

液体攪拌

B.B.卡法罗夫 著

化学工业部化学工业設計院染料科 譯

化学工业出版社

液 體 攪 拌

技術科學碩士 B. B. 卡法羅夫講師 著

A. H. 普朗諾夫斯基教授 校閱

重工業部化學工業設計院染料科譯

化學工業出版社

本書敘述了攪拌的理論根據並確立了功率消耗與攪拌效率之間的關係。

本書還包含有理論的與試驗的資料，可以作設計人員在計算攪拌器時和研究人員作攪拌過程模型法研究時的參考，本書也適用於生產工程師對攪拌功率消耗的現有定額之修訂。

本書是化工設計院染料科俄文學習小組和葉樹滋、章燕豪兩同志共同翻譯的，譯稿並經彭成中、胡世熙、趙玉麟、薛祖源、顧以庄等同志校對。

В. В. КАФАРОВ
ПРОЦЕССЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ЖИДКИХ СРЕДАХ
Госхимиздат (Москва 1949 Ленинград)

* * *
液体攪拌

化學工業部化學工業設計院染料科 譯
化學工業出版社（北京市安外和平北路）出版
北京市書刊出版業營業許可証出字第〇九二號

* * *
化工出版社印刷廠印

一九五五年十月第一版
一九五九年六月北京第四次印刷（6195—7394）

850×1168·1/32·74,000字·2 $\frac{22}{32}$ 印張·插頁8·定價(10)0.55元

書號：15063·012

* * *
發行者 新華書店

目 錄

校閱者的話	(4)
序 言	(5)
I 基本概念與定義	(7)
II 攪拌器的主要型式與構造	(10)
1. 槳式攪拌器	(10)
2. 旋槳式攪拌器	(14)
3. 渦輪攪拌器	(15)
4. 特種攪拌器	(17)
III 攪拌器的傳動	(20)
IV 相似論的原理。攪拌過程中的流體動力相似準數	(21)
V 攪拌的能量消耗	(35)
1. 在啓動時所需的功率	(35)
2. 在運轉時所需的功率	(36)
3. 各種因素對於功率消耗的影響	(45)
4. 攪拌時液體表面的形狀	(46)
VI 攪拌器的模型法	(49)
VII 攪拌效率	(50)
1. 處理不均勻的，互相不起作用的系統時的攪拌效率	(51)
2. 熱交換時的攪拌效率	(53)
3. 物質交換時的攪拌效率	(59)
VIII 攪拌器工程計算的一般程序	(69)
攪拌器工程計算的實例	(70)
參考文獻	(82)
附 錄	(83)

校閱者的話

液體攪拌是最常用的化工單元操作，廣泛地使用於化學工業的各種不同部門中，為加速不均態物質中化學變化的有效方法，也是加強擴散和傳熱作用的方法。

雖然，攪拌操作已廣泛地運用於工業中，但至今攪拌的理論基礎發展得極不完整，由於分析攪拌現象時所採用的方法各家不一，因此妨礙了攪拌理論的發展。

直到最近幾年來，在分析攪拌操作時才開始普遍應用相似論的方法，利用此法綜合了以往積累的資料，因而創立了精確的定律。

在攪拌理論中特別重要的是攪拌的效率問題，但這問題在不久以前才着手研究。

B. B. 卡法羅夫講師所寫的這本書是很有價值的；因為無論對蘇聯或對國外來說，它是第一本涉及一種最重要的化工操作——機械攪拌的書籍。

在本書中，有系統地闡明了攪拌的理論基礎，並且確定了功率消耗與攪拌效率之間的關係。

書中還包括了許多作者在理論和實驗上的大量資料，無庸置疑的，這些資料對於計算攪拌器的設計人員以及攪拌操作模型的研究人員來說，都是非常有用的。

從事實際生產的工程師們，從這本書中能得到很多的知識，在許多生產過程中進行攪拌時，如運用了這些知識，便可以降低能量的消耗，並可以大大地減少生產中能量的損失。

A. H. 普朗諾夫斯基教授

序 言

液體攪拌為單元操作最常用的一種。在某些情況下，這一操作有其獨特的意義，例如裝備均勻的液體混合物，乳濁液及懸浮液等等。雖然在大多數情況下，攪拌操作只是一種輔助操作，但對於主要操作來說，也是具有很大意義的。

大多數的化學過程祇有在施以較強烈的或緩和的攪拌情況下，物質才能順利地相互進行作用。在互不相溶的液體或液體和固體相互作用時，攪拌在加速反應的進行方面起着非常重要的作用，因為增加一物相混入另一物相的速度時，接觸面就會較快的增大，於是物質即以較大的速度相互發生作用。

在某些其他情況下，攪拌是在反應過程中創造良好條件的一個要素。例如：使傳熱作用加強，減少局部過熱以及避免加熱過程中加工物質的焦化等等。

在化學工業中，攪拌廣泛地作為主要操作——例如：將固體溶於液體，製備有機染料乳濁液和懸浮液及製造塗料搪瓷等；但也有作為輔助操作的——例如：在互不相溶的液體或液體和固體所組成的系統中進行化學反應時。

所有的攪拌操作，其主要任務係使各種物相的質點或物質間彼此緊密的接觸。

雖然攪拌操作已廣泛使用，但因其情況複雜，因而研究得還不夠充分。單純從機械觀點，以攪拌時所耗能力來說明這個操作，僅是解決問題的一方面，而不足以說明操作的實質。我們的意見，如欲了解此操作的實質，祇能由所消耗的能力和因而達到的攪拌效率之間的關係來決定。我們試圖運用 M. B. 吉爾畢契夫院士及其學派在蘇聯所研究的應用很廣的相似論方法來處理以前積累的試驗資料，以確定這種關係。

在攪拌器的尺寸、攪拌條件或各種被加工物質的性質變化很大時，可利用相似論方法來計算。

這種方法同時還能確定攪拌起動和運轉時能量消耗間的關係。

單位攪拌容積的能量消耗量及所求得的說明該操作情況的數值（如傳熱係數或物質交換係數等），均可作為計算攪拌效率的基準。因此，如果通常依據工藝過程條件所給的數據不是攪拌時能量消耗的多少，而是該過程所應達到的效率時，也同樣可以擬定出攪拌工程計算的途徑。

I 基本概念與定義

攪拌可分為機械攪拌和氣流攪拌兩種³。

前者利用機械能進行，而後者則利用氣體。

機械攪拌的使用目前最為廣泛，因而我們要研究它。

在液體中進行機械攪拌的目的，通常如下：

- 1) 製備乳濁液或懸浮液；
- 2) 加強熱交換過程；
- 3) 加強物質交換過程。

攪拌操作也廣泛地使用於加強化學過程，但由於這些過程的性質特殊，因而我們不考慮研究^①。

攪拌體積的均勻度，根據攪拌目的的不同，分別加以說明。

例如：攪拌的目的如果是為了製備均勻的乳濁液或懸浮液時，則攪拌體積的均勻度可以該體積中物相分佈的均勻度來表示。

若自進行二相系統攪拌的設備中，由各個不同高度和距離攪拌軸不同距離的點上同時取出許多試樣，則可得到在全部攪拌體積中物相分佈均勻度的概況。

令：

c_0 —設備中被分佈物相^②的含量（%）；

c —試樣中被分佈物相的含量；（%）

n —試樣中各物相的相對含量（%）；

m —同時所取試樣的份數；

I —全部攪拌體積的均勻度（%）。

顯然，試樣中被分佈物相的相對含量是：

$$n = \frac{c}{c_0} 100\% \quad (1)$$

① 此問題可參閱 A. H. 普爾諾夫斯基 [連續操作的理論] Хим.Пром. 1944 年 No. 5 和 No. 6.

② 令數量較少的物相作為被分佈物相。

試樣中另一物相的相對含量是：

$$n = \frac{100 - c}{100 - c_0} 100 \quad (2)$$

根據試樣的分析結果，可依下法確定攪拌體積的均勻度。若 $c < c_0$ ，則按公式(1)算出被分佈物相的相對含量。若 $c > c_0$ ，則按公式(2)求得另一物相的相對含量。因此當所取試樣的份數為 m 時，全部攪拌體積的均勻度可按下式計算：

$$I = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + \dots + n_m}{m} \% \quad (3)$$

I 的數值愈趨近 100，則攪拌體積的均勻度愈大。

今舉例說明，若在設備中攪拌苯(30%)和水(70%)的混合物時，取出四個試樣，每一試樣的體積為 7 公分³，並且在每一試樣中苯的體積為：

試樣號數.....	1	2	3	4
苯(公分 ³)	0.8	2	4.2	6.5

試求攪拌體積的均勻度。

試樣 1，試樣中被分佈物相的含量：

$$c_1 = \frac{0.8}{7} \times 100 = 11.4\% \text{ 苯}$$

設備中被分佈物相的含量：

$$c_0 = 30\%$$

因為 $c_1 < c_0$ ，由公式(1)求得試樣中被分佈物相的相對含量：

$$n_1 = \frac{c_1}{c_0} 100 = \frac{11.4}{30} \times 100 = 38\%$$

試樣 2，依同法：

$$c_2 = \frac{2}{7} \times 100 = 28.6\%$$

$$n_2 = \frac{c_2}{c_0} 100 = \frac{28.6}{30} \times 100 = 95.6\%$$

試樣 3,

$$c_s = \frac{4.2}{7} \times 100 = 60\%$$

因爲此時 $c_s > c_0$, 故按公式 (2) 可求得試樣中另一物相(水)的相對含量:

$$n_s = \frac{100 - c_s}{100 - c_0} 100 = \frac{100 - 60}{100 - 30} \times 100 = 57\%$$

試樣 4,

$$c_1 = \frac{6.5}{7} \times 100 = 93\%$$

$$n_4 = \frac{100 - c_1}{100 - c_0} 100 = \frac{100 - 93}{100 - 30} \times 100 = 10\%$$

當 $m = 4$ 時, 按公式 (3) 可求出攪拌體積的均勻度:

$$I = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + n_4}{m} = \frac{38 + 95.6 + 57 + 10}{4} = 50.15\%$$

如果進行攪拌的目的是加強熱交換, 則攪拌體積的均勻度可以此體積中溫度之分佈情況, 或以由此導出的給熱係數變化情況來表示之, 最後, 在將固態或氣態物質溶解於液體中時, 可以攪拌體積中濃度的分佈或以由此導出的溶解係數或吸收係數的改變來表示之。

攪拌效率——以攪拌體積的均勻度表示之, 此均勻度係在單位時間內輸到單位攪拌體積上的一定量的有效能量時所達到的。

所謂有效能量就是在被攪拌液體中形成渦流時所消耗的運轉功率, 該渦流中還能發生物質交換。攪拌液體中渦流愈大時, 則根據物質交換定律, 攪拌體積的均勻度亦愈大。

各種不同構造的攪拌器(如渦輪式或槳式), 在幾何相似的條件下(全部尺寸與某一決定性尺寸—例如槳葉的直徑的比值不變), 爲了在攪拌液體中獲得同樣程度的渦流(雷諾準數相等), 會消耗不同的能量。顯然, 在兩個攪拌器中, 較有效的是在單位攪拌體積中能獲得同樣的均勻度而所消耗的運轉功率是較小的一個。

如 I —攪拌體積的均勻度,

P —攪拌時消耗的運轉功率，

V —攪拌液體的體積，

那末顯然的，單位消耗功率將是 $\frac{P}{V}$ ，而攪拌效率則可用下列關係式來表示：

$$I = f\left(\frac{P}{V}\right) \quad (4)$$

由此可見，比較各種型式的攪拌器的攪拌效率以及將模型數據換算為實物（所比較的攪拌器為幾何相似時），可以按照均勻度一定時消耗於單位攪拌體積的運轉功率的大小進行。

II 攪拌器的主要型式與構造

機械攪拌是利用所謂的攪拌器來實現的。攪拌器或者安裝於為此專設的容器中，或者直接安裝在反應設備中。機械攪拌器主要是由一對或數對固定於軸上的槳葉組成。軸的傳動是利用齒輪或摩擦傳動，由傳送裝置或直接由電動機來帶動的。

所有的攪拌器依據槳葉構造的特性可以歸納成以下四類：

- 1) 平槳攪拌器或槳式攪拌器；
- 2) 旋槳式攪拌器或推進式攪拌器；
- 3) 渦輪式攪拌器；
- 4) 特種攪拌器。

以上各式攪拌器的型式及其主要尺寸的關係見圖 1。

1. 槳式攪拌器。槳式攪拌器按其構造來說是最簡單的。它們是平的槳葉，安裝成與運動方向垂直或傾斜，並固定於軸上，槳葉隨軸在容器內旋轉。

在圖 1（見書後摺頁）上列出平槳的各種配置狀況。第 1 與第 2 種型式的攪拌器上具有二個與運動方向垂直裝置的槳葉。第 4, 5, 6 與 7 種型式的攪拌器具有四個槳葉。

攪拌器槳葉是由各種不同的材料製成的，材料的選擇決定於介質

及其他各種操作條件。漿葉可由鋼（普通鋼與特殊鋼）、生鐵、青銅、鋁、特種合金及木材等製成。

軸上的漿葉通常用特製的軸環（圖 2）或輪轂（圖 3）來固定。

在後一種情況下，漿葉 1 用輪轂 2 安在軸 3 上，軸的末端具有螺紋 4。在螺紋上旋上螺母 5，這樣漿葉就能堅牢地固定在軸上了。此外，在軸上的孔中有一個鍵 6，此鍵在漿葉旋轉時可以防

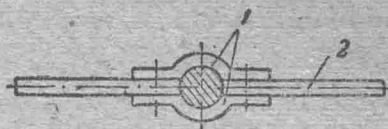


圖 2 攪拌器漿葉的固定（用軸環）

1—軸環；2—漿葉

止漿葉的滑動。爲了避免鬆開起見，螺母 5 用開口銷 7 來固定，在固定螺母後，再套上安全帽 8，此安全帽隔着一層襯墊壓在輪轂上，保護軸的螺紋和螺母不受攪拌物質的腐蝕作用。

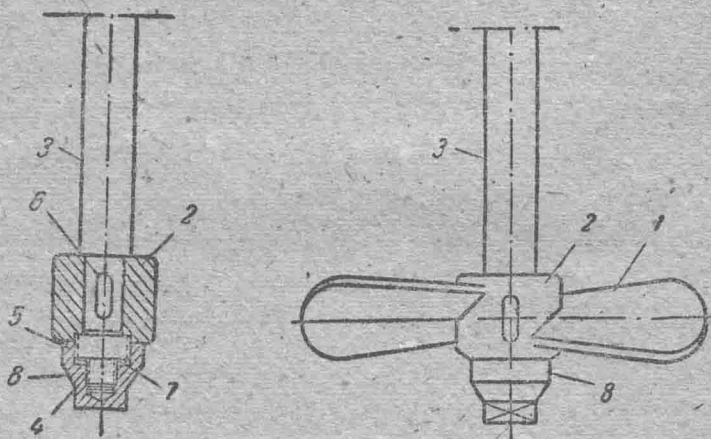


圖 3 漿葉的固定（用輪轂）

1—漿葉；2—輪轂；3—軸；4—螺紋；5—螺母；6—鍵；7—開口銷；8—蓋帽

在圖 1 上所畫出的攪拌器（第 8 種型式）是由幾個水平漿葉組成的，目前廣泛採用的框式攪拌器即屬於此種型式。這一類攪拌器有附加的垂直漿葉或傾斜漿葉，因此連成框形。框式攪拌器的旋轉速度是不大的，爲 20~80 轉/分。攪拌大量液體及黏性液體時，在設備中，

除使液體發生徑向運動外，還必須使之發生軸向運動。爲了達到這個目的，有時在進行攪拌的設備的壁上裝置折流擋板，圖4中畫出折流擋板的各種裝置情況：a) 直接安裝在壁上，b) 具有蛇管時，c) 離器壁有某些距離，z) 具有傾斜角的。

應該注意，無論擋板的數目或大小以及它們間的距離都不是隨意的。現已確定，如遵守下列關係時，則可達到最好的攪拌條件¹：

- 1) 擋板最適宜的寬度是設備直徑的 $\frac{1}{12} \sim \frac{1}{10}$ ；
- 2) 擋板的高度至少應爲攪拌器直徑的兩倍；
- 3) 當擋板個數等於四時，擋板應該與器壁垂直成 90° 角裝置；當設備直徑大於六公尺時，則擋板的個數能夠增加至六個。

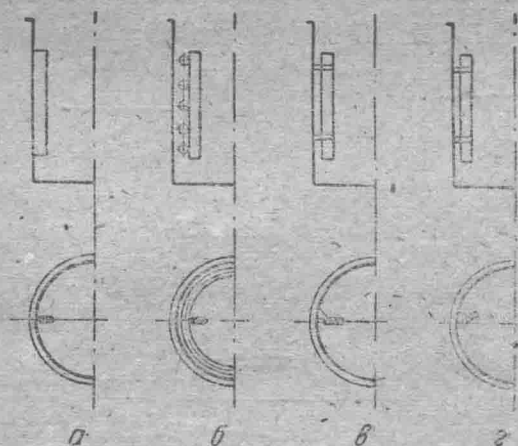


圖4 折流擋板的裝置方法 (a, b, c, z)

4) 若將擋板裝設在離器壁有某些距離之處(圖4c)，則擋板寬度應爲設備直徑的 $\frac{1}{12}$ (當器壁與擋板間距離等於擋板寬度 $\frac{1}{12}$ 時)；

5) 設備內具有蛇管時，宜將寬度爲設備直徑 $\frac{1}{12}$ 的擋板裝於蛇管的內圈。

6) 在攪拌黏滯液體及將固體溶解於液體中時，擋板宜裝成傾斜某一角度(圖4z)。在溶解的情況下，傾斜的擋板可以促進固體的粉碎並使之較快地溶解。

槳式攪拌器具有下列優點：

1. 構造簡單，製造的成本不高；
2. 應用這些攪拌器能達到相當高的攪拌效率；
3. 槳式攪拌器適用於纖維性的，結晶的和無定形的物質的緩慢溶解，並適用於保持纖維性物質成均勻的懸浮狀態；
4. 雖然，最新的資料證明：在適當地考慮到攪拌介質的性質的情況下，槳式攪拌器的轉速可以達到每分鐘 400 轉，槳式攪拌器一般地用於較低的轉速（框式的為 20—80 轉/分）。

槳式攪拌器的缺點如下：

1. 槳式攪拌器（指槳葉無傾斜度時）不適用於使比重較大的固體懸浮物以懸浮狀態漂浮在粘度較小或中等的液體中。因為這類攪拌器不能產生必需的上升力；
2. 槳式攪拌器在與槳葉垂直的方向上不能發生很好的攪拌，而引起液體產生旋轉運動並形成旋渦。但是裝設傾斜槳葉或折流擋板時這一缺點就可以避免，因為折流擋板在液體間可造成激動。

圖 5 是一個帶有三對槳葉的攪拌器，圖 6 是帶有傾斜槳葉的六葉攪拌器。箭號表示在攪拌時激起液流的方向。為了比較攪拌器在光滑的設備內和在有擋板的設備內操作時所發生液流方向的性質，設備左部無折轉擋板，右部則帶有擋板。具有擋板可減小設備內液體旋渦的深度和升起的高度。具有傾斜的槳葉（圖 6）可造成液流的軸向和徑向運動。這兩液流的強度隨旋轉速度的改變而改變，其中徑向的液流隨迴轉數的增加而增加。

減少槳葉數目，增加槳葉對水平面的傾斜角度和增加槳葉的高度時可減少軸向的液流。

由於產生液流運動的兩個方向相反的力（軸向的和徑向的）相互作用的結果，液體即被拋出（與攪拌器的軸成某一角度）。

將一種液體強烈地擴散到另一種液體中去（體積在 45000 公升以下）時，可用具有傾斜槳葉的槳式攪拌器。這種攪拌器並能攪拌固體物相（顆粒大小在 10 網目以下）含量小於 60% 的固體沉淀物。

根據上述槳式攪拌器的優點和缺點，可決定選擇何種槳式攪拌器

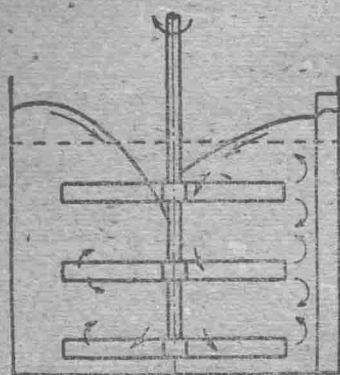


圖 5 具有三對葉葉的攪拌器攪拌時的液流方向

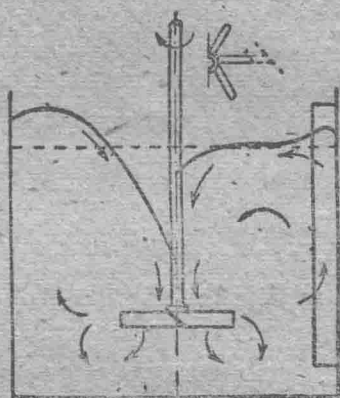


圖 6 六葉攪拌器攪拌時的液流方向

行攪拌。

2. **旋槳式攪拌器**。旋槳式攪拌器（圖 1 中第 11 和 12 兩種）的槳葉是沿全長逐漸傾斜的，而且這一傾斜角幾乎由近軸處的 0° 變至 90° （在槳葉末端）；這種推進器的表面是螺旋面的單元。

螺距或槳葉的高度由下式求得：

$$h = 2\pi r \operatorname{tg} \varphi$$

式中： r —槳葉波及之圓周半徑；

φ —槳葉的傾斜角。

由於傾斜角度的改變，在螺旋槳迴轉時，液體顆粒即沿所有的方向離開，結果產生保證高攪拌效率的對流。

槳葉數目一般為二或三（很少大於此數）。螺旋直徑為在其中進行攪拌的設備直徑的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$ 。

在某些結構中，螺旋槳裝設在短的導流筒中，此圓筒作為循環液流的導管。液體被螺旋槳吸入導流筒並由此排出。

圖 7 示雙葉螺旋槳在不帶折流擋板（左部）和帶有折流擋板（右部）的設備內攪拌時液流的方向。圖右方的垂直虛線表示導流筒，導

流筒的存在並不引起液流方向整個的改變。

只有在直徑較小而又較高的設備內或者在具有蛇管、導管等的設備內，安裝導流筒才是合適的。在這些情形下，導流筒有助於液流的軸向循環。

實踐證明在下列情況下適宜用螺旋槳：

- 1) 當攪拌黏度小的液體時；
- 2) 在裝備乳濁液（液體體積在 4500 公升以下）時；
- 3) 在攪拌固體物相（顆粒大小為 100 網目）的含量小於 10% 之沉澱物時。

螺旋槳式攪拌器有下列優點：

- 1) 價廉，製造簡單；
- 2) 在大的轉速時（200~1500 轉/分）需要的能量不多。

螺旋槳式攪拌器的缺點為：

- 1) 在攪拌黏度大的液體時攪拌效率小；
- 2) 由於螺旋槳尺寸的限制，僅能裝設在容積較小的設備內。

3. 渦輪攪拌器。渦輪攪拌器是一個圓盤或圓筒，具有小的葉片或通道。由於這樣的構造，渦輪攪拌器主要是產生徑向液流。

在圖 1 中表示具有離心輪狀圓盤的渦輪攪拌器（第 13 種）。當這種攪拌器轉動時，攪拌液沿軸線由中心孔而進入輪內，由各小葉片的作用而獲得加速度，然後再以高速度由輪週拋出。

圖 1 第 15 種為帶有固定環（環上有導向葉片）——即固定導輪的渦輪攪拌器。固定導輪把由渦輪出來的液流分配在徑向上。由於固定導輪的作用，液流得以由垂直方向勻調地完全改變為水平的徑向運動，動能的損失極小，[結果]徑向液流還具有足夠高的速度，以便達到設備的最遠部分。

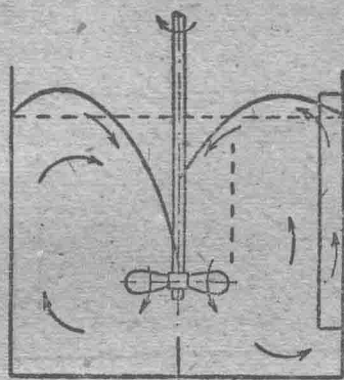


圖 7 螺旋槳式攪拌器攪拌時液流的方向

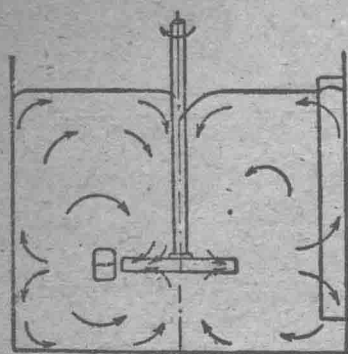


圖 8 渦輪攪拌器攪拌時液流的方向

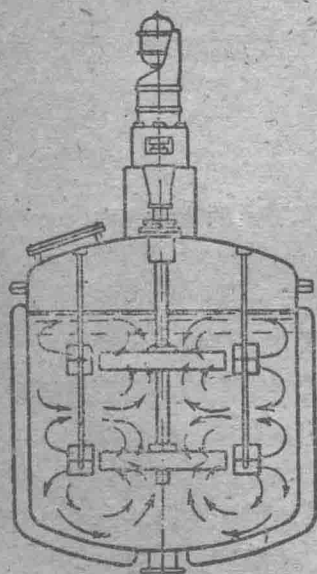


圖 9 在裝有兩個渦輪的設備內攪拌時液流的分佈情形

圖 8 表示帶有固定導輪（圖的左方）與折流擋板（圖的右方）的渦輪攪拌器操作時的液流方向。當具有固定導輪時，液體中不會產生有害的旋渦，而當沒有固定導輪時，即使具有折流擋板，也會使液流的循環惡化。

圖 9 表示裝有兩個（帶有固定導輪的）渦輪的設備，及其操作時的液流方向。

渦輪攪拌器一般轉速較高——從 400 到 2000 轉/分。

渦輪攪拌器的主要優點是當能量消耗不大時，攪拌效率較高，因此它用於製備稀薄的乳濁液、懸浮液、固體溶液等時是最合於理想的。

在下列過程中採用渦輪攪拌器最為合理：

- 1) 強烈攪拌在 60000 公升以內的液體；
- 2) 在達 45000 公升的較大體積內，猛烈地將液體分散；
- 3) 攪起含量小於 60% 固體物相的沉澱；

在巴克拉諾夫（Бакланов）的論文中，載有美國公司資料中有關於渦輪攪拌器轉速的選擇問題。但無論如何該項資料不允許用來作為攪拌器合理計算的依據。論文中所述攪拌器

的轉速範圍在 70~150 轉/分之間，這是違背渦輪的工作原則的，因為渦輪構造的目的就在於極度地增加轉速，以產生所需的離心力來攪拌