الفصل الثاني

التوتر السطحي

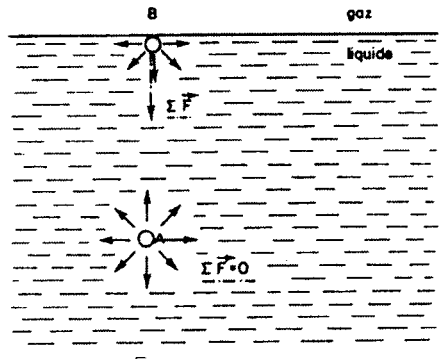
I – طبيعة ودور خافض التوتر السطحي الرئوي:

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

وبالتالي فالحويصلات الرئوية الصغيرة تتفرغ في الحويصلات الكبيرة وأن دور المادة الفعالة توترياً هو الحد من استهلاك الطاقة التي يتطلبها توســـع الحويصـــلات 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 وB واقعتين على التسلسل داخل السائل وفي جوار السطح البيني (الشكل 1) يطبق ما بين جزيئتي 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:

$$\delta W = \sigma . \delta S$$

إن معامل التناسب σ دائماً موجب ويسمى التوتر السطحي ويعبر عنـــه في الجملة الدولية (بالجول/متر^2)، أما في الجملة السغثية فيعبر عنه (بالأرغة/سـم^2) وأن معامل التحويل هو:

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

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

المـــــاء $\sigma = 72,8\ erg.Cm^{-2}$

غليسرول $\sigma = 63\ erg.Cm^{-2}$

بنـــــزن $\sigma = 28,5\ erg.Cm^{-2}$

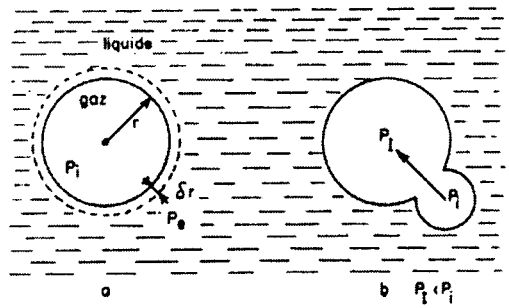
كحول دهنية $\sigma = 24\ erg.Cm^{-2}$

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

عند ازدياد درجة الحرارة، فإن التهيج الحراري الذي يزداد يســـعى لحجـــب تأثيرات قوى الترابط ما بين الجزيئات وينخفض التوتر السطحي وعند الدرجة $37\ ^0C$ تكون قيمة التوتر السطحي للماء$^{-2}$erg.cm 70.

2 – الظواهر السطحية في الفقاعات الغازية:

يبين (الشكل2) 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 للجملة فقاعة/سائل (متناسبة مع مساحة السطح البيني سائل/غاز وهذا يعني مساحة الفقاعة).

ليكن P_i الضغط السائد داخل الفقاعة، وP_e ضغط السائل عند مستوى الفقاعة مفترضين بأن نصف القطر r للفقاعة يزداد بكمية صغيرة δ r وأن مساحة الفقاعة تزداد بمقدار $\delta S \# 8\pi r.\delta r$ وحجمها يزداد بمقدار

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

وأثناء زيادة نصف القطر هذا فإن الطاقة الداخلية للجملة (سائل+فقاعة)

- تزداد بفعل اتساع السطح البيني بطاقة سطحية قدرها:

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

- 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:

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

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

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 , (R>r) فإنهما تندمجان والصغيرة (حيث يسود ضغط $P_i = P_e + \frac{2\sigma}{r}$) تتفرغ 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.

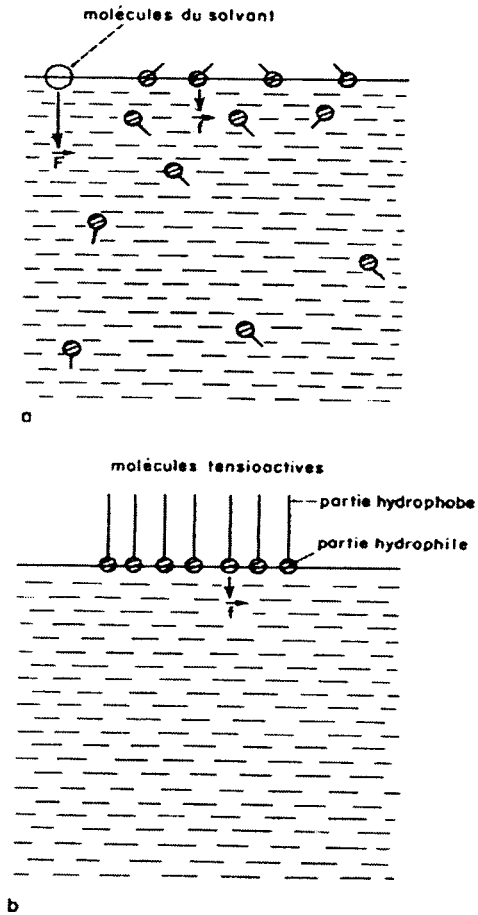
a - طبقات الامتزاز:

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 صغرى للجملة، 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 ــ 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 (الشكل3b) 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 ألفتهما للماء مختلفة.

- جزء محب للماء مكون من مجموعة مستقطبة (NH_2 وCH_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 (الشكل4a) حوض لانكمويز، 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 مذيباً نقياً .(توتر سطحي $\sigma_0 = 73erg.Cm^{-2}$ في حالة الماء) وبما أن $\sigma < \sigma_0$ فالسطح البيني مذيب/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 (الشكل4b) وبالتالي فالطاقة التي تتلقاها الجملة (عمل القوة F و $F.\delta x$) توافق تزايد طاقتها الحرة (التي تزداد بمقدار $\sigma.L.\delta x$ لتزايد السطح البيني طبقة سطحية/هواء) وعند التوازن يكون:

$$(F.\delta x) + (\sigma L.\delta x) - (\sigma_o L.\delta x) = o$$

ومنه:

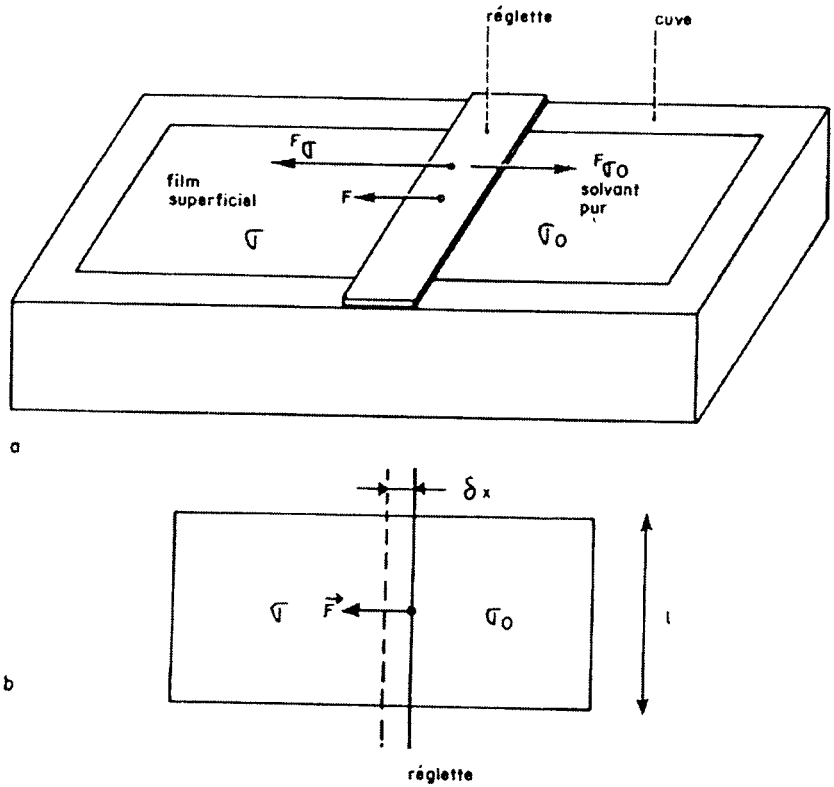
$$\sigma_0 - \sigma = \frac{F}{L}$$

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:

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



الشكل 4

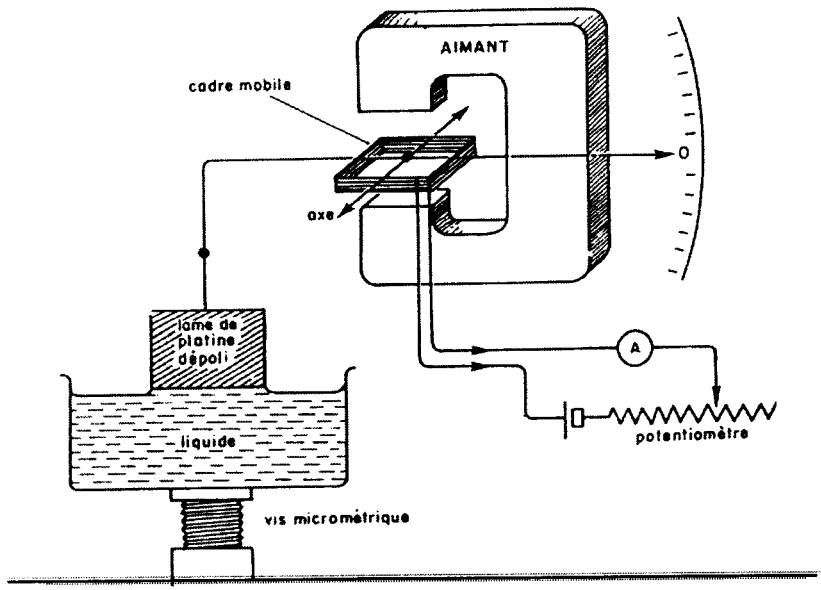
وأن الضغط السطحي P للطبقة الرقيقة يعطى بالعلاقة:

$$P = \sigma_o - \sigma$$

وهذا يفسر سبب التعبير عن التوترات السطحية بواحدات الضغط $dynes.Cm^{-1}$ أو $\left(\frac{N}{m}\right)$.

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

كما يوضح (الشكل5) طريقة الطبقة المغمورة الأكثر استخداماً والتي ترتكز 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: $F = 2L.\sigma$



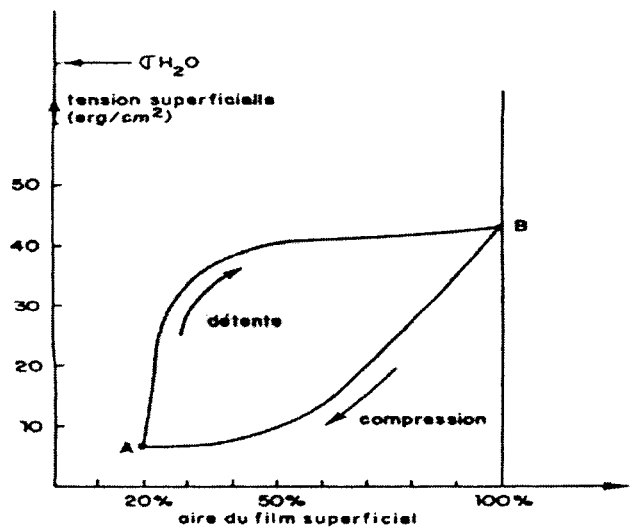
الشكل 5

إن هذه الطريقة دقيقة جداً (الدقة من مرتبة $0{,}005\ dgnes.cm^{-1}$ باستخدام ميزان كهرطيسي 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 لمادة خافضة توترياً فتظهر دورة بطاء للتوتر السطحي.

فإذا أعدنا التجربة الموصوفة سابقاً بأخذ طبقة سطحية لمادة خافضة توترياً نستطيع متابعة تطور σ مع الزمن وذلك من خلال دورة انضغاط/تخلخل للطبقة (يتم الحصول على هذه الدورة بتحريك المسطرة) يوضح (الشكل6) 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 متتالٍ لتوترها السطحي حتى قيمة حوالي $(10erg\ cm^{-2})$.

- وبالعكس فإن التمدد يقود التوتر السطحي للطبقة إلى قيمته البدائية.

وهكذا نحصل على دورة بطاء (ظاهرة التمدد ليست متناظرة تماماً مع الانضغاط).

ويتم الحصول على دورات البطاء هذه في المختبر وأنه من الصعب تعميم خواص الفعالية التوترية 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 $0,07J.m^{-2}$ (TS للماء عند $37\ ^0C$) فالطاقة الضرورية لزيادة السطح البيني بمقدار $10m^2$ هي:

$$0,07 \times 10 = 0,7 joule$$

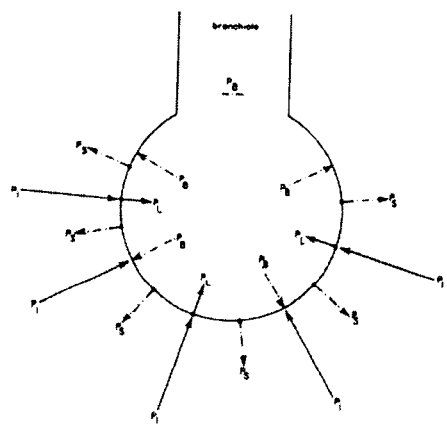
أي أن استهلاك الطاقة هو بحدود (0,7) جول لكل دورة أو حوالي (15000) جول في اليوم الواحد لتردد تنفسي قدره $15min^{-1}$.

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

الإسفنجي (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 (نمثلها بكرات ناقصة متصلة بقصبة اسطوانية) إلى أربعة ضغوط مختلفة (الشكل7)



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 فإن: $P_S = \frac{F_S}{S}$

يمثل الناتج عن القوة F_S وجهة هذا الضغط هي لخارج الحويصل الذي يميل للانفتاح. 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 البيني 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 (الشكل8c) وهذا يعني أنه يساوي r_b للقصبة إذاً:

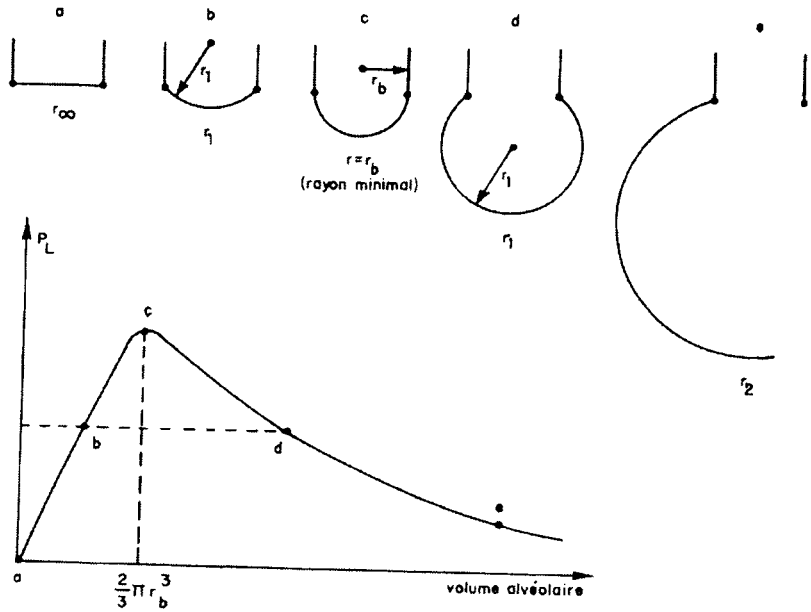
$$P_L = \frac{2\sigma}{r_b}$$

وبعد ذلك يزداد نصف القطر r فيتناقص P_L.

وعندما ننطلق من وضعية الفراغ فالحويصل لاينفتح إلا إذا تجاوز الضغط المرتبط باللبوس P_S قيمة العتبة التي تساوي إلى:

$P = P_L + P_I - P_B = \frac{2\sigma}{r_b} + P_I - P_B$ 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 ستنفتح 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 الشهيق فتكون الحويصلات مفتوحة وإن طبقة المـــادة الخافضـــة توتريا تكون منبسطة وبالتالي فإن (TS) للطبقة يكون أعظميا (نقطة B من الشكل6).

كما أن الضغط P_S يكون أكبر في الحويصلات الصغيرة ممـــا هـــو عليـــه في الحويصلات الكبيرة. وبما أن ضغط الغاز الحويصلي متجانس في الرئة فإن اللبـــوس الليفي المرن لنسيج الرئة الإسفنجي يعمل على استقرار الحويصلات الصغيرة ويمنعـها من التفرغ في الكبيرة.

وإنه أثناء الزفير تنتج ظاهرة مماثلة لكن دورة البطاء للمادة الخافضـــة توتريـــا تحدث تأخرا في انغلاق الحويصلات الرئوية، وإن هذا الانغلاق يحدث مـــن أجـــل ضغط P_S أقل بكثير من ضغط عتبة الانفتاح. وبالفعل عندما ينخفض P_S ينخفـــض نصف قطر الحويصل مما يتسبب بإنضغاط طبقة المادة الخافضـــة توتريـــا فيحصـــل انخفاض في σ و P_L.

هكذا نرى بأن المادة الخافضة توتريا تؤخر انغلاق الحويصلات وأن تأثيرهـــا 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 (مـــرض الأغشـــية الشفافة) المتسببة بإضرابات التهوية المرتبطة بوهن الحويصلات.

مسائل غير محلولة

- احسب مقدار قوة الشد المطبقة عل الأنبوبة والناشئة عن التوتر السطحي إذا علمت بأن التوتر السطحي هو $0,074\ Nm^{-1}$.
- 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 $0,074\ Nm^{-1}$.

- 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 $4.10^{-2}\ Nm^{-1}$ ما مقدار الزيادة في الضغط المنتشر داخل فقاعة الصابون التي نصف قطرها 0,05 متر.
- عند كل شهيق يزداد سطح الحويصلات الرئوية بمقدار $10m^2$ 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 $70.10^{-3}J/m^2$ 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.