

## Лекция №5. **Перемешивание в жидких средах**

Перемешивание жидких сред, пастообразных и твердых сыпучих материалов - один из наиболее распространенных процессов химической технологии. Чаще всего в технике встречаются процессы перемешивания жидких сред. Под *перемешиванием* жидких сред понимают процесс многократного относительного перемешивания макроскопических элементов объема жидкой среды под действием импульса, передаваемого среде механической мешалкой, струей газа или жидкости.

*Перемешивание* жидких сред применяют для решения следующих основных задач: 1) интенсификации процессов тепло- и массопереноса, в том числе и при наличии химической реакции; 2) равномерного распределения твердых частиц в объеме жидкости (при приготовлении суспензий), а также равномерного распределения и дробления до заданной дисперсности жидкости в жидкости (при приготовлении эмульсий) или газа в жидкости (при барботаже).

Перемешивание жидких сред может осуществляться различными способами: вращательным или колебательным движением мешалок (механическое перемешивание); барботажем газа через слой жидкости (пневматическое перемешивание); прокачиванием жидкости через турбулизующие насадки; перекачиванием жидкости насосами по замкнутому контуру (циркуляционное перемешивание).

## Перемешивание в жидких средах

Аппараты с перемешивающими устройствами широко используют в химической технологии для проведения таких процессов, как выпаривание, кристаллизация, абсорбция, экстракция и др.

При перемешивании градиенты температур и концентраций в среде, заполняющей аппарат, стремятся к минимальному значению. Поэтому аппараты с мешалкой, например, по структуре потоков наиболее близки к модели идеального смешения.

Процесс перемешивания характеризуется интенсивностью и эффективностью, а также расходом энергии на его проведение.

*Интенсивность перемешивания* определяется количеством энергии  $N$ , подводимой к единице объема  $V$  перемешиваемой жидкости в единицу времени ( $N/V$ ) или к единице массы перемешиваемой жидкости ( $N/V\rho$ ). Интенсификация процесса перемешивания позволяет повысить производительность установленной аппаратуры или снизить объем проектируемой.

Под *эффективностью перемешивания* понимают технологический эффект процесса перемешивания, характеризующий качество проведения процесса. В зависимости от назначения перемешивания эту характеристику выражают различным образом. Например, при использовании перемешивания для интенсификации тепловых, массообменных и химических процессов его эффективность можно выражать соотношением кинетических коэффициентов при перемешивании и без него. При получении суспензий и эмульсий эффективность перемешивания можно характеризовать равномерностью распределения фаз в суспензии или эмульсии.

# Механическое перемешивание.

## Движение жидкости в аппарате с мешалкой

В промышленности для перемешивания в основном используют механические мешалки с вращательным движением. При работе таких мешалок возникает сложное трехмерное течение жидкости (тангенциальное, радиальное, аксиальное) с преобладающей окружной составляющей скорости. Тангенциальное течение, образующееся при работе всех типов мешалок, является первичным. Обычно среднее значение окружной (тангенциальной) составляющей скорости ( $w_T$ ) существенно превышает средние значения как радиальной ( $w_p$ ), так и аксиальной, или осевой ( $w_a$ ), составляющих.

Для вращательного движения жидкости систему уравнений Навье-Стокса можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{w_T^2}{r}, \quad \mu \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (w_T r)}{\partial r} \right) = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g. \quad (1)$$

где  $w_T$  - тангенциальная составляющая скорости.

В случае плоского вращательного движения вокруг оси  $z$  ( $w_p = 0$ ,  $w_a = 0$ ) система (1) имеет общее решение:

$$w_T = C_1 r + C_2 / r \quad (2)$$

При  $r = 0$ ,  $w_T = 0$  и соответственно  $C_2 = 0$ . Для области, находящейся в центре вращающейся массы жидкости, при установившемся движении  $w_T = \omega r$  (где  $\omega$  - угловая скорость). Таким образом, вдоль оси вращения жидкости в области  $0 < r < r_B$  существует цилиндрический вихрь радиусом  $r_B$ . Из уравнения (2) следует, что в области вне цилиндрического вихря  $w_T = C_2 / r$ , откуда  $C_2 = \omega r_B$ . Тогда для периферийной области тангенциальной составляющей скорости

$$w_T = \omega r_B / r$$

# Механическое перемешивание.

## Движение жидкости в аппарате с мешалкой

Сопоставление теоретической и экспериментальной кривой тангенциальных скоростей жидкости в аппарате с вращающейся мешалкой (рис. 1) показывает, что существует некоторая переходная область **II** между областью центрального вихря **I** и периферийной областью **III**.

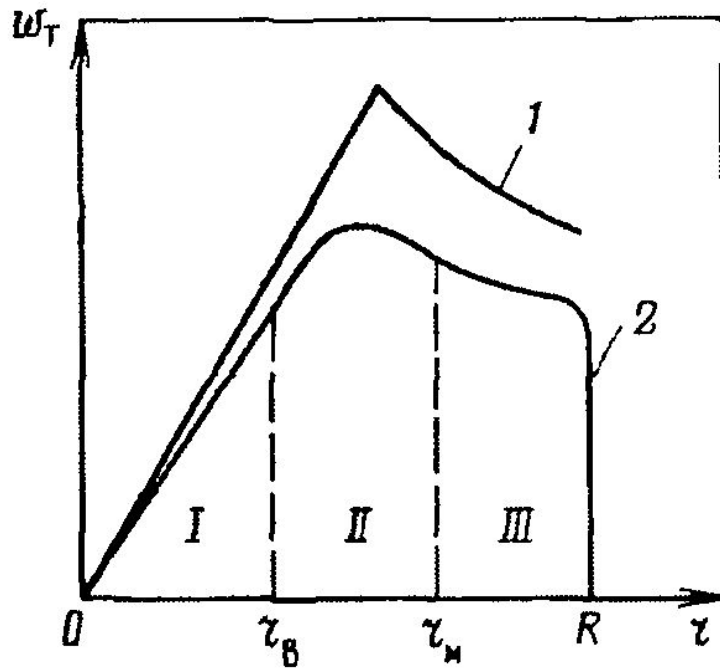


Рис. 1. Теоретическая (1) и экспериментальная (2) кривые тангенциальных скоростей жидкости в аппарате с вращающейся мешалкой: I - область центрального цилиндрического вихря, II - переходная область, III - периферийная область

## Механическое перемешивание.

### Движение жидкости в аппарате с мешалкой

Под действием центробежной силы, возникающей при вращении любого типа мешалки с достаточно большой частотой, жидкость стекает с лопастей в радиальном направлении. Дойдя до стенки сосуда, этот поток делится на два: один движется вверх, другой - вниз. Возникновение радиального течения приводит к тому, что в переходной области создается зона пониженного давления, куда и устремляется жидкость, текущая от свободной поверхности жидкости и от дна сосуда, т.е. возникает аксиальный (осевой) поток, движущийся в верхней части сосуда сверху вниз к мешалке.

Таким образом, в аппарате создается устойчивое аксиальное течение, или устойчивая циркуляция (рис. 2).

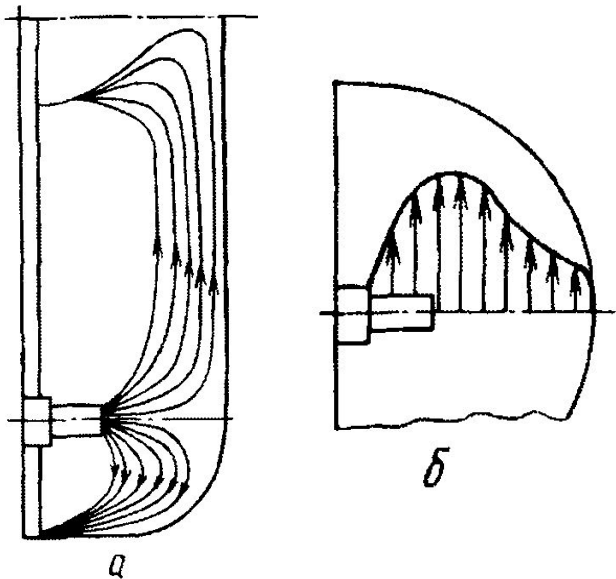


Рис. 2. Траектории движения частиц жидкости в аппарате с мешалкой (а) и эпюра скоростей (б)

## Механическое перемешивание. Движение жидкости в аппарате с мешалкой

Объем циркулирующей жидкости в единицу времени в аппарате с мешалкой называют *насосным эффектом*, который является важной характеристикой мешалки: чем больше насосный эффект, тем лучше в данном аппарате идет процесс перемешивания. В случае преимущественно радиального потока, создаваемого мешалкой, насосный эффект  $V_p$  определяется по выражению

$$V_p = \pi d_m b w_p,$$

где  $w_p$  - средняя радиальная скорость жидкости, причем  $w_p \sim d_m n$ .

Поскольку для геометрически подобных мешалок отношение  $b/d_m$  - величина постоянная, можно записать

$$V_p = C_p n d_m^3 \quad (3)$$

где  $C_p$  - постоянная для данного типа мешалок.

## Механическое перемешивание. Движение жидкости в аппарате с мешалкой

В случае преимущественно аксиального (осевого) потока, создаваемого мешалкой, насосный эффект  $V_o$  выражается следующим соотношением:

$$V_o = \pi d_M^2 w_o / 4,$$

где  $w_o$  - средняя скорость жидкости в осевом направлении, причем  $w_o \sim nS$  (где  $S$  - шаг мешалки).

Поскольку для геометрически подобных мешалок  $S/d_M = \text{const}$ , получим выражение

$$V_o = C_o n d_M^3, \quad (3a)$$

идентичное уравнению (3). Таким образом, насосный эффект сильно зависит от конструкции и частоты вращения мешалки. Существенное влияние на него оказывает вязкость перемешиваемой жидкости: с ростом вязкости насосный эффект уменьшается, что снижает эффективность процесса перемешивания.

Модифицированное число Рейнольдса для мешалок  $Re_M$  в случае механического перемешивания жидкой среды выражается следующим образом (с учетом того, что  $\omega = \pi d_M n$ ):

$$Re_M = n d_M^2 \rho / \mu \quad (4)$$

где  $d_M$  - диаметр мешалки, м;  $n$  - частота вращения мешалки,  $c^{-1}$ .

При *ламинарном движении* ( $Re_M < 10$ ) в аппаратах с мешалкой возникает слаборазвитое трехмерное течение со свободной циркуляцией. Центральные цилиндрические вихри отсутствуют, поскольку их диаметры оказываются меньше диаметра вала мешалки. В аппарате реально существует периферийная и переходная области течения.

По мере *турбулизации потока* ( $10 < Re_M < 10^3$ ) формируется вынужденная циркуляция, и в аппарате не только существуют периферийная и переходная области, но и намечается область центральных цилиндрических вихрей.

При *развитом турбулентном течении* ( $Re_M > 10^4$ ) вынужденная циркуляция обеспечивает интенсивное трехмерное течение всей массы жидкости в аппарате. Область центральных цилиндрических вихрей развивается, достигая (по порядку величины) размеров переходной и периферийной областей.

При работе вращающихся механических мешалок на поверхности жидкости возникает воронка, глубина которой растет с увеличением частоты вращения мешалки (в пределе она может достигать дна сосуда). Это явление отрицательно сказывается на эффективности перемешивания и значительно снижает устойчивость работы мешалки. На глубину и форму воронки большое влияние оказывают диаметр мешалки и частота ее вращения.



## Энергия, затрачиваемая на процесс перемешивания

Величину  $K_N$  принято называть *критерием мощности*, или модифицированным критерием Эйлера (для мешалок); его называют также центробежным критерием Эйлера.

$$K_N = N/(\rho n^3 d_M^5) \quad (5)$$

где  $N$  – мощность, затрачиваемая лопастью мешалки на преодоление сопротивления жидкости.

Действительно, критерий Эйлера  $Eu = \Delta P/(\rho w^2)$ , причем  $w \sim nd$ . Гидравлическое сопротивление при вращении мешалки в жидкой среде  $\Delta P \sim N/(nd_M^3)$ .

Тогда

$$Eu_M = N/(\rho n^3 d_M^5) = K_N$$

Тогда обобщенное уравнение гидродинамики для процессов перемешивания жидких сред примет вид

$$K_N = \phi_1(Re_M, Fr_M, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots). \quad (6)$$

где  $Fr_M = w^2/(gd) = n^2 d_M/g$  - критерий Фруда для процесса перемешивания.

В тех случаях, когда действие сил тяжести пренебрежимо мало (воронка отсутствует или имеет небольшую глубину), уравнение (6) может быть упрощено и приведено к виду

$$K_N = \phi_2(Re_M, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots), \quad \text{или} \quad K_N = A \cdot (Re_M^m \cdot \Gamma_1^p \cdot \Gamma_2^q \dots), \quad (7)$$

где значения  $A, m, p, q$  определяют опытным путем.

## Конструкция мешалок

По скорости вращения мешалки условно подразделяют на две группы: *тихоходные* (якорные, рамные и другие, у которых окружная скорость концов лопастей примерно 1 м/с) и *быстроходные* (пропеллерные, турбинные и другие, у которых окружная скорость порядка 10 м/с).

В аппаратах конструктивным элементом, непосредственно предназначенным для приведения жидкости в движение, является мешалка. Как показывает практика, большинство задач перемешивания может быть успешно решено путем использования ограниченного числа конструкций мешалок. При этом существуют наиболее характерные области применения и диапазоны геометрических соотношений отдельных типов мешалок. Например, для перемешивания высоковязких сред при ламинарном режиме используют ленточные, скребковые и шнековые мешалки (рис. 3а, б, в). Скребковые мешалки применяют преимущественно для интенсификации теплообмена; скребки крепят с помощью пружин, тем самым обеспечивая плотное прилегание их к стенке аппарата.

Для перемешивания жидкостей сравнительно невысокой вязкости (обычно при подводе теплоты, т.е. в аппаратах с рубашкой) применяют тихоходные мешалки - якорные и рамные (рис. 3г, д). Отношение  $D_a/d_m$  у этих мешалок невелико (1,05-1,25), поэтому их часто используют при перемешивании суспензий, частицы которых характеризуются склонностью к налипанию на стенки.

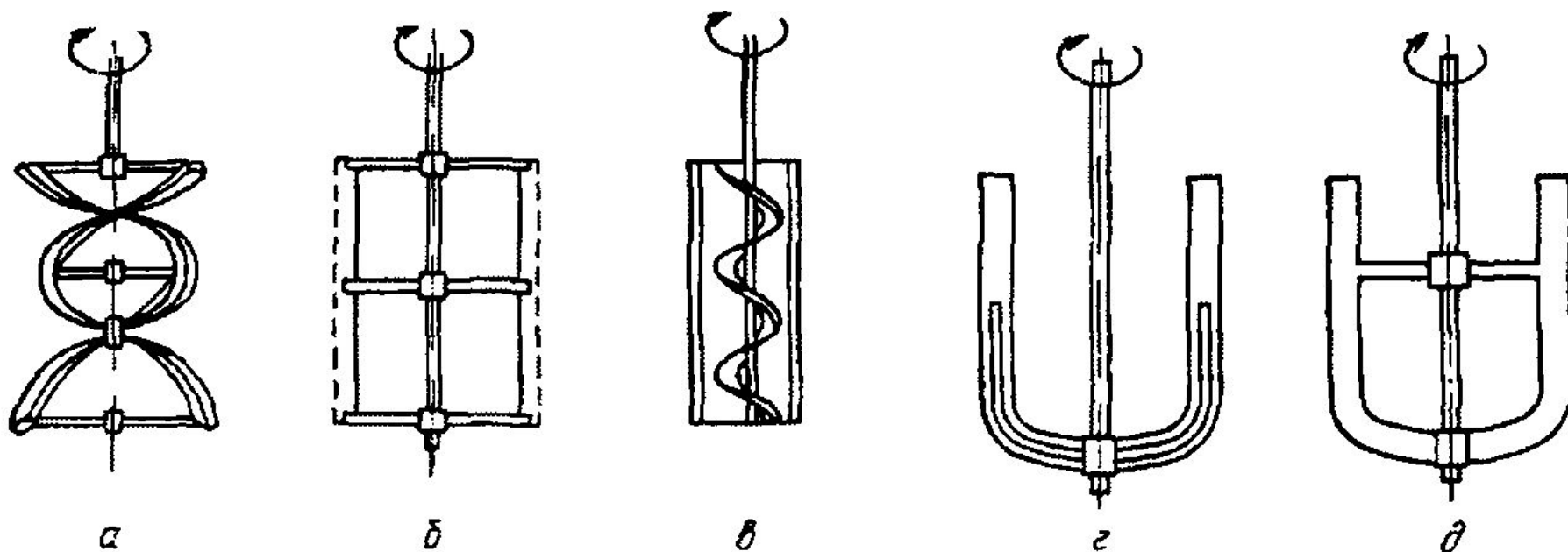


Рис. 3. Мешалки для перемешивания высоковязких сред (а-в) и сред средней вязкости (г, д): а - ленточная; б - скребковая; в - шнековая с направляющей грубой; г - якорная; д - рамная

Обычно аппарат для перемешивания представляет собой вертикальный сосуд с мешалкой, ось вращения которой совпадает с осью аппарата (рис. 4). В зависимости от условий проведения того или иного процесса объем аппарата с мешалкой может составлять от нескольких долей до нескольких тысяч кубических метров. Основными узлами таких аппаратов являются корпус, привод и вал с мешалкой. Корпус аппарата обычно состоит из вертикальной цилиндрической обечайки 5, крышки 2, на которой установлен привод мешалки 1, и днища 9. На крышках размещают также патрубки 4 и 11 для подвода и отвода веществ, подачи сжатого газа, установки контрольно-измерительных приборов и т. п. Для подвода и отвода теплоты корпус аппарата снабжают рубашкой 7. Приводом перемешивающего устройства обычно служит электродвигатель, соединенный с валом мешалки прямой или понижающей передачей.

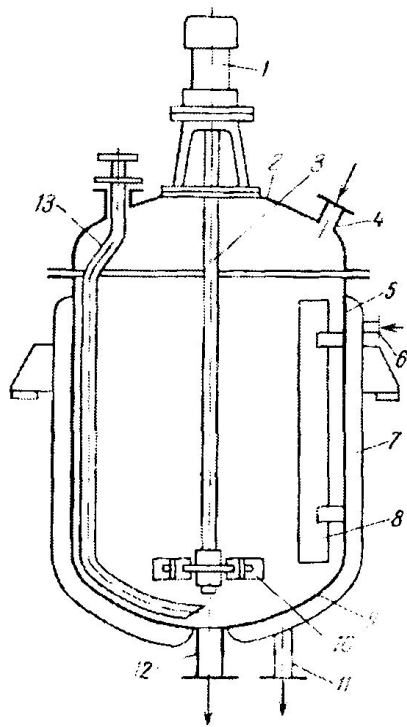


Рис. 4. Аппарат с мешалкой:

- 1 - двигатель с приводом;
- 2 - крышка;
- 3 - вал мешалки;
- 4 - штуцер для подачи сжатого газа;
- 5 - корпус;
- 6 и 11 - штуцеры входа и выхода теплоносителя;
- 7 - рубашка, 8 - отражательная перегородка,
- 9 - днище, 10 - мешалка;
- 12 - штуцер слива продукта,
- 13 - труба перелавливания.