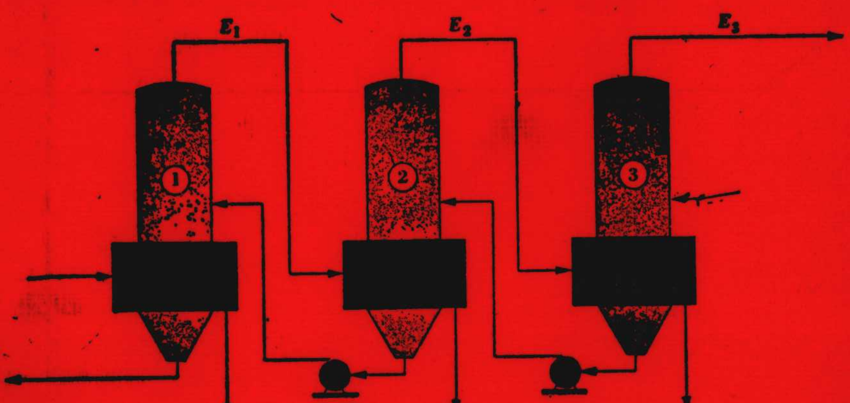
輸送現象問題詳解

(一九八一年修訂版)　上册

Bennett

Momentum Heat and Mass Transfer



曉園出版社

中華民國六十六年九月初　版
中華民國七　十年十月修訂版

輸送現象問題詳解

上冊定價：新台幣柒拾元整
下冊定價：新台幣柒拾元整

原著者：Bennett
譯著者：張　炎　林
發行人：黃　旭　政
發行所：曉　園　出　版　社
臺北市永康街12巷2-3號
電　話：(02)394-9931三線
郵　撥：一九四五三號
門市部：開　放　書　城
台北市重慶南路一段61號地下樓
電　話：三一四九五八〇
印刷所：遠　大　印　刷　廠
臺北市武成街36巷16弄15號

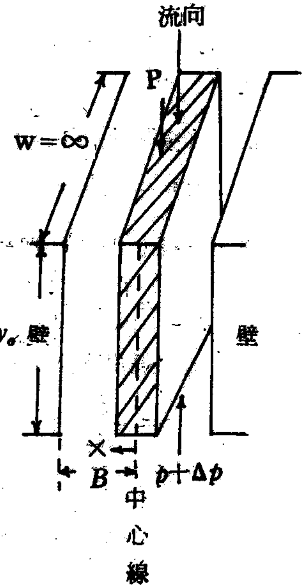
出版登記：局版台業字第1244號
著作執照：台內著字第　號

輸送現象問題詳解

（上冊目錄）

第二章　流體行爲簡介

2-1　試導出牛頓流體層流流經高 y_o，無限寬的狹縫時，其與方程式（2-14）和（2-15）類比的速度分佈和壓力降落的方程式爲何？



解：取距離中心線左右各爲 x 之基體（如圖示斜線體，厚爲 $2x$，寬爲 $\omega=\infty$，高爲 y_0）作力的平衡：

(1)壓力作用在上下兩面，即

$$P(2x\cdot w)-(P+\Delta P)(2x\cdot w)$$

(2)重力爲

$$(2x\cdot w\cdot y_o)\rho g/g_e$$

(3)基體兩面之切壓（shear stress）

$$-2(w\cdot y_o)\cdot\tau$$

在穩流（steady flow）下三者合力爲零

$$\therefore(-\Delta p)(2x\cdot w)+(2x\cdot w\cdot y_o)\rho g/g_e-2(w\cdot y_o)\tau=0$$

所以切壓爲：

$$\tau=\frac{(2x\cdot w)(-\Delta p)+(2x\cdot w\cdot y_o)\rho g/g_e}{2w\cdot y_o}$$

$$=\left[\frac{(-\Delta p)}{y_o}+\frac{\rho g}{g_e}\right]x\quad\cdots\cdots\cdots(1)$$

對牛頓流體爲：

$$\tau=\frac{\mu}{g_e}\left[-\frac{du}{dx}\right]=\left[\frac{(-\Delta p)}{y_o}+\frac{\rho g}{g_c}\right]x$$

移項整理：

$$\int_{u_{max}}^{u}du=\int_{0}^{x}-\frac{g_c}{\mu}\left[\frac{(-\Delta p)}{y_o}+\frac{\rho g}{g_c}\right]x\,dx$$

上式已用到〞中心線之速度最大〞之邊界條件。

$$\therefore u=u_{max}-\frac{g_c}{2\mu}\left[\frac{(-\Delta p)}{y_o}+\frac{\rho g}{g_c}\right]x^2\quad\cdots\cdots(2)$$

假設在兩壁無滑動（no slip）則　$x=B$ 時，$u=0$

代入(2)式得：

$$u_{max}=\frac{g_c}{2\mu}\left[\frac{(-\Delta p)}{y_o}+\frac{\rho g}{g_c}\right]B^2 \cdots\cdots\cdots(3)$$

此式與（2-14）同類。將(2)(3)相除得

$$u=u_{max}\left[1-\left(\frac{x}{B}\right)^2\right]$$

此式與（2-15）同類。

2-2　重複問題2-1，但流體為擬塑性流體，遵守方程式（2-5），但$n=0.5$。

圖：上題（2-1）題導至公式(1)，皆適用於本題，所以

$$\tau=\left[\frac{(-\Delta p)}{y_o}+\frac{\rho g}{g_c}\right]x \cdots\cdots\cdots(1)$$

流體適用冪律（power low）且$n=0.5$

$$\therefore \tau=\frac{K}{g_c}\left(\frac{du}{dx}\right)^{0.5}=\left[\frac{(-\Delta p)}{y_o}+\frac{\rho g}{g_c}\right]x$$

化簡：

$$\frac{du}{dx}=\left(\frac{g_c}{K}\right)^2\left[\frac{(-\Delta p)}{y_o}+\frac{\rho g}{g_c}\right]^2x^2$$

積分：

$$\int_{u_{max}}^{u}du=\left(\frac{g_c}{K}\right)^2\left[\frac{(-\Delta p)}{y_o}+\frac{\rho g}{g_c}\right]^2\int_0^x x^2dx$$

$$\therefore u=u_{max}-\left(\frac{g_c}{K}\right)^2\left[\frac{(-\Delta p)}{y_o}+\frac{\rho g}{g_c}\right]^2\cdot\frac{x^3}{3} \cdots(2)$$

假設在兩壁無滑動現象，則 $x=B$ 時，$u=0$

代入(2)式得：

$$u_{max}=\left(\frac{g_c}{K}\right)^2\left[\frac{(-\Delta p)}{y_o}+\frac{\rho g}{g_c}\right]^2\cdot\frac{B^3}{3} \cdots\cdots(3)$$

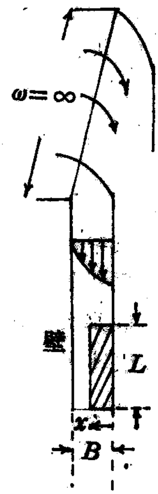
此式與（2-14）同類。將(2)(3)相除得：

$$u=u_{max}\left[1-\left(\frac{x}{B}\right)^3\right]$$

此式與（2-15）同類。

2-3　牛頓流體層流流下一無限寬的平面，試求在液體層內的速度分佈和在自由表面的速度爲何？

解：取距自由表面爲 x 之基體（如圖示斜線體，其厚爲 x，長爲 L，寬爲∞）作力的平衡：



(1)壓力上下相同，皆爲大氣壓力，故淨壓力爲零。

(2)重力爲：$(x, L, w)\,\rho g/g_c$

(3)切壓只有一面（另一面與空氣接觸，切壓很小，可省略）：

$-(w\cdot L)\,\tau$

在穩流下，合力爲零，所以

$(x\cdot L\cdot w)\,\rho g/g_c-(w\cdot L)\tau=0$

整理得切壓爲：

$$\tau=\frac{(x\cdot L\cdot w)\rho g/g_c}{w\cdot L}$$

$$=\left(\frac{\rho g}{g_c}\right)x \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

流體爲牛頓流體：

$$\tau=\frac{\mu}{g_c}\left[-\frac{du}{dx}\right]=\left(\frac{\rho g}{g_c}\right)x$$

積分：$\displaystyle\int_{u_{max}}^{u} du=-\left(\frac{\rho g}{\mu}\right)\int_0^x x\,dx$

$$\therefore u=u_{max}-\frac{\rho g}{\mu}\cdot\frac{x^2}{2} \cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

假設與壁接觸表面無滑動現象，即 $x=B$ 時，$u=0$

代入上式得自由表面流速：

$$u_{max}=\frac{\rho g}{\mu}\cdot\frac{B^2}{2} \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

(2) (3) 相除得速度與液層位置之關係式：

$$u=u_{max}\left[1-\left(\frac{x}{B}\right)^2\right]$$

2-4　溫度 68°C 的水流經 10 ft 長，$\frac{1}{2}$ in -ID 的管子，中央線的速度爲 3 in/sec ，試求所須要的壓力降落？單位爲 psi 。

圖：水可視爲牛頓流體，查表 $A-9$ 或 $A-10$ 得到 68°F 時之粘度 $\mu=1.005\,CP$，密度 $\rho=62.4$ lb/ft³（查表 $A-7$）。

(1)判斷是否爲層流

$$R_e=\frac{Du_b\rho}{\mu}<\frac{Du_{max}\rho}{\mu}=\frac{(\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{12})(\frac{3}{12})(62.4)}{(1.005\times6.72\times10^{-4})}$$

$$=967<2100$$

其中 u_{max} 即爲中心線速度。

顯然是層流，所以課本公式（2-14）適用於本題，在此已假設爲水平流動。

(2)求壓力降落

$$u_{max}=\frac{(-\Delta p)g_c r_i^2}{4\mu L}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2\text{-}14)$$

$$\therefore(-\Delta p)=\frac{4\mu L\ u_{max}}{g_c r_i^2}$$

$$=\frac{4(1.005\times6.72\times10^{-4})(10)(3/12)}{(32.174)(\frac{1}{4}\cdot\frac{1}{12})^2}$$

$$=0.4836\ lb_f/ft^2$$
$$=3.36\times10^{-3}\ psi$$

2-5　在溫度爲 68°C 和一大氣壓下，空氣以 3 in/sec 的速度流經問題 2-4 的管子，試求所須要的壓力降落？單位爲 psi 。

圖：空氣 68° F 及 1 atm之性質，查表 $A-8$ 與 $A-2$ 得粘度 $\mu=0.018\,CP$；查表 $A-23$ 得密度 $\rho=\frac{1}{v_a}=\frac{1}{13.298}$（lb/ft³）

(1)判斷是否爲層流

$$R_e=\frac{Du_b\rho}{\mu}<\frac{Du_{max}\rho}{\mu}=\frac{(\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{12})(\frac{3}{12})(\frac{1}{13.298})}{(0.018\times6.72\times10^{-4})}$$

$$=65<2100$$

顯然是層流，又氣體屬於牛頓流體所以（2-14）適用於本題，在此已假設爲水平流動。

(2) $$(-\Delta p)=\frac{4\mu L u_{max}}{g_c r_i^2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}14)$$

$$=\frac{4(0.018\times 6.72\times 10^{-4})(10)(3/12)}{(32.174)(\frac{1}{4}\cdot\frac{1}{12})^2}$$

$$=8.7\times 10^{-3}\ lb_f/ft^2$$

$$=6.0\times 10^{-5}\ psi$$

或併用2-4題之計算

$$(-\Delta p)_{air}=(-\Delta p)_{H_2O}\cdot\frac{\mu_{air}}{\mu_{H_2O}}$$

$$=(3.36\times 10^{-3})\cdot\left(\frac{0.018}{1.005}\right)$$

$$=6.0\times 10^{-5}\ (psi)$$

2-6　10°C 水層流流經 1-cm-ID 的管子，離管壁 5 mm 處的流速爲 10 cm/sec，試求沿著管子的壓力變化速率？單位爲 torr/cm。

解：水 10°C 時查表 A-10 得粘度 $\mu=1.3077\,CP$；密度 $\rho=1\ g/cm^3$；距管壁 5 mm 處之速度爲 10 cm/sec，此即爲最大速度，因管内徑爲 1 cm=10 mm

(1)判斷是否爲層流

$$R_e=\frac{Du_b\rho}{\mu}<\frac{Du_{max}\rho}{\mu}=\frac{(1)(10)(1)}{(1.3077\times 10^{-2})}$$

$$=765<2100$$

所以是層流，假設爲水平流動，則課本（2-14）公式適用於本題：

$$u_{max}=\frac{-\Delta p\ g_c\ r_i^2}{4\mu L} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}14)$$

$$\therefore \frac{(-\Delta p)}{L}=\frac{4\mu u_{max}}{g_c r_i^2}=\frac{(4)(1.3077\times 10^{-2})(10)}{(1)(\frac{1}{2})^2}$$

$$=2.092\left(\frac{dynes/cm^2}{cm}\right)\times$$

$$\frac{0.9869\ \text{atm}}{10^6\ \text{dynes}/\text{cm}^2} \times \frac{760\ \text{torr}}{1\ \text{atm}}$$
$$=1.57\times10^{-3}\ \text{torr}/\text{cm}$$

2-7 乙醇在 68°F 下流經 $\frac{1}{8}$ in-ID的管子，經過 1 ft 長管子的壓力降落爲 0.25 in-Hg，試求水在稍子中央的速度爲多少？

解：乙醇 68°F時之粘度查表 $A-9$ 及 $A-3$ 得 $\mu=1.25\,CP$，查表 $A-7$ 得密度 $\rho=49\ \text{lb}/\text{ft}^3$。

壓差：$(-\Delta p)=0.25\ \text{in Hg}\cdot\dfrac{14.7\times144\,\text{lb}_f/\text{ft}^2}{29.92\ \text{in Hg}}$

$$=17.69\ (\text{lb}_f/\text{ft}^2)$$

假設爲水平層流，則公式（2-14）適用之：

$$u_{max}=\frac{(-\Delta p)\cdot g_c\cdot r_i^2}{L\cdot 4\mu}=\left(\frac{17.69}{1}\right)\cdot\frac{(32.174)\left(\frac{1}{16}\cdot\frac{1}{12}\right)^2}{4\,(1.25\times6.72\times10^{-4})}$$

$$=4.6\ (\text{ft}/\text{sec})$$

檢驗是否爲層流：

$$u_b=\frac{\int_0^{2\pi}\int_0^{r_i} u\,r\,dr\,d\theta}{\int_0^{2\pi}\int_0^{r_i} r\,dr\,d\theta}=\frac{1}{2}u_{max}$$

其中已用到（2-15）式，$u=u_{max}\left[1-\left(\frac{r}{r_i}\right)^2\right]$

所以：

$$R_e=\frac{D u_b \rho}{\mu}=\frac{\left(\frac{1}{8}\cdot\frac{1}{12}\right)\left(\frac{4.6}{2}\right)(49)}{1.25\times6.72\times10^{-4}}$$

$$=1400<2100$$

顯然層流之假設合理。

2-8 水在 30°C 時被壓經一 3-mm-ID的毛細管，中央線處的速度爲 1 cm/sec，試求管壁處的切剪應力？單位爲 dynes/cm²。

解：水 30°C 查表 $A-10$ 得粘度 $\mu=0.8007\ CP$；密度 $\rho=1.0\ g/cm^3$ 。

層流判斷：

$$R_e=\frac{Du_b\rho}{\mu}<\frac{Du_{max}\rho}{\mu}=\frac{(3/10)(1)(1)}{0.8007\times10^{-2}}$$

$$=37<2100$$

所以是層流，公式（2-14）適用之：

$$u_{max}=\frac{(-\Delta p)g_c r_i^2}{4\mu L} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}14)$$

$$\therefore \left(\frac{-\Delta p}{L}\right)=\frac{4\mu u_{max}}{g_c r_i^2}$$

由（2-10）式知內壁切壓爲：

$$\tau_s=\frac{-\Delta p\cdot D}{4L}=\frac{D}{4}\left(\frac{-\Delta p}{L}\right)=\frac{D}{4}\cdot\frac{4\mu u_{max}}{g_c r_i^2}$$

$$=\frac{2\mu u_{max}}{g_c r_i}$$

$$=\frac{(2)(0.8007\times10^{-2})(1)}{(1)(\frac{3}{2}\cdot\frac{1}{10})}$$

$$=0.107\ (dynes/cm^2)$$

2-9 試做 u/u_{max} 對 r/r_i 的圖：

(*a*) 擬塑性流體，$n=0.5$ 。

(*b*) 膨脹流體 $n=2.5$ 。

解：由課本例 2-1，公式(5)知：

$$\frac{U}{U_{max}}=\left[1-\left(\frac{r}{r_i}\right)^{(n+1)/n}\right]$$

∴ 當 $n=0.5$ 時

$$\frac{U}{U_{max}}=1-\left(\frac{r}{r_i}\right)^3 \quad \text{—(1)}$$

當 $n=2.5$ 時

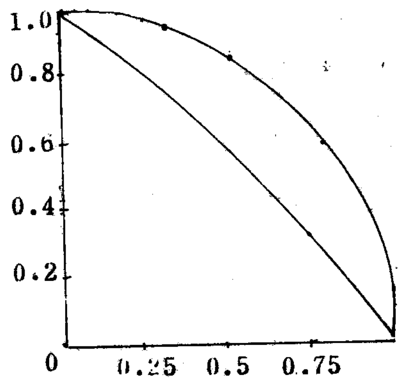
$$\frac{U}{U_{max}}=1-\left(\frac{r}{r_i}\right)^{1.4} \quad \text{—(2)}$$

取 $r/r_i = 0, 1/4, 2/4, 3/4, 1$

代入(1)(2)中求得 U/U_{max} 之值如下：

u/u_{max} \ r/r_i ; n	0	1/4	2/4	3/4	1
0.5	1	0.984	0.875	0.578	0
2.5	1	0.856	0.621	0.332	0

作圖如下：



第三章　全部質量平衡

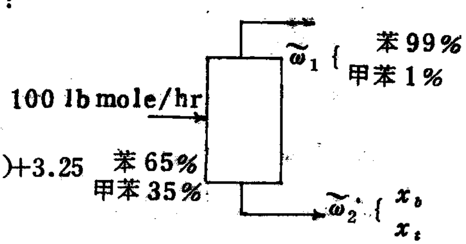
3-1　每小時有一百磅的混合物連續地進入蒸餾程序內，此混合物含有 0.35 mole 分率的甲苯和 0.65 mole 分率的苯，此程序可得到兩種產品流體，其中之一含有 0.99 mole 分率的苯，而另外一種含有進入程序內苯的 5 %，試求兩種產品流體的流動速率（單位爲 lb mole/hr）和甲苯濃厚流體的組成？假設在此系統內是沒有累積的。

解：在生成物 $\widetilde{\omega}_2$ 中，含有苯之量爲：

$(0.05)(100)(0.65)$

$=3.25(\text{mole/hr})$

作苯的質量均衡：



$(100)(0.65)=\widetilde{\omega}_1(0.99)+3.25$

$\therefore \widetilde{\omega}_1=62.37(\text{moles/hr})$

於是：$\widetilde{\omega}_2=100-\widetilde{\omega}_1$

$=37.63(\text{moles/hr})$

$\widetilde{\omega}_2$ 所含之成分：

苯所佔分率　$x_b=\dfrac{3.25}{\widetilde{\omega}_2}=\dfrac{3.25}{37.63}$

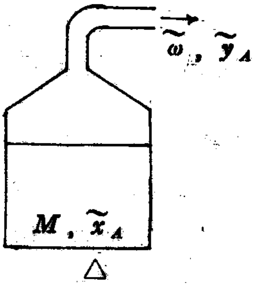
$=8.64$ mole %

甲苯分率　$x_t=100-8.64=91.36$ mole %

3-2　一分批蒸餾塔內裝入了 150 lb moles的混合物，此混合物含有 60 mole %的苯和 40 mole %的甲苯，離開蒸餾塔汽相的組成和塔內液相的組間的關係是：

$$y_A=\alpha\,\widetilde{x_A}/[1+(\alpha-1)\widetilde{x_A}]$$

其中 y_A 和 x_A 分別代表苯在汽相和液相內的mole 分率，α 爲相對揮發度，其爲常數而等於 2.57，假若此蒸餾程序繼續進行至在蒸餾塔內僅存有 30 moles 的液體時，則所收集蒸餾物的組成如何？



圖：裝置內原有$M_o=150$ lb moles，苯的摩爾分率$x_{A0}=0.4$。令分餾出來之蒸汽流量爲$\widetilde{\omega}$ (moles/hr)，$\widetilde{\omega}$中苯佔$\widetilde{y}_A$。

已知$y_A=\alpha\widetilde{x}_A/(1+(\alpha-1)\widetilde{x}_A)$，

其中$\alpha=2.57$

$$\therefore y_A=\frac{2.57\widetilde{x}_A}{1+1.57\widetilde{x}_A} \qquad \cdots\cdots(1)$$

總質量不滅式爲：

$$\widetilde{\omega}+\frac{dM}{d\theta}=0$$

$$\therefore \widetilde{\omega}=-\frac{dM}{d\theta} \qquad \cdots\cdots(2)$$

苯的質量不滅式爲：

$$\widetilde{\omega}\ \widetilde{y}_A+\frac{d(M\widetilde{x}_A)}{d\theta}=0$$

即$\widetilde{\omega}\ \widetilde{y}_A+M\dfrac{d\widetilde{x}_A}{d\theta}+\widetilde{x}_A\dfrac{dM}{d\theta}=0 \cdots\cdots(3)$

(2)式代入(3)式整理得：

$$M\frac{d\widetilde{x}_A}{d\theta}=(\widetilde{y}_A-\widetilde{x}_A)\frac{dM}{d\theta}$$

$$\frac{dx_A}{\widetilde{y}_A-\widetilde{x}_A}=\frac{dM}{M}$$

(1)式代入上式，消去$\widetilde{y}_A$，得到：

$$\left(\frac{1.57\widetilde{x}_A+1}{1.57\widetilde{x}_A(1-\widetilde{x}_A)}\right)d\widetilde{x}_A=\frac{dM}{M}$$

左邊以部份分式表示並積分：

$$\int_{0.4}^{\widetilde{x}_A}\left[\left(1+\frac{1}{1.57}\right)\frac{1}{1-\widetilde{x}_A}+\frac{1}{1.57}\cdot\frac{1}{\widetilde{x}_A}\right]d\widetilde{x}_A$$

$$= \int_{150}^{30} \frac{dM}{M}$$

$$\left[-1.637 \ln(1-\tilde{x}_A)+0.637 \ln\tilde{x}_A\right]_{0.4}^{\tilde{x}_A} = \left[\ln M\right]_{150}^{30}$$

$$-1.637 \ln \frac{1-\tilde{x}_A}{0.6} + 0.637 \ln \frac{\tilde{x}_A}{0.4} = \ln 0.2$$

上式試誤法解出：$\tilde{x}_A=0.09$

離開蒸餾器的蒸汽經冷却收集總量令爲D

則 $D=150-30=120$ lb moles

蒸出的苯量等於原有量減去殘留器中的量：

$\therefore M_A=(150)(0.4)-(30)(0.09)$

$\quad =57.3$ (lb moles)

所以分餾出來的產品D中，苯所分率爲：

$$\tilde{x}_D = \frac{M_A}{D} = \frac{57.3}{120} = 47.75 \text{ mole\%}$$

3-3 當Reynolds 數爲110,000時，速度分佈爲

$$u = u_{\max} \left(\frac{r_i - r}{r_i}\right)^{1/7}$$

此方程式適合於在一平滑圓管內的亂流，試求在這種情況下的 $u_b/u_{\max}$？假若用變數y代表$r_i - r$，則可簡化積分。

解：u_b爲群速度(bulk velocity)由(3-14)式知：

$$u_b = \frac{1}{A}\iint_A u\,dA$$

$$= \frac{1}{\pi r_i^2} \int_0^{2\pi}\int_0^{r_i} u_{\max} \left(\frac{r_i-r}{r_i}\right)^{1/7} r\,dr\,d\theta$$

$$= \frac{2u_{\max}}{r_i^2} \int_0^{r_i} \left(\frac{r_i-r}{r_i}\right)^{1/7} r\,dr$$

令$y=r_i-r$，則$r=0$時，$y=r_i$；$r=r_i$時，$y=0$，且 $dr=-dy$，將新自變數y代入上式得：

$$u_b = \frac{2u_{\max}}{r_i^2} \int_{r_i}^{0} \left(\frac{y}{r_i}\right)^{1/7} (r_i-y)(-dy)$$

$$= \frac{-2u_{\max}}{r_i^{(2+\frac{1}{7})}} \int_{r_i}^{0} y^{1/7}(r_i-y)\,dy$$

$$= \frac{-2u_{max}}{r_i^{\frac{15}{7}}} \left[\frac{7}{8} r_i \cdot y^{8/7} - \frac{7}{15} y^{15/7} \right]_{r_i}^{0}$$

$$= -2u_{max} \left[-\frac{7}{8} + \frac{7}{15} \right]$$

$$= (0.817)u_{max}$$

$$\therefore u_b / u_{max} = 0.817$$

3-4 液體以層流自一垂直平面流下時，液體層內的速度分佈可用下列之方程式表示

$$u_y = \frac{\rho g}{\mu} \left(Lx - \frac{x^2}{2} \right)$$

其中 L =液體層的厚度

u_y =離壁 x 距離時的向下速度

(a) 證明液體的平均速度爲在自由表面處速度的 2/3 。

(b) 若液體是在 60°F 以 1 gal/min 的速率自寬爲 3 ft 的垂直表面流下時，求液體層的厚度爲何？

解：(a)
$$u_b = \frac{\int_0^L u_y \, dx}{\int_0^L dL}$$

$$= \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \frac{\rho g}{\mu} \left(Lx - \frac{x^2}{2} \right) dx$$

$$= \frac{\rho g}{\mu L} \left[\frac{Lx^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right]_0^L$$

$$= \frac{\rho g L^2}{3\mu}$$

在自由表面處（ $x = L$ ）之流速爲：

$$u_s = \frac{\rho g}{\mu} \left(Lx - \frac{x^2}{2} \right) \Big|_{x=L}$$

$$= \frac{\rho g L^2}{2\mu} \qquad \therefore u_b / u_s = \frac{2}{3}$$

(b)水在 60° F 下的粘度 $\mu=1.12CP$(查表 $A-10$)；密度 $\rho=62.3\ lb_m/ft^3$ 。

$$流量\ q=1\ gal/min\cdot\frac{1\ ft^3}{7.48\ gal}\cdot\frac{1\ min}{60\ sec}$$

$$=2.23\times10^{-3}\ ft^3/sec$$

又 $q=B\cdot L\cdot u_b$ ， 其中 B 爲寬度

$$=B\cdot L\cdot\frac{\rho gL^2}{3\mu}$$

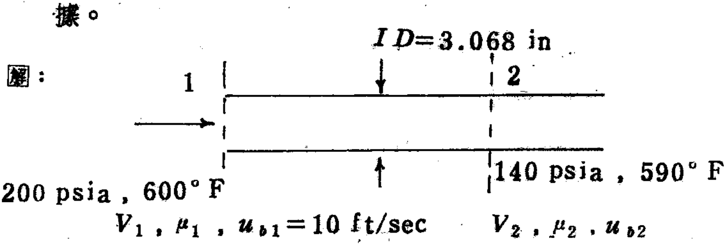
$$\therefore\quad L=\left[\frac{3\mu q}{\rho gB}\right]^{1/3}$$

$$=\left[\frac{3(1.12\times6.72\times10^{-4})(2.23\times10^{-3})}{(62.3)(32.2)(3)}\right]^{1/3}$$

$$=9.42\times10^{-4}\ (ft)$$

3-5 蒸氣在 200 psia ，600°F 以 10 ft/sec 全速度進入 3 in schedule-40 的鐵管，在管中某一點的壓力爲 140 psia，溫度爲 590°C，求此點的平均速度？同時也計算在上流點和下流點的 Reynolds 數？假設穩定流動，並自蒸氣表中取得所須數據。

圖：



從表 $A-5$ 查得 3 吋，schedule−40 鋼管之內徑爲 $ID=3.068$ in 。

水蒸汽的性質可查 Handbook，以下比容及粘度查自 Keenan's steam tables：

200 psia 及 600° F 時，$V_1=3.058\ ft^3/lb$

$\mu_1=5.31\times10^{-5}\ lb/ft\cdot sec$

140 psia 及 590° F 時，$V_2=4.367\ ft^3/lb$

$\mu_2=5.98\times10^{-5}\ lb/ft\cdot sec$

因爲穩定流動：

$$\therefore u_{b1}\cdot A\cdot \rho_1 = u_{b2}\cdot A\cdot \rho_2 \quad , \quad 其中\ \rho=\frac{1}{V}$$

即 $$\frac{u_{b1}A}{V_1}=\frac{u_{b2}A}{V_2}$$

$$\therefore u_{b2}=u_{b1}\cdot\frac{V_2}{V_1}=\frac{(10)(4.367)}{3.058}=14.28\ \text{ft/sec}$$

上游的雷諾數：

$$R_{e1}=\frac{Du_{b1}\rho_1}{\mu_1}=\frac{Du_{b1}}{\mu_1 V_1}=\frac{(3.068/12)(10)}{(5.31\times10^{-5})(3.058)}$$
$$=15700$$

下游的雷諾數：

$$R_{e2}=\frac{Du_{b2}\rho_2}{\mu_2}=\frac{Du_{b2}}{\mu_2 V_2}=\frac{(3.068/12)(14.28)}{(5.98\times10^{-5})(4.367)}$$
$$=14000$$

3-6 在攪拌槽中製造 H_3PO_4，10,000 lb/hr 的 $Ca_3(PO_4)_2$ 懸浮水中與 94 質量% H_2SO_4 連續進行反應，所須的 H_2SO_4 即爲化學計量中的mole 數，反應槽必須加入足夠的水以便當程序在穩定狀態中操作時可以產生 40 質量%的磷酸。以一定的速率將磷酸溶液和形成的 $CaSO_4$，$\cdot 2H_2O$ 自攪拌槽移出，而使槽內的總質量維持一定。

假若在開始操作前槽中含有 10,000 lb 的 20 質量%磷酸溶液，則 1 hr 後槽內的濃度是多少？

解：$Ca_3(PO_4)_2+3H_2SO_4+nH_2O\rightarrow 2H_3PO_4+3CaSO_4\cdot 2H_2O+mH_2O$

(1) 首先計算每小時進料總量

H_3PO_4 每小時產生之量爲：

$$\widetilde{R}=\frac{10000\ (\text{lb/hr})}{310\ \text{lb/lbmole}}\times(0.94)\times2=60.645\ \text{lbmoles/hr}$$

其中 310 爲 $Ca_3(PO_4)_2$ 之分子量，乘 0.94 是因爲 H_2SO_4 只有計量上的 94%，乘 2 是每一分子 $Ca_3(PO_4)_2$ 反應產生 2 分子 H_3PO_4。

出料中含有 H_3PO_4 40 *wt* %，所以每小時出料總量