

АПАРАТИ ДЛЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДКИХ СЕРЕДОВИЩ

План лекції

- 1 Апарати для перемішування.
- 2 Механічне перемішування розчинів і пульп.
- 3 Розрахунок мішалки.

1 Апарати для перемішування

Перемішування – обов’язкова умова успішного проведення багатьох найрізноманітніших технологічних операцій. При перемішуванні частинки рідини або сипучого матеріалу багаторазово переміщуються в об’ємі апарата одна відносно другої під дією імпульсу, що передається перемішуваному середовищу, від механічної мішалки або струменя рідини, пари або газу. Перемішування може також йти мимовільно, наприклад за рахунок дифузії. Мимовільне перемішування відбувається дуже повільно, тому в промисловості майже не застосовується.

Перемішування широко застосовується в металургійній промисловості для вилуговування та приготування розчинів і пульп. За допомогою перемішування досягається тісне зіткнення частинок та безперервне оновлення поверхні взаємодії речовин.

Цілі процесу перемішування:

- прискорення перебігу хімічних реакцій і процесів розчинення твердих речовин;
- забезпечення рівномірного розподілу твердих частинок в об’ємі рідини або забезпечення рівномірного розподілу і дроблення до заданої дисперсності газу або рідини в об’ємі рідини;
- інтенсифікація теплообмінних (нагрівання або охолодження) та масообмінних (дифузійних) процесів в гомогенних і гетерогенних середовищах.

В результаті перемішування можна отримувати однорідні розчини, емульсії і суспензії, пульпи.

Перемішування проводять як в реакційних апаратах (автоклавах), так і в спеціальних апаратах (апаратах з мішалками), а також в проміжних апаратах, у трубопроводах і сховищах.

Найбільшого поширення в промисловості набули наступні способи перемішування:

– пневматичне перемішування – барботаж газу або пари через рідке середовище;

– циркуляційне перемішування – багаторазове прокачування рідини (газу) через робочу зону за допомогою насосів або вентиляторів;

– механічне перемішування – лопатевими або іншими мішалками з обертальним (рідше – поступальним) їх рухом.

Крім того, для перемішування середовищ використовують і ряд інших прийомів: використання нерухомих турбулізаторів в потоці середовища, що підлягає перемішуванню; взаємодія перемішуваних середовищ (інжекція, зустрічні струмені); вібраційне і пульсаційне перемішування та ін.

Пневматичне перемішування здійснюється шляхом пропускання газу через шар перемішуваної рідини. Стислий газ (зазвичай повітря) поступає в апарат, наповнений рідиною. Газ розподіляється барботером, що є горизонтально розташованою у днища апарата перфорованою трубою. Для більш рівномірного розподілу газу за об'ємом апарата труби зігнуті по колу або спіралі. Іноді барботер виконують у вигляді ряду паралельних прямих труб. Газ, що виходить через отвори в трубах, перемішує рідину у вертикальному і горизонтальному напрямках.

Барботування можна здійснювати в апаратах будь-якої форми. Витрата енергії при барботуванні більша, ніж при механічному перемішуванні. Витрата стислого повітря під час барботування складає 0,4–1,0 м³/хв. залежно від потрібної інтенсивності перемішування. Перемішування повітрям можна застосовувати для рідких середовищ з в'язкістю до 0,2 Па·с.

Пневматичне перемішування найефективніше у випадку необхідності роботи з агресивними середовищами, коли інші перемішуючі пристрої (мішалки, насоси) швидко виходять з ладу. Спосіб економічно вигідний, коли необхідно окисляти середовище, що перемішується, або газ утворюється в результаті хімічної реакції і не знаходить застосування на виробництві.

Перевагами способу є простота схеми, висока інтенсивність перемішування. Недоліки – віднесення бризок та супутні йому втрати корисної рідини.

Циркуляційне перемішування здійснюється за допомогою насосів (відцентрових або пропелерних), розташованих зовні або всередині об'єму

перемішуваного рідкого середовища (пульпи, суспензії, емульсії тощо). У першому випадку циркуляцію називають зовнішньою, в другому – внутрішньою.

Кратність циркуляції – це відношення секундної продуктивності циркуляційного насоса до об'єму рідини у апараті.

При зовнішньому циркуляційному перемішуванні рідина, що знаходиться в апараті, забирається зовнішнім насосом і повертається в той же робочий об'єм в апараті. При внутрішній циркуляції робоче колесо відцентрового насоса (без корпусу) засмоктує і викидає рідину по його периферії, залучаючи до руху весь робочий об'єм рідини. У обох варіантах циркуляційного перемішування багаторазове прокачування рідкого середовища через робочий об'єм приводить до вирівнювання властивостей цього середовища в різних частинах апарата.

У разі перемішування в'язких рідин і густих пульп витрати енергії істотно зростають (перш за все через швидке збільшення потрібних кратностей циркуляції). Це приводить до помітного дорожчання циркуляційного перемішування порівнянно з використанням механічних мішалок. Не можна також ігнорувати можливу корозію трубопроводів і апаратури, що спричиняється циркулюючою під натиском рідиною.

Достоїнствами циркуляційного перемішування є простота схеми, висока інтенсивність перемішування.

Механічне перемішування в рідкому середовищі здійснюється за допомогою мішалок різного типу. Мішалка найчастіше є комбінацією лопатей, насаджених на вал, що обертається. Лопаті мішалок можуть мати різноманітну геометричну форму, яка визначає назву мішалки.

2 Механічне перемішування розчинів і пульп

Механічні перемішувачі пристрої складаються з мішалки, вала і приводу. Мішалка є робочим органом пристрою, її закріплюють на вертикальному, горизонтальному або похилому валу. Привід здійснюється безпосередньо від електродвигуна (для швидкохідних мішалок) або через редуктор або клинопасову передачу.

Робота апарата з мішалкою залежить не тільки від типу і конструкції перемішувача, але і від типу посудини, в якій воно встановлено.

Дія мішалки в апараті з відбивними перегородками буде зовсім іншою, ніж в апараті без перегородок, і т.д.

Обертальний рух рідини спричиняється тим, що лопаті мішалки чинять тиск на рідину певною частиною своєї поверхні.

Мішалки умовно ділять на групи, що створюють окружний (тангенціальний) потік – це лопатеві і якірні мішалки; радіальний потік – деякі типи турбінних мішалок; осьовий потік – пропелерні мішалки.

Мішалки, що обертаються, зазвичай встановлюють в апаратах циліндричної форми з плоским або еліптичним днищем. У прямокутних посудинах такі мішалки не забезпечують повного перемішування за всією площею посудини: у них утворюються застійні зони. У апаратах з опуклими днищами перемішування краще, ніж в апаратах, що мають плоскі днища.

Мішалки, що обертаються, розділяються на:

- тихохідні – частота обертання 15–80 об/хв, окружна швидкість на кінцях лопатей близько 1 м/с (листові, рамні, лопатеві, якірні мішалки);
- швидкохідні – частота обертання 100–1800 об/хв, окружна швидкість близько 10 м/с (дисккові, пропелерні та турбінні).

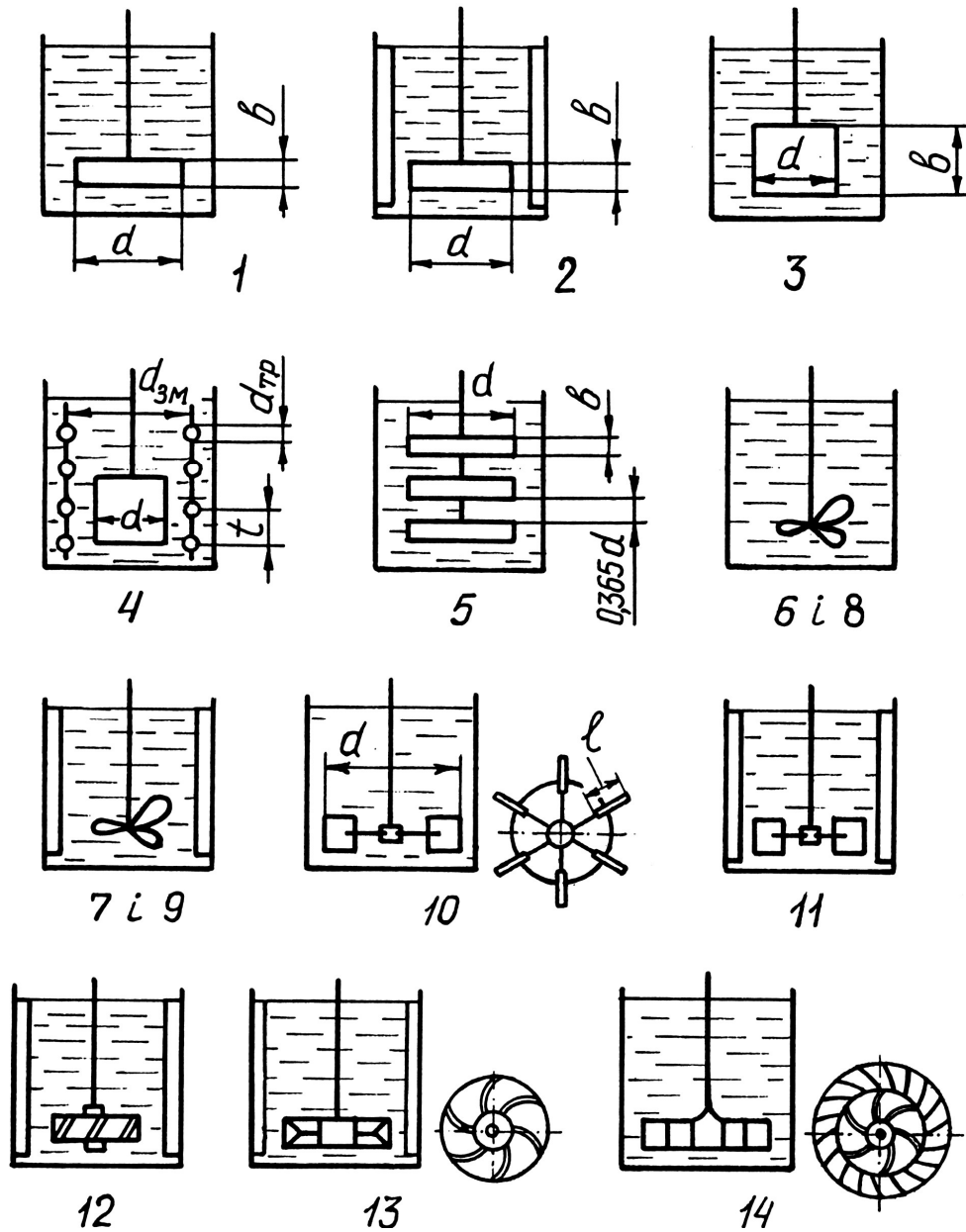
Листові мішалки прості у виготовленні і достатньо ефективні при перемішуванні рідин незначної в'язкості (не більше 0,05 Па·с). Вони застосовуються при процесах розчинення, розбавлення, прискорення деяких хімічних реакцій, при теплообмінних процесах.

В деяких випадках для розтину рідини на окремі струмені (для посилення ефекту перемішування) у лопатях роблять декілька несиметрично розташованих отворів.

Лопатеві мішалки (рис. 1.5, поз. 1–5) прості за конструкцією і зручні в монтажі. Їх застосовують для перемішування середовищ середньої в'язкості (7–10 Па·с) і для розмішування легких суспензій, а також для підтримки таких суспензій у зваженому стані.

Для посилення ефективності перемішування апарат можна обладнати відбивними перегородками – вертикальними планками, що прикріплюються до стінок. Ширина перегородок зазвичай складає 0,10–0,12 діаметра апарата.

Недоліком лопатевих мішалок є низька інтенсивність перемішування (вони створюють головним чином периметричну циркуляцію рідини). Проте вони поширено застосовуються в металургії через простоту пристрою і низьку вартість.



1, 3 – дволопатеві без перегородок; 2 – дволопатева з перегородками;
 4 – дволопатева з змійовиком; 5 – шестилопатева без перегородок;
 6, 8 – пропелерні без перегородок; 7, 9 – пропелерні з перегородками;
 10 – відкрита турбінна з плоскими вертикальними лопатками та без перегородок;
 11 – відкрита турбінна з плоскими вертикальними лопатками та з перегородками;
 12 – відкрита турбінна з плоскими похилими лопатками та з перегородками;
 13 – закрита турбінна з лопатками та з перегородками;
 14 – закрита турбінна з лопатками і направляючим апаратом (статором) з лопатками та без перегородок

Рисунок 1 – Основні типи мішалок

Якірні мішалки застосовують для перемішування в'язких (1,0–1,5 Па·с, а іноді і більше) і застигаючих рідин.

Частота обертання якірної мішалки приймається зазвичай 20–80 об/хв ($0,33\text{--}1,33\text{ с}^{-1}$). Форма якірної мішалки повторює профіль днища апарата.

Рамні мішалки – різновид якірних мішалок. Вони складаються з горизонтальних і вертикальних, а іноді і похилих елементів.

Рамні мішалки встановлюються в апаратах місткістю 100 м^3 і більше. Вони застосовуються для тих же середовищ, що й якірні мішалки.

Дискові мішалки застосовують для перемішування в'язких рідин. Плоска дискова мішалка забезпечена розведеними по черзі вгору і вниз зуб'ями.

При швидкому обертанні мішалка залучає до руху прилеглі до неї поверхневі шари рідини. Поступово цей рух розповсюджується, і через деякий час вся рідина приходить в обертання.

У одному апараті встановлюють по декілька дисків на одному валу. Об'єм перемішуваної рідини зазвичай не перевищує 4 м^3 . Окружна швидкість дисків складає 10–35 м/с.

Дискові мішалки використовують при проведенні багатьох безперервних процесів, наприклад для екстракції.

Пропелерні мішалки (рис. 1.5, поз. 6–9) застосовуються для перемішування рідин з в'язкістю близько 3,6–4,0 Па·с. Вони працюють при високих частотах обертання (400–1800 об/хв, тобто $6,5\text{--}30\text{ с}^{-1}$).

Така мішалка створює інтенсивне перемішування внаслідок нерівності швидкостей струменів рідини в різних перетинах апарата і завдяки багаторазовій зміні напрямку їх руху під час удару об днище апарата та об вільну поверхню рідини.

Пропелерні мішалки знаходять дуже широке застосування: перемішування рідин різної в'язкості, приготування емульсій, каламучення рідин, що містять твердий осад, проведення хімічних реакцій. Вважають, що вони придатні при об'ємі перемішуваної рідини до 7 м^3 .

Пропелерні мішалки слід встановлювати в апаратах тільки з опуклим днищем, при плоскому днищі в апараті утворюються застійні зони (окрім мішалок з горизонтальними валами). Пропелерні мішалки встановлюються на вертикальних, похилих і горизонтальних валах. На одному валу, залежно від глибини посудини і властивостей перемішуваної рідини, встановлюють одну, дві або три мішалки.

Іноді для поліпшення циркуляції рідини, пропелер укладають в коротку трубу (дифузор). Дифузори застосовують іноді і для мішалки, що посаджена на горизонтальному валу.

Для посилення циркуляції рідини апарати з вертикальними пропелерними мішалками можуть обладнуватися відбивними перегородками.

Турбінні мішалки застосовують для перемішування рідин як малої, так і великої в'язкості (до 20 Па·с). Їх використовують для швидкого розчинення, емульгування, диспергування, перемішування суспензій, взмучування осадів, абсорбції газів, а також інтенсифікації теплопередачі.

При роботі в турбулентному режимі споживана турбінними мішалками потужність практично не залежить від в'язкості перемішуваної рідини, тому вони особливо придатні для роботи з рідинами, в'язкість яких змінюється протягом перемішування.

Турбінні мішалки працюють за принципом відцентрового насоса, тобто всмоктують рідину в середину і за рахунок відцентрової сили викидають її до периферії. Частота обертання турбінних мішалок дуже висока – від 400 до 2000 об/хв (тобто 6,5–35 с⁻¹). Турбінні мішалки забезпечені лопатками і мають чітко обкреслений ротор. Їх роблять відкритими і закритими, з нерухомим направляючим апаратом (статором) або без нього.

Відкрита турбінна мішалка (рис. 1.5 поз.10, 11) є диском з радіальними лопатками. На рис. 1.5, поз. 13 показана закрита турбіна також з прямими радіальними лопатками. Рідина поступає зверху і знизу на лопатки і потім викидається в радіальному напрямі. Турбінна мішалка з направляючим апаратом зображена на рис. 1.5, поз. 14. Завдяки статору зміна напрямку рідини від вертикального до горизонтального (радіального) здійснюється повільно, і радіальний потік зберігає більшу швидкість, завдяки чому досягає віддалених частин апарата. За наявності статора воронка на поверхні перемішуваної рідини не утворюється, тоді як при роботі турбінних мішалок, що не мають статора, можливо утворення воронки навіть за наявності відбивних перегородок.

Турбінна мішалка добре перемішує шар рідини на глибину, рівну діаметру апарата. Турбінні мішалки є найбільш складними і мають найбільшу вартість зі всіх описаних конструкцій.

3 Розрахунок мішалки

Потужність, споживана пристроєм, що перемішує, залежить від багатьох факторів: форма і розміри апаратів і перемішуючих органів, наявність перешкод: змійовиків, гільз для термометрів, труб, відбивних перегородок і т.п. Визначення потужності, що витрачається при механічному перемішуванні, є одним зі складних завдань гідродинаміки.

Методи і розрахункові формули, прийняті в даний час для визначення потужності, ще не можуть вважатися досить повними. При проведенні технологічних процесів перемішуване середовище може змінювати температуру і фізичні властивості (густина, в'язкість), що відбивається на потужності, яка споживається мішалкою. Тому у відповідальних випадках результати розрахунків перевіряють на лабораторних і пілотних установках.

Потужність, споживану мішалкою, можна розрахувати, розглядаючи роботу мішалки як роботу насоса:

$$N = V_{сек} \cdot \Delta P, \quad (1)$$

де N – потужність, споживана мішалкою, Вт;

$V_{сек}$ – витрата рідини, що протікає через мішалку, м³/с;

ΔP – тиск, створюваний мішалкою, Па.

Витрату рідини $V_{сек}$ можна обчислити, припускаючи, що рідина проходить через бічну поверхню циліндра з діаметром, рівним діаметрові мішалки d , і висотою, рівною висоті лопаті мішалки b , зі швидкістю, пропорційною окружній швидкості кінця лопаті мішалки:

$$V_{сек} \sim \pi \cdot d \cdot b \cdot \omega \sim n \cdot d^3, \quad (2)$$

де $\omega = \pi \cdot n \cdot d$ – окружна швидкість мішалки, м/с;

d – діаметр лопаті мішалки, м;

n – частота обертання мішалки, об/с.

Таким чином, витрата рідини, що протікає через мішалку, пропорційна добуткові куба діаметра мішалки на частоту обертання n . Висоту мішалки b можна виразити через діаметр мішалки d , тому що для нормалізованих мішалок відношення b/d є визначеним і рівним 0,1; 0,2 і т.д.

Тиск ΔP , створюваний мішалкою, пропорційний динамічному тискові:

$$\Delta P \sim \rho \cdot \omega^2 \sim \rho \cdot n^2 \cdot d^2, \quad (3)$$

де ρ – густина рідини, яку перемішують, кг/м^3 .

Тоді за формулою (1) одержимо:

$$N \sim \rho \cdot n^3 \cdot d^5. \quad (4)$$

Таким чином, з порівняння формул (1) і (4) випливає, що номінальна потужність, споживана мішалкою, може бути розрахована за рівнянням:

$$N = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5, \quad (5)$$

де K_N – безрозмірний комплекс, що називається критерієм потужності.

Величину K_N визначають залежно від типу мішалки (рис. 1.2) та режиму руху рідини, що перемішується, по таблицях або графіках $K_N = f(\text{Re})$, побудованих за дослідними даними (рис. 1.6).

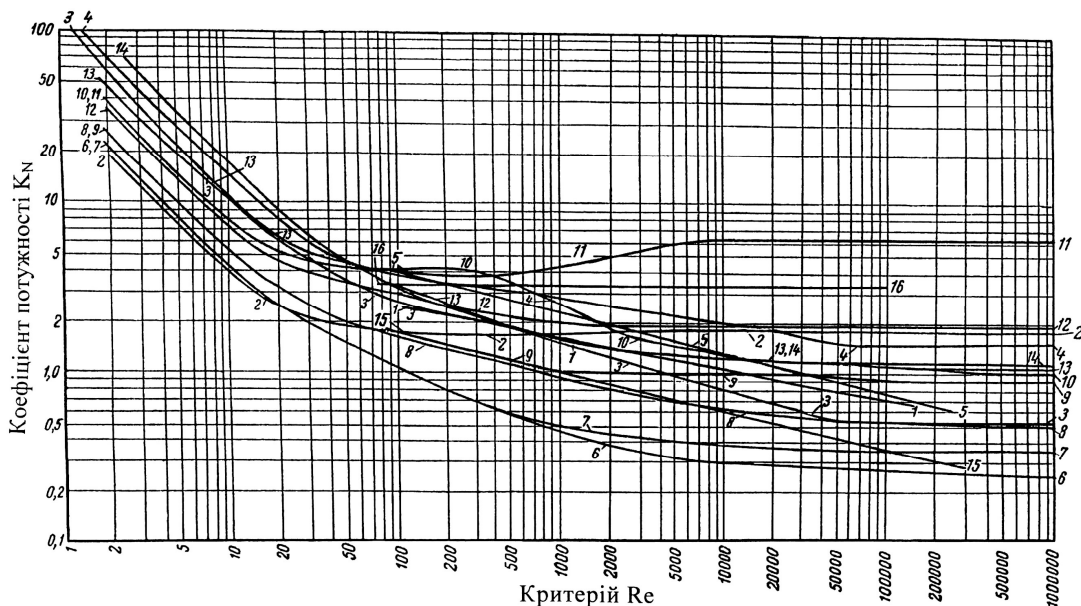


Рисунок 1.6 – Залежність коефіцієнта потужності K_N від критерію Re для мішалок різних типів (цифри відповідають номерам мішалок у табл.1.1)

Величина критерію Рейнольдса для будь-якої мішалки (табл. 1.1) визначається за формулою:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot \omega \cdot d}{\mu} = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu}, \quad (6)$$

де μ — динамічна в'язкість рідини, Па·с.

На рис.1.6 наведені дослідні значення K_N як функції від критерію Re для мішалок різних типів при обумовлених відношеннях діаметра D посудини, висоти H рівня рідини, ширини b лопаті та діаметра d лопаті мішалки (D/d , H/D , b/d), а також для пропелерних мішалок при відношенні кроку гвинта до діаметра посудини s/d , що дорівнює 1 або 2. За рис. 1.6 знаходять значення K_N , та підставляючи його до формули (5), визначають потрібну потужність.

Однак величини K_N , одержані за графіком, будуть точними тільки для мішалок, геометрично подібних тим (табл. 1), до яких відносяться дослідні дані. Тому, у випадку відсутності геометричної подібності, значення K_N , що знайдено за рис. 1.6, треба помножити на відповідні поправочні коефіцієнти:

$$\begin{aligned} f_D &= \left(\frac{D}{\alpha \cdot d} \right)^a, & f_b &= \left(\frac{b}{\beta \cdot d} \right)^k, \\ f_l &= \left(\frac{l}{0,25 \cdot d} \right)^m, & f_t &= \left(\frac{t}{0,1 \cdot D} \right)^r, \\ f_H &= \left(\frac{H}{D} \right)^h, & f_s &= \left(\frac{s}{d} \right)^p, & f_N &= \left(\frac{N}{4} \right)^n, \end{aligned} \quad (7)$$

де $\alpha = D/d$ — для модельної мішалки (табл. 1);

$\beta = b/d$ — для модельної мішалки (табл. 1);

b і l — ширина та довжина лопаті, м;

t — ширина перегородки, м;

Таблиця 1 – Характеристики мішалок та посудин

№	Тип мішалки	Характеристика мішалки при $H/D = 1$			Характеристика посудини
		$\alpha = D/d$	$\beta = b/d$	s/d	
1	Дволопатова	3	0,25	–	Без перегородок
2	Дволопатова	3	0,167	–	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
3	Дволопатова	2	0,885	–	Без перегородок
4	Дволопатова	2	0,885	–	3 змійовиком ($t=0,12 \cdot d$, $d_{3M}=1,9 \cdot d$, $d_{TP}=0,066 \cdot d$)
5	Шестилопатова	1,11	0,066	–	Без перегородок
6	Пропелерна	3	–	1	Без перегородок
7	Пропелерна	3	–	1	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
8	Пропелерна	3	–	2	Без перегородок
9	Пропелерна	3	–	2	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
10	Відкрита турбінна з 6 плоскими вертикальними лопатками	3	0,2 ($l/d=0,25$)	–	Без перегородок
11	Відкрита турбінна з 6 плоскими вертикальними лопатками	3	0,2 ($l/d=0,25$)	–	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
12	Відкрита турбінна з 8 плоскими похилими лопатками	3	0,125 ($l/d=0,25$)	–	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
13	Закрита турбінна з 6 лопатками	3	–	–	3 4 перегородками шириною $0,1 \cdot D$
14	Закрита турбінна з 6 лопатками та направляючим апаратом (статором) з 6 лопатками	3	–	–	Без перегородок

Примітка. Номер типу відповідає цифрі під схемою мішалки на рис. 1.5.

Таблиця 2 – Значення показників степенів у формулах (1.7)

Тип мішалки	Показник ступеня						
	a	h	k	m	p	r	n
Лопатеві без перегородок	1,1	0,6	0,3	–	–	–	–
Лопатеві з перегородками	1,1	0,6	0,3	–	–	0,3	0,4
Пропелерні без перегородок	0,93	0,6	–	–	1,0	–	–
Пропелерні з перегородками	0	0	–	–	1,7	0,3	0,4
Турбінні без перегородок	0,93	0,6	1,0	1,5	–	–	–
Турбінні з перегородками	0	0	1,0	1,5	–	0,3	0,4

N – кількість перегородок.

Значення показників степенів у рівняннях поправочних коефіцієнтів (7) можна приймати за табл. 2.

При наявності в апараті додаткового обладнання (змійовиків, труб та інше), а також при великій шершавості стінок посудини витрата енергії на перемішування збільшується. Орієнтовно можна використовувати такі поправочні коефіцієнти до значення K_N :

гільза для термометра	$f_{\Gamma} = 1,1$;
труба	$f_{TP} = 1,2$;
посудина з шершавими стінками	$f_{III} = 1,1 - 1,2$.

При пуску мішалки в рух енергія витрачається не тільки на подолання тертя, а також й на виведення рідини зі стану спокою, тобто на подолання сил інерції. Однак пускова потужність перевищує робочу не більш, як у двічі та витрачається протягом короткого часу. Відповідно тому електродвигун завжди вибирають за робочою потужністю мішалки N_p , враховуючи можливість короткочасного збільшення моменту кручення на валі електродвигуна.

Розглядаючи рух рідини в апараті з мішалкою як окремий випадок явища руху рідини, для опису процесу при сталому режимі можна скористатися загальним критеріальним рівнянням:

$$E_U = \varphi(\text{Re}, \text{Fr}, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots),$$

де $E_U = \Delta P / (\rho \cdot \omega^2)$ – критерій Ейлера (міра відношення сил тиску до сил інерції);
 $Re = \rho \cdot \omega \cdot d / \mu$ – критерій Рейнольдса (міра відношення сил інерції до сил в'язкості);

$Fr = \omega^2 / (g \cdot d)$ – критерій Фруда (міра відношення сил інерції до сили ваги);

$\Gamma_1, \Gamma_2, \dots$ – симплекси геометричної подоби;

ΔP – втрати тиску, Н/м²;

μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с;

g – прискорення вільного падіння, що дорівнює 9,81 м/с².

Оцінку режиму руху рідини, що переміщується, виконують за допомогою безрозмірного комплексу величин, який називається відцентровим критерієм Рейнольдса Re_{ω} (за формулою (1.6), у якому швидкість рідини виражена через частоту обертання мішалки і її діаметр). Вважають, що критичне значення цього критерію $Re_{\omega} \approx 50$.

Якщо число Рейнольдса для даної мішалки менше 50, то це значить, що рідина переміщується недостатньо інтенсивно і спостерігається так званий *ламінальний режим* її руху. При ламінарному гідродинамічному режимі частинки рідини рухаються паралельно одна одній в напрямку руху потоку, не переходячи з одного шару рідини в інший.

При значеннях числа Рейнольдса більше 50 інтенсивність перемішування зростає. У рідині виникають вихори, що хаотично переміщуються в об'ємі рідини, що рухається, і хаотичне перемішування окремих шарів. Такий гідродинамічний режим має назву *турбулентний*. Саме він забезпечує вимушену циркуляцію потоку в апараті.

При значеннях числа Рейнольдса більше 10000 вимушена циркуляція забезпечує в апараті з мішалкою інтенсивну тримірну течію всієї маси рідини (наступає *розвинений турбулентний режим*).