

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 ω - 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**.

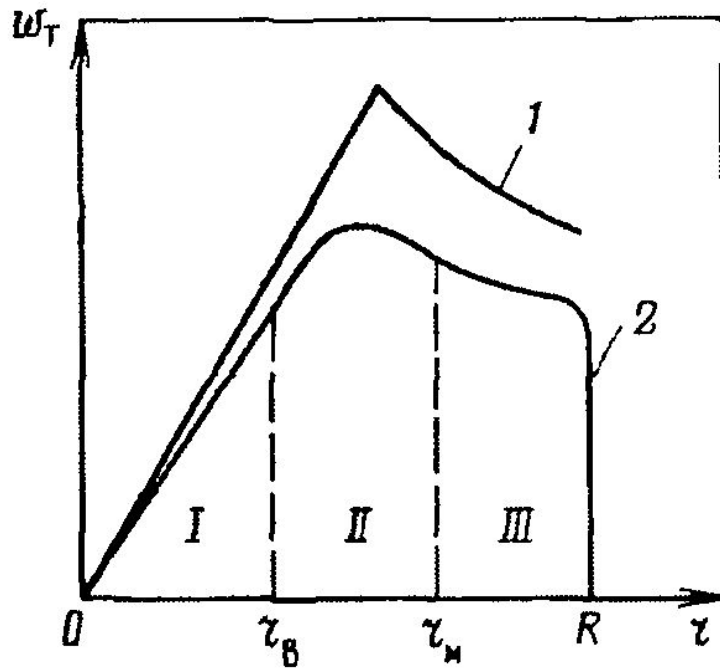


Рис. 1. Теоретическая (1) и экспериментальная (2) кривые тангенциальных скоростей жидкости в аппарате с вращающейся мешалкой: I - область центрального цилиндрического вихря, II - переходная область, III - периферийная область

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).

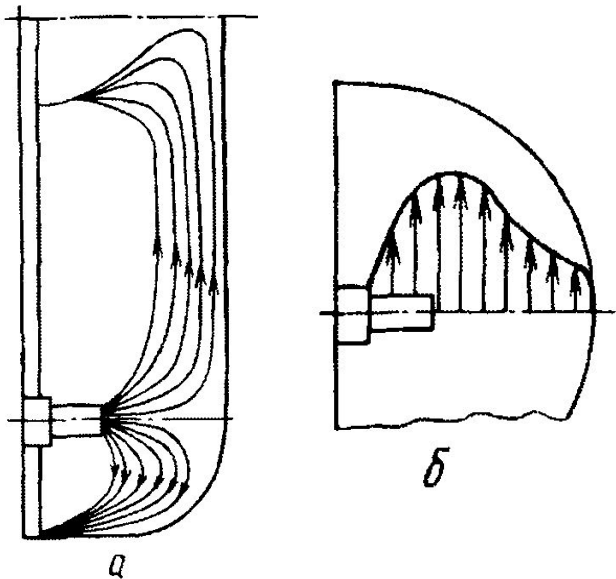


Рис. 2. Траектории движения частиц жидкости в аппарате с мешалкой (а) и эпюра скоростей (б)

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 $\omega = \pi d_M n$):

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

где d_M - диаметр мешалки, м; n - частота вращения мешалки, s^{-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.

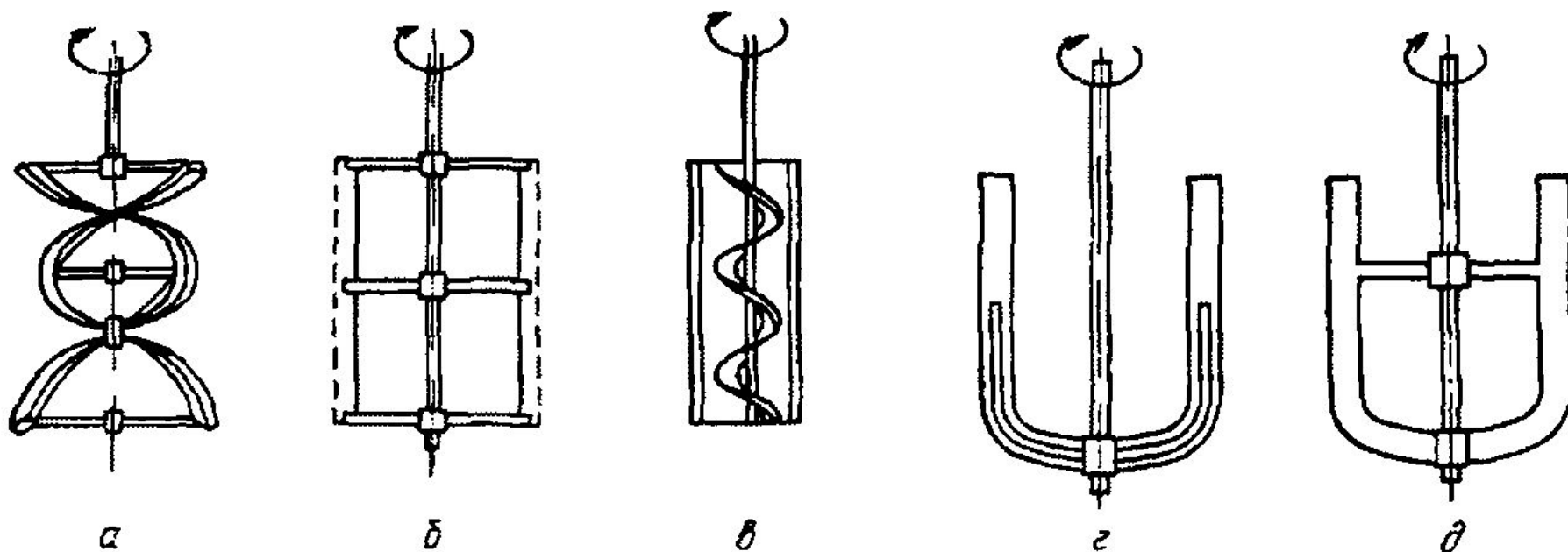


Рис. 3. Мешалки для перемешивания высоковязких сред (а-в) и сред средней вязкости (г, д): а - ленточная; б - скребковая; в - шнековая с направляющей грубой; г - якорная; д - рамная

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.

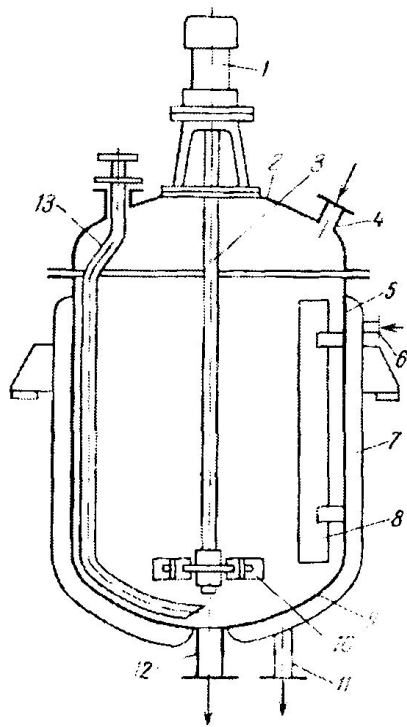


Рис. 4. Аппарат с мешалкой:

- 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.