

# ドラフトチューブ付噴流層の流動特性について

伊地知和也・田中 安彦

(受理 昭和60年5月31日)

## CHARACTERISTICS OF A SPOUTED BED WITH A DRAFT TUBE

Kazuya IJICHI and Yasuhiko TANAKA

Experiments were performed in a 50.0 mm diameter transparent acrylic column with a 14.0 mm diameter draft tube using glass beads ( $\rho_p=2.5\text{g/cm}^3$ ) as the bed material to study the effects of operating variables of particle diameter, bed weight, and draft tube distance.

Results indicate that the minimum stable spouting velocity is affected by the particle diameter and draft tube distance.

It was also found that stable spouting occurs until the velocity in a draft tube was about 82 % of particle terminal velocity.

### 緒 言

噴流層技術を固気系接触装置に利用する場合は、安定な噴流状態がどのような操作条件の範囲で得られるか正確に把握しておく必要がある。一般に、流動層ではスラッシングを起こすような粗い粒子や充てん量が多い場合でも、噴流層では円滑に粒子を循環させることができる。噴流層内にドラフトチューブを取り付けると、安定な噴流状態を維持できる操作条件、範囲を更に広げることができるが<sup>1,4)</sup>ドラフトチューブを取り付けることによって、新たにチューブの閉塞という問題が生じてくる。したがって、ドラフトチューブ付噴流層の最小安定噴流化速度や全流量に対するチューブ内流量、すなわち流量比等の流動特性を調べることは重要である。著者らはこのような見地から、ドラフトチューブの圧力損失に着目し、噴流化実験を行なった。

### 1. 実験装置と実験方法

#### 1.1 充てん粒子

実験に使用した粒子は、平均径の異なる4種類の球形ガラス粒子である。その物性をTable 1に示す。平均径は標準ふるいの目開きの幾何平均より算出した。また、粒子の終末速度は最小粒子に対してAllenの

Table1 Physical properties of particles used in this study

Glass beads [ specific gravity=2.5 ]			
Sieve range	Average diameter	Terminal velocity	Bed voidage at minimum fluidization
[mm]	[mm]	[m/s]	[-]
-1.00+0.84	0.916	7.22	0.396
-1.68+1.41	1.54	9.71	0.391
-2.38+2.00	2.18	11.50	0.391
-3.36+2.38	3.08	13.70	0.398

式を、その他の粒子に対してはNewtonの式を用いて計算により求めた。

#### 1.2 実験装置

実験装置の概略をFig. 1に、塔本体下部の構造をFig. 2に示す。塔本体は内径50mmの透明アクリル樹脂製で、塔底部に開角60度の円錐部が取り付けられている。また、ガス入口ノズルと円錐部の間には充てん粒子支持のために32メッシュの全網が挟み込まれている。ドラフトチューブは内径14mm、外径16mmの銅パイプ製で、円錐部より70mm上方の位置に、塔本体と中心が一致するようにステイターで固定され

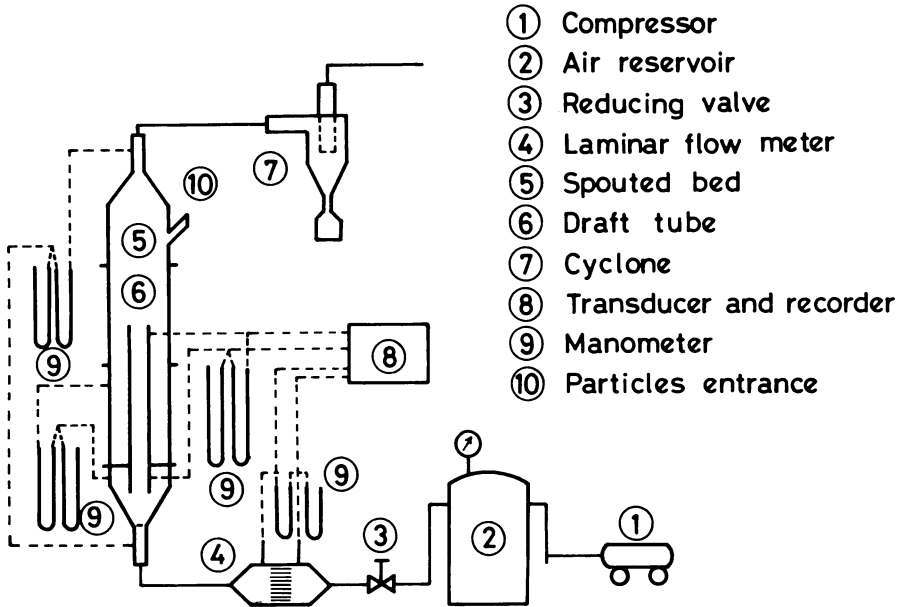


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

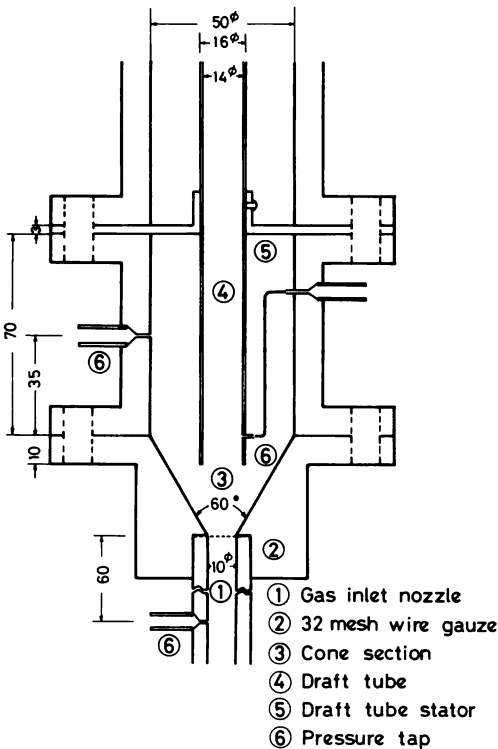


Fig. 2 Lower part of spouted bed structure

ている。また、ドラフトチューブ下端とガス入口ノズルとの距離、すなわちチューブ距離はステイターを調整して自由に変えることができる。圧力タップは塔本体の入口と出口、ドラフトチューブの入口と出口および円錐部上端から 35 mm と 152 mm の位置の 6 ケ所に設けられており、それぞれ塔内とドラフトチューブ内および環状部の圧力損失が測定可能である。流量計に司測研(有)の層流型流量計 LFE50B を差圧変換器に豊田工機(株)の DD102 を用いた。送入ガスは室温の空気である。

### 1.3 実験方法

塔上部の粒子供給口より球形ガラス粒子を一定量塔内に充てんした後、流量調整弁を開いてコンプレッサーから空気を送り、定常安定噴流を形成させる。その後空気流量を徐々に減少させると、噴流は脈動状態を示すようになる。さらに流量を減少させていくと、間欠的に噴流を形成するが、最後には閉塞して粒子は静止する。一方、ドラフトチューブの圧力損失は空気流量を減少させるにしたがって、定常安定噴流を形成している時の値から徐々に減少するが、噴流が脈動状態を示し始めると、圧力損失は逆に大きくなり、間欠的噴流域ではそれに対応して圧力損失の増加、減少を

くり返す。すなわち、噴流が脈動状態を示し始めるところで、ドラフトチューブの圧力損失は極小値をとることがわかった。この極小値を示す時の噴流状態が安定噴流の下限であり、しかもドラフトチューブの閉塞の始まりであると考えられる。著者らはこの時の入口速度を最小安定噴流化速度  $U_{mss}$  と定義した。実験においては、このドラフトチューブの圧力損失が極小値を示す時の各部の静圧と差圧を読み取り、 $U_{mss}$  を測定した。

最小安定噴流化速度に及ぼす粒子径、粒子充てん量およびチューブ距離の影響を検討するために、粒子径を4種類、充てん量を4種類そしてチューブ距離を3種類変化させた。実験条件を Table 2 に示す。

Table 2 Experimental conditions

Average particle diameter	[mm]	0.916, 1.54, 2.18, 3.08
Bed weight	[kg]	0.2, 0.4, 0.6, 0.8
Distance from air inlet to lower end of draft tube	[mm]	16, 21, 26
Draft tube diameter	[mm]	14.0
Draft tube length	[mm]	300
Column diameter	[mm]	50.0
Column height	[mm]	700
Cone angle	[deg.]	60.0

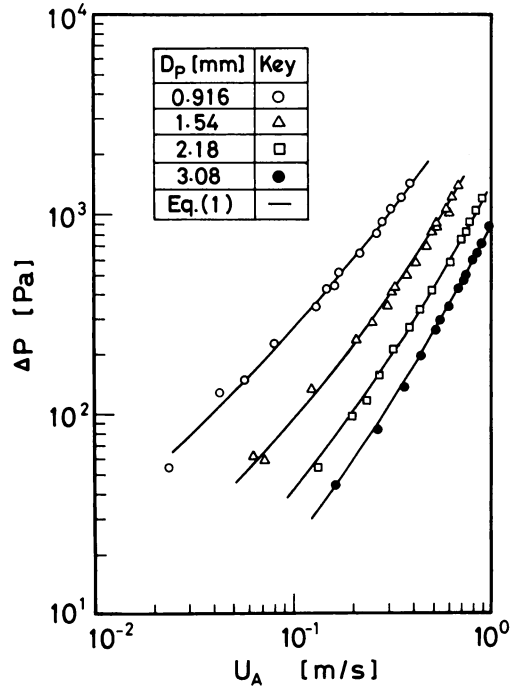
環状部の圧力損失と流速の関係を探るために、上記の噴流化実験とは別に下記の方法で実験を行なった。すなわち、ドラフトチューブの両端に栓をして閉じ、環状部のみに噴流化実験に用いた粒子と同じ粒子を充てん後空気を流し、通常の方法で測定を行なった。この場合の充てん量は各粒子について 600g 一定とし、粒子は流動化をおこさない固定層の状態に保たれた。

## 2. 実験結果と考察

### 2.1 環状部圧力損失

Fig. 3 に環状固定層にガスを流した場合の圧力損失  $\Delta P$  とガス流速  $U_A$  の関係を示す。図より粒子径が小さくなるにしたがって  $\Delta P$  は増大することがわかる。また、 $\Delta P$  は  $U_A$  の 1 より大きいべき乗に比例しているので、粒子層を通過する流れの抵抗を層流と乱流の抵抗の和の形で取り扱っている Ergun の式を用いて整理することを試みた。次式

$$\frac{\Delta P}{L} = A \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_A}{D_p^2} + B \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_r U_A^2}{D_p} \quad (1)$$

Fig. 3 Relationship between  $\Delta P$  and  $U_A$ 

で示した Ergun 型の式の係数  $A$  と  $B$  をシンプレックス法を用いて、各粒子径に対する最適値として求めた。その結果を Table 3 に示す。

Table 3 Values of  $A$ ,  $B$  in Eq. [1]

$D_p$ [mm]	$A$ [-]	$B$ [-]
0.916	160	2.15
1.54	142	1.75
2.18	105	1.74
3.08	115	1.75

### 2.2 最小安定噴流化速度

Fig. 4 ~ 6 にチューブ距離  $H_D$  がそれぞれ 16.0 mm, 21.0 mm, 26.0 mm の場合の最小安定噴流化速度  $U_{mss}$  に及ぼす粒子充てん量  $W$  の影響 (両対数プロット) を示す。図より、 $W$  を増すと  $U_{mss}$  は小さくなる。これは  $W$  を増すと環状部の層高が高くなり、流れの抵抗が増大するため、環状部へのガス浸透流れ

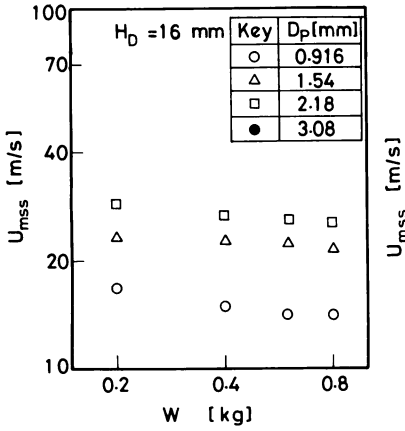


Fig. 4 Relationship between  $U_{mss}$  and  $W$  at  $H_D = 16$

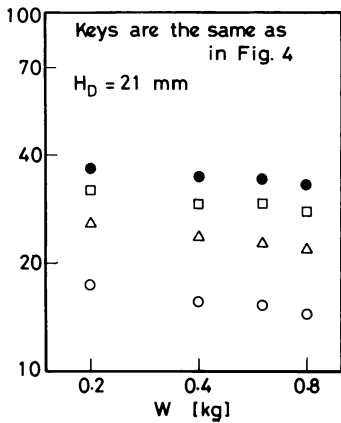


Fig. 5 Relationship between  $U_{mss}$  and  $W$  at  $H_D = 21$

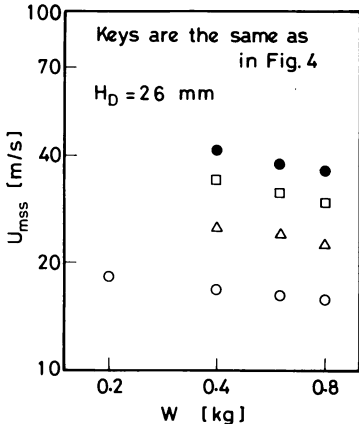


Fig. 6 Relationship between  $U_{mss}$  and  $W$  at  $H_D = 26$

が少なくなり、ドラフトチューブ内を流れるガス量が多くなるためである。さらに、当然ながら粒子径  $D_p$  が大きくなると  $U_{mss}$  も大きくなる。また、両対数紙上で、いずれの  $D_p$ ,  $H_D$  の場合にも  $W$  の増加に対する  $U_{mss}$  の減少割合が大略等しいことは興味深い。

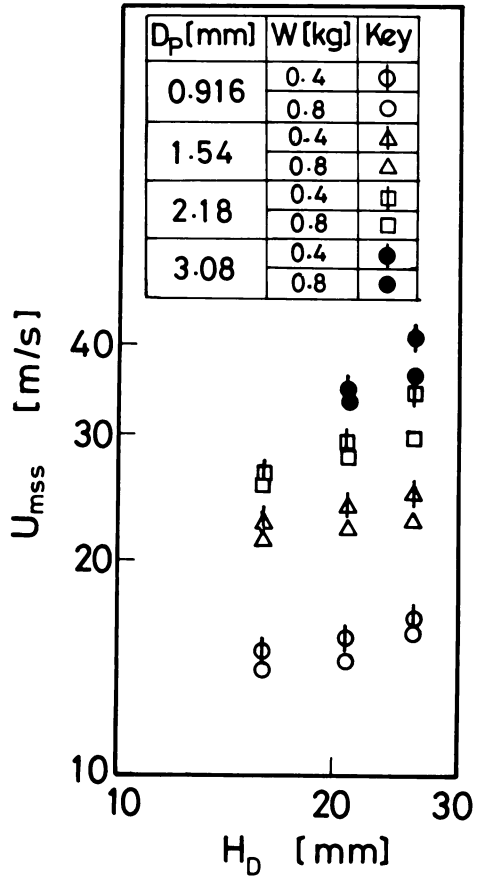


Fig. 7 Relationship between  $U_{mss}$  and  $H_D$

Fig. 7 に  $U_{mss}$  に及ぼす  $H_D$  の影響を示す。図より、 $H_D$  が大きくなると  $U_{mss}$  は増加することがわかる。これはガス入口ノズルから吹き出すジェットの広がり方がノズルからの距離に比例して大きくなるために、ドラフトチューブ内に流れ込む流量が少なくなるためと思われる。また、粒子径に着目すると、 $D_p$  が大きくなるにしたがって  $U_{mss}$  と  $U_{mss}$  の増加率も増大し

ている。前者は  $D_p$  が大きくなると、その終末速度が大きくなるためであり、後者は  $D_p$  が大きくなると、環状部へのガス浸透流れに対する抵抗が小さくなるためと思われる。

2. 3 ガス流量比

Fig. 8 に  $W$  が 0.6 kg と 0.8 kg の場合の環状部が

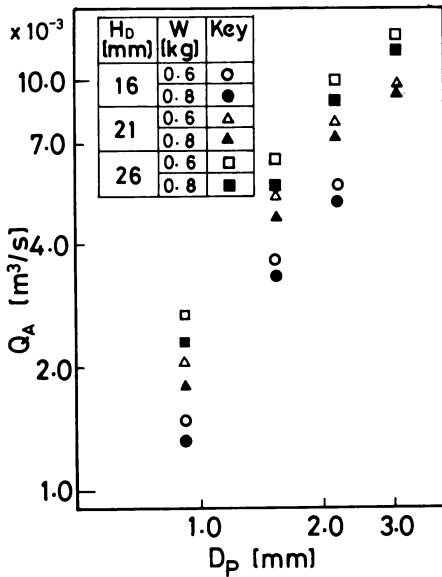


Fig. 8 Relationship between  $U_{mss}$  and  $D_p$

ス流量  $Q_A$  に及ぼす  $D_p$  の影響を示す。噴流層の環状部は粒子が下向き流れの移動層であり、粒子の循環速度が環状部ガス流速に比べてかなり小さければ、固定層の圧力損失式がほぼ環状部にも適用できると思われる<sup>5)</sup>。本実験においては、 $Q_A$  が最小の場合で、粒子循環速度と環状部ガス流速の比は約 0.1 であった。したがって、上述の推論により、 $Q_A$  を噴流時の環状部圧力損失をもとに、(1)式の修正 Ergun 式より求めた。

図より、 $Q_A$  は  $D_p$ 、 $H_b$  が大きくなるにしたがって増大していることがわかる。また、 $W$  が大きくなると環状部の層高が大きくなるので、ガスは環状部へ流れにくくなり、 $Q_A$  は減少していることも示されている。

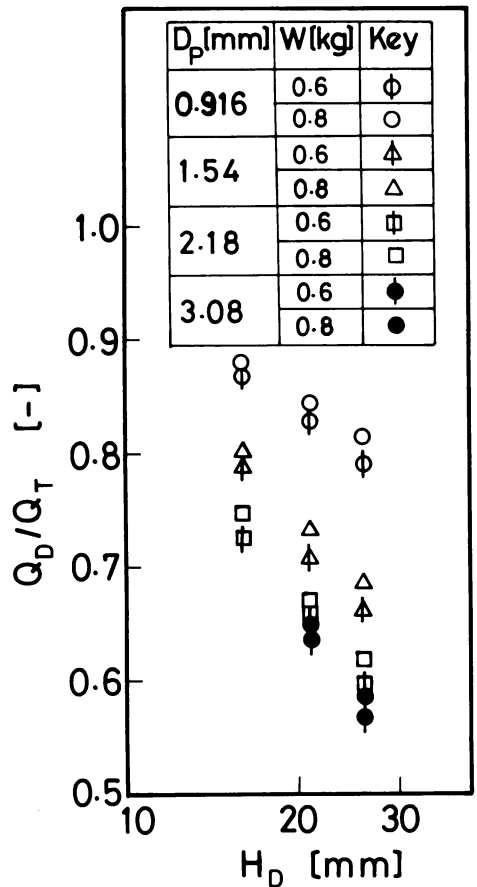


Fig. 9 Relationship between  $Q_b/Q_T$  and  $H_b$

Fig. 9 に全流量  $Q_T$  に対するドラフトチューブ内流量  $Q_b$  の比に及ぼす  $H_b$  の影響を示す。ここで、 $Q_b$  は  $Q_T$  から  $Q_A$  を差し引いて求められた。図より、流量比  $Q_b/Q_T$  は  $H_b$  が大きくなるにしたがって減少し、 $W$  を増すと増大していることがわかる。また、 $D_p$  を大きくすると環状部へ流れるガス量が増すため、 $Q_b/Q_T$  は減少することも同図から明らかである。

Fig. 10 は  $U_{mss}$  およびドラフトチューブ内のガス流速  $U_b$  に及ぼす粒子の終末速度  $U_i$  の影響を示したものである。図中の一点鎖線は  $U_b = U_i$  の関係を与え、これより下方は  $U_b$  に関するデータを図示している。本図からも  $U_{mss}$  は  $U_i$  および  $H_b$  が大きくなるにしたがって増大し、 $W$  が大きくなると減少することがわかる。また、 $U_b$  は  $H_b$ 、 $W$  の変化に対し、わずかに

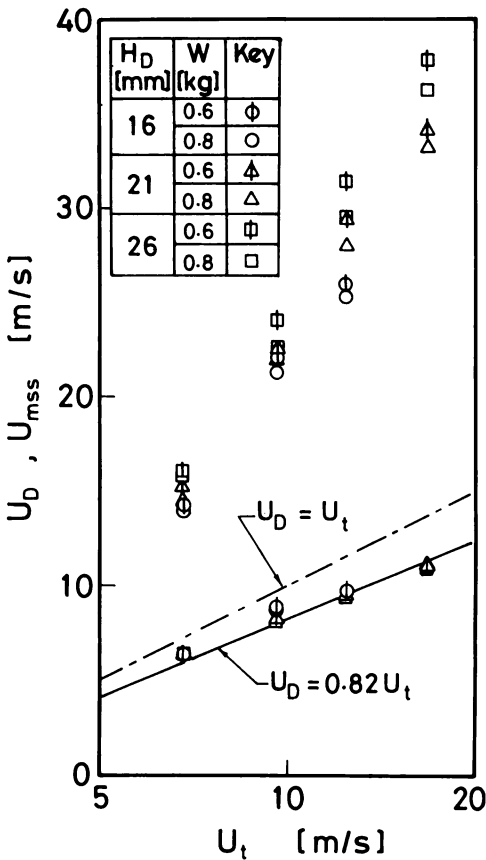


Fig. 10 Relationship between  $U_b$ ,  $U_{mss}$  and  $U_t$

に影響されるように見えるが、 $U_b$  と  $U_t$  の間にはほぼ次のような一義的な関係が成立する。

$$U_b = 0.82 U_t \quad (2)$$

すなわち、本実験の範囲においては、安定な噴流状態が得られる下限は  $U_b$  が  $U_t$  の約 82 % のときであることがわかる。服部ら<sup>2)</sup>は側壁に排気口を設けた噴流層装置を用いて同様の実験を行ない、平均粒径が 0.27 mm から 1.8 mm の球形ガラス粒子に対し、 $U_b$  が  $U_t$  の 80 % になるまでは安定な噴流が得られると述べている。

### 3. 結 言

ドラフトチューブ付噴流層を用いて噴流化実験を行ない、最小安定噴流化速度に及ぼす粒子径、粒子充てん量およびチューブ距離の影響を検討し、以下の結果

を得た。

(1) 最小安定噴流化速度は粒子径およびチューブ距離を大きくするにしたがって大きくなり、粒子充てん量を増すと小さくなる。

(2) ドラフトチューブ内流量と全流量との比は粒子径、粒子充てん量およびチューブ距離によって大きく影響を受ける。

(3) ドラフトチューブ内流速が粒子終末速度の約 82 % になるまでは安定な噴流状態が得られる。

### Nomenclature

$A$	= constant in Eg. (1)	[-]
$B$	= constant in Eg. (1)	[-]
$D_c$	= column diameter	[mm]
$D_b$	= draft tube diameter	[mm]
$D_n$	= nozzle diameter	[mm]
$D_p$	= average particle diameter	[m]
$H_b$	= draft tube distance	[mm]
$H_L$	= draft tube length	[mm]
$L$	= bed depth	[m]
$\Delta P$	= pressure drop	[Pa]
$Q_A$	= flow rate in annulus	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_b$	= flow rate in draft tube	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_T$	= total flow rate	[m <sup>3</sup> /s]
$U_A$	= superficial gas velocity in annulus	[m/s]
$U_b$	= superficial gas velocity in draft tube	[m/s]
$U_{mss}$	= minimum stable spouting velocity	[m/s]
$U_t$	= terminal velocity	[m/s]
$W$	= bed weight	[kg]
$\epsilon$	= bed voidage at minimum fluidization	[-]
$\mu$	= gas viscosity	[Pa·s]
$\rho_r$	= gas density	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	= particle density	[kg/m <sup>3</sup> ]

### Literature cited

- 1) Takeda, K. and H. Hattori : Kagaku Kogaku Ronbunshu, 1, 149 (1975)
- 2) Hattori, H. and K. Takeda : J. Chem. Eng. Japan, 14, 462 (1981)
- 3) Clafflin, J. K. and A. G. Fane : Can. J. Chem. Eng., 61, 356 (1983)
- 4) Yang, W. C., and D. L. Keairns : Can. J. Chem. Eng., 61, 349 (1983)
- 5) Happel, J. : I. E. C., 41, 1161 (1949)