك الدائري خارج السائل هي 0,0092 نيوتن احسب قيمة التوتر السطحي لهذا الزيت الخام.
- إذا كان التوتر السطحي لمحلول ماء الصابون $4 \cdot 10^{-2} \text{ Nm}^{-1}$ ما مقدار الزيادة في الضغط المنتشر داخل فقاعة الصابون التي نصف قطرها 0,05 متر.
- عند كل شهيق يزداد سطح الحويصلات الرئوية بمقدار 10 m^2 ما مقدار الطاقة الضرورية الموافقة لهذه الزيادة خلال 24 ساعة وعندما يكون تردد الشهيق هو 16 مرة في الدقيقة، وذلك عندما يكون الغشاء الحويصلي مغطى بماء نقي توتره السطحي $70 \cdot 10^{-3} \text{ J/m}^2$ وباستخدام الطاقة المحسوبة إلى أي ارتفاع نستطيع رفع كتلة مقدارها 1Kgr. وباستخدام نفس الطاقة ما هو مقدار الزمن الذي يعمل خلاله مصباح كهربائي استطاعته 10 واط.