

16 ПЕРЕМЕШИВАНИЕ

Перемешивание жидких сред является весьма распространенным в промышленности процессом. Оно используется для приготовления эмульсий, суспензий, растворов и т.д., для интенсификации тепловых, массообменных и химических процессов. В результате перемешивания достигают диспергирования одной фазы в другой, равномерного распределения компонентов системы по объему аппарата, обновления поверхности контакта фаз, обеспечивают подвод новых порций вещества в зону контакта, уменьшение толщины пограничного слоя.

Перемешивание жидких сред осуществляют с помощью:

- механических мешалок;
- сжатым газом (пневматическое);
 - в трубопроводах, чаще всего за счет установки в них турбулизующих вставок;
- сопел;
- насосов.

Наиболее распространено перемешивание механическими мешалками. Механические мешалки – это твердые тела, совершающие в жидкости вращательное (реже – возвратно-поступательное или колебательное) движение. Механическое перемешивание, как правило, осуществляется в тех аппаратах, в которых непосредственно осуществляются технологические процессы: реакторах, нейтрализаторах и т.д.

Основными характеристиками процесса перемешивания являются эффективность перемешивания и интенсивность перемешивания.

Эффективность перемешивания характеризует качество проведения процесса. При получении суспензий эффективность перемешивания определяется равномерностью распределения твердой фазы в жидкой, а для тепловых и массообменных процессов – соотношением коэффициентов теплоотдачи и массопередачи соответственно, достигаемых при перемешивании и без него. Качество, эффективность перемешивания зависит от конструкции перемешивающего устройства, а также от количества энергии, подведенной к единице объема перемешиваемой среды.

Интенсивность перемешивания определяют по времени достижения заданного технологического результата. При большей интенсивности перемешивания время достижения желаемого эффекта сокращается, однако требуется подводить к перемешиваемой среде большие удельные мощности. В то же время повышение интенсивности перемешивания повышает производительность оборудования, снижает удельные капитальные затраты на перемешивание. При технико-экономической оценке перемешивания следует выбирать вариант, обеспечивающий минимальную сумму энергетических и капитальных затрат на единицу массы (объема) перемешиваемой среды при достижении заданной эффективности.

16.1 Механическое перемешивание

Механическое перемешивание с точки зрения гидродинамики является анализом и решением ее внешней задачи (задачи обтекания жидкостью твердого тела). При медленном движении тела в жидкости, имеющей высокую вязкость, в ее слое, примыкающем к поверхности этого тела, образуется тонкий пограничный слой. Форма и толщина пограничного слоя зависит от формы и размеров тела, скорости движения, а также от плотности и вязкости жидкости. При высоких скоростях движения тела происходит отрыв пограничного слоя от поверхности тела, в первую очередь от его кромок, движущихся с наибольшей скоростью. За телом образуется кормовой турбулентный след, сопротивление движению тела при этом резко возрастает.

Для вращающейся механической мешалки наибольшая скорость наблюдается на ее периферии (скорость пропорциональна радиусу вращения). Согласно уравнению Бернулли в периферийной зоне по сравнению с центральной образуется область пониженного статического давления. Под действием перепада давлений, а также центробежных сил, возникающих при вращении, жидкость устремляется от центра к периферии. В результате возникают радиальные токи жидкости. Эти токи вызывают ее интенсивное перемешивание. Однако математическое описание такого движения жидкости чрезвычайно сложно. Поэтому для описания гидродинамики перемешивания используют теорию подобия.

Важнейшей величиной, которую необходимо вычислить при расчете мешалки, является мощность, затрачиваемая на перемешивание N , Вт. Эта мощность пропорциональна перепаду давлений на лобовой и тыльной частях мешалки ΔP , Па, площади распределения давлений S , м², и окружной скорости w , м/с, что выражается зависимостью:

$$N \sim \Delta P S (nd), \quad (16.1)$$

где n – частота вращения мешалки, об/с;

d – диаметр мешалки, м.

Площадь распределения усилий пропорциональна диаметру в квадрате, т.е. $S \sim d^2$. Отсюда следует, что перепад давлений определяется в соответствии с зависимостью:

$$\Delta P \sim \frac{N}{nd^3}. \quad (16.2)$$

Для дальнейших выводов будут использованы модифицированные (для мешалок) критерии подобия Эйлера Eu_m , Фруда Fr_m и Рейнольдса Re_m :

$$Eu_m = \frac{\Delta P}{\rho (nd)^2}; \quad (16.3)$$

$$Fr_m = \frac{(nd)^2}{gd} = \frac{n^2 d}{g}; \quad (16.4)$$

$$\text{Re}_m = \frac{ndd\rho}{\mu} = \frac{nd^2\rho}{\mu}. \quad (16.5)$$

В критерии Эйлера Eu_m произведем замену ΔP на $\frac{N}{nd^3}$ и получим его в следующем виде:

$$Eu_m = \frac{N}{\rho n^3 d^5} = K_N. \quad (16.6)$$

Модифицированный таким образом критерий Эйлера называют критерием мощности K_N . Для стационарного перемешивания, учитывая инерционные, вязкостные и гравитационные силы, можно записать критериальную зависимость в общем виде следующим образом:

$$K_N = f(\text{Re}_m, Fr_m, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots); \quad (16.7)$$

$$K_N = A \text{Re}_m^m Fr_m^n \Gamma_1^p \Gamma_2^q \dots, \quad (16.8)$$

где A, m, n, p, q – численные коэффициенты.

Влияние сил тяжести сказывается на образовании воронки, волн на свободной поверхности перемешиваемой жидкости. Образование воронки, волн приводят к уменьшению полезного объема аппарата и др. негативным последствиям при его работе. Если мешалка в аппарате установлена эксцентрично (либо аппарат на внутренней поверхности своих стенок имеет отражательные перегородки), то волны и воронка образуются в значительно меньшей мере. Поэтому для таких случаев значением числа Фруда Fr_m пренебрегают, и зависимость (16.8) приобретает следующий вид:

$$K_N = A \text{Re}_m^m \Gamma_1^p \Gamma_2^q \dots \quad (16.9)$$

Величины коэффициентов A, m, n, p, q в уравнениях (16.8) и (16.9) зависят от типа мешалки и сосуда, в котором мешалка установлена, а также от режима перемешивания. Эти величины устанавливаются при обработке опытных данных, полученных при испытаниях конкретных мешалок в конкретных аппаратах. Для удобства практического использования для конкретных мешалок функции $K_N = f(\text{Re}_m)$ представляются в виде графиков (см. рис. 16.1).

Ламинарный режим перемешивания ($\text{Re}_m < 30$) не обеспечивает интенсивного осуществления процесса. Устойчивая, развитая турбулентность при перемешивании устанавливается при $\text{Re}_m > 100$. При $\text{Re}_m > 10^5$ большинстве случаев значение K_N не зависит от Re_m (устанавливается автомобильный режим перемешивания). Наличие перегородок и других внутренних устройств в аппарате резко увеличивает расход мощности на перемешивание. Так, при наличии змеевика внутри емкости с перемешиваемой жидкостью для обеспечения тех же значений Re_m требуется вдвое – втрое большая мощность.

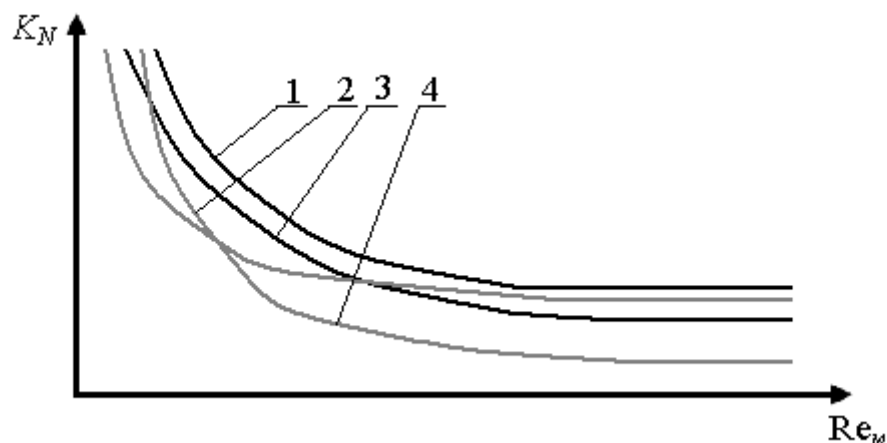


Рис. 16.1 – Вид графиков для определения критерия мощности мешалок K_N

Следует учитывать, что мощность N , получаемая из уравнения (16.6), является мощностью, потребляемой мешалкой при установившемся режиме перемешивания. В пусковой момент потребляемая мощность может превышать указанную номинальную примерно вдвое – втрое. Поэтому приводы мешалок должны иметь соответствующий запас мощности, и их установленная мощность $N_{уст}$ рассчитывается по зависимости:

$$N_{уст} = \beta K_N \rho n^3 d^5, \quad (16.10)$$

где β – коэффициент запаса мощности.

16.2 Конструкции механических мешалок

Механические перемешивающие устройства с вращательным движением состоят из собственно мешалки 3, ее вала 4 и привода 5 (см. рис. 16.2). Вал может быть установлен в аппарате вертикально, горизонтально или наклонно.

Мешалки, в зависимости от окружной скорости и частоты вращения, делят на быстроходные и тихоходные. Быстроходные мешалки имеют скорость концов лопастей до 10 м/с и более, тихоходные – порядка 1 – 3 м/с. Быстроходные мешалки работают в турбулентном (реже – переходном) режиме, тихоходные – в ламинарном. Тихоходные мешалки в основном применяют для перемешивания высоковязких сред.

По конструктивному признаку мешалки делят на лопастные, пропеллерные, турбинные, фрезерные (все быстроходные), шнековые, якорные, рамные, листовые, ленточные, (тихоходные) и т.д.

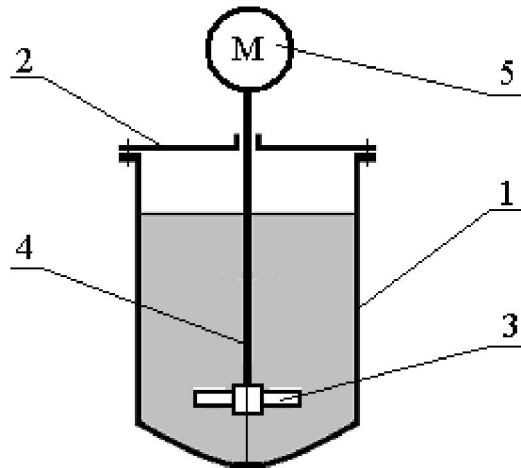


Рис. 16.2 – Схема аппарата с механической мешалкой
 1 – емкость (корпус аппарата); 2 – крышка; 3 – мешалка; 4 – вал; 5 – привод мешалки

16.2.1 Лопастные мешалки. Лопастная мешалка представляет цилиндрическую втулку 2 с прикрепленными к ней плоскими лопастями 1 (рис.16.3). Число лопастей – две и более. Расположение лопастей указанных мешалок – по направлению образующей цилиндра и наклонно к ней. Мешалки с наклонным расположением лопастей наряду с радиальными токами перемешиваемой среды создают также ее осевые токи. Ширина лопастей этих мешалок составляет примерно 20% от диаметра мешалки. Лопастные мешалки применяются для перемешивания сред вязкостью до 1 Па·с. Недостатки лопастных мешалок: слабое перемешивание в осевом направлении; перемешивание жидкости только в области, прилегающей непосредственно к мешалке. Поэтому при перемешивании лопастными мешалками в высоком слое жидкости их выполняют многоярусными – несколько мешалок закрепляют на одном валу через 0,3 – 0,8 диаметра мешалки. Диаметр лопастных мешалок составляет от 0,3 до 0,9 диаметра сосуда.

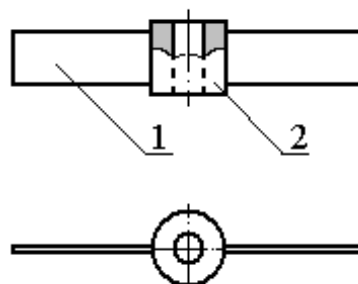


Рис. 16.3 – Лопастная мешалка
 1 – лопасть; 2 – втулка

16.2.2 Якорная и рамная мешалка. Указанные мешалки являются модификациями лопастной мешалки. Лопасты 1 этих мешалок имеют специальную конфигурацию (см. рис. 16.4 и 16.5). Вследствие этого кромки лопастей в аппарате располагаются вблизи от поверхности его стенок, змеевиков. Применяют их для перемешивания вязких (до 10 Па·с) жидкостей, а также при проведении процессов, требующих подвода или отвода тепла от перемешиваемой среды. При своей работе данные мешалки практически не создают осевых течений. Кроме того они очищают поверхности стенок аппарата, змеевиков от загрязнений.

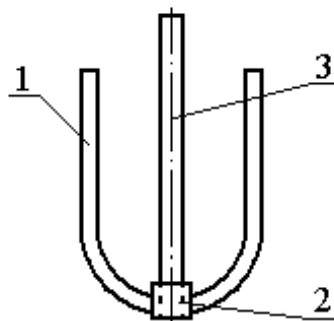


Рис. 16.4 – Якорная мешалка
1 – лопасть; 2 – втулка; 3 – вал

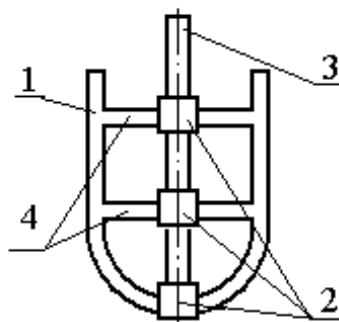


Рис. 16.5 – Рамная мешалка
1 – лопасть; 2 – втулки; 3 – вал; 4 – перемычки

16.2.3 Листовые мешалки. Листовая мешалка имеет (рис. 16.6) широкие лопасти 1, которые обеспечивают в основном тангенциальное (окружное) течение среды. Для создания вихревых потоков в лопастях могут быть выполнены отверстия 3. Данные мешалки применяются для перемешивания маловязких (до 50 мПа·с) сред, для осуществления растворения твердых веществ. Диаметр мешалки составляет от 0,5 до 0,6 от диаметра сосуда, ширина ее лопастей – от 0,5 до 1,0 диаметра. Окружная скорость лопастных и листовых мешалок составляет от 0,5 до 5 м/с.

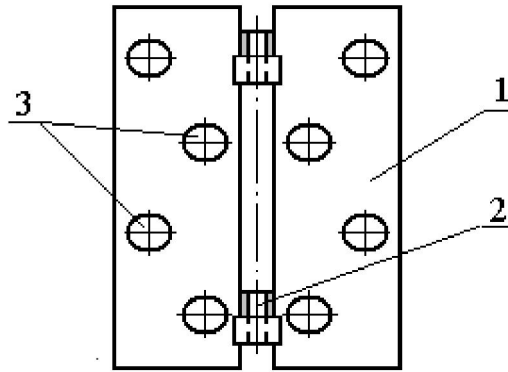


Рис. 16.6 – Листовая мешалка
1 – лопасть; 2 – втулка; 3 – отверстие

16.2.4 Винтовые мешалки. Винтовые (пропеллерные) мешалки (рис. 16.7) имеют форму гребного винта. Окружная скорость концов их лопастей может достигать 15 м/с. Применяют их для перемешивания жидкостей вязкостью до 2 Па·с. При работе пропеллерной мешалки наряду с радиальными и тангенциальными токами возникают мощные осевые токи. Для улучшения перемешивания их устанавливают в аппаратах с выпуклыми эллиптическими днищами. Для упорядочения осевой циркуляции в крупных аппаратах эти мешалки устанавливают в диффузорах (рис.16.8). Диаметр винтовых мешалок составляет от 0,2 до 0,5 диаметра сосуда. Их применяют для проведения растворения, гомогенизации, эмульгирования, приготовления суспензий, проведения химических реакций.

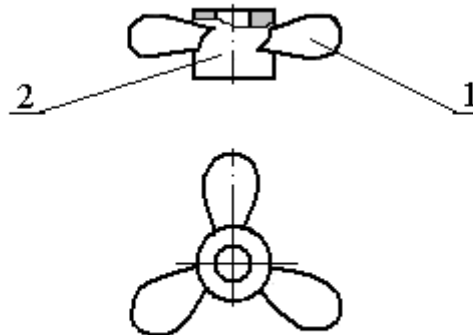


Рис. 16.7 – Винтовая мешалка
1 – лопасть; 2 – втулка

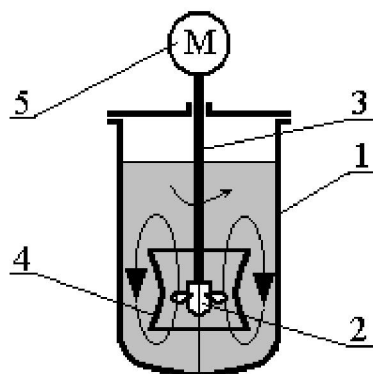


Рис. 16.3 –Винтовая мешалка в аппарате с диффузором
1 – емкость (аппарат); 2 – мешалка; 3 – вал; 4 – диффузор; 5 – привод

16.2.5 Турбинные мешалки. Турбинные мешалки имеют форму рабочих колес водяных турбин. Данные мешалки могут быть открытого либо закрытого типа (см. рис. 16.9 и 16.10). У них на диске 2 укрепляются радиальные, наклонные либо изогнутые лопасти 1. У закрытых мешалок лопасти покрыты кольцами 4 и 5 (см. рис.16.10), за счет чего создаются более мощные радиальные токи жидкости. Турбинные мешалки могут быть многоярусными. Мощность, потребляемая этими мешалками в аппаратах с перегородками, при турбулентном режиме перемешивания не зависит от вязкости среды. Указанные мешалки применяются для приготовления суспензий, взвесей с размером частиц до 25 мм, интенсификации тепло- и массообменных процессов. Окружная скорость их составляет до 8 м/с, а диаметр – от 15 до 65% от диаметра аппарата.

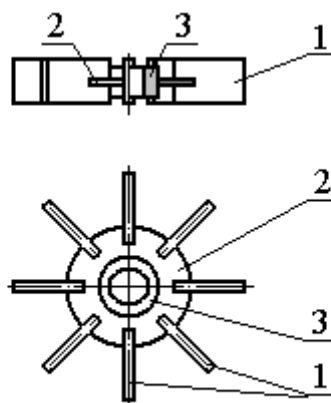


Рис. 16.9 – Турбинная мешалка открытого типа
1 – лопасти 2 – диск; 3 – втулка

При работе быстроходных мешалок на поверхности жидкости возможно воронкообразование, что требует большей высоты аппарата при том же полезном объеме. Для устранения (или снижения) воронкообразования на внутренней поверхности стенок аппаратов устанавливают вертикальные перегородки, предотвращающие крутку

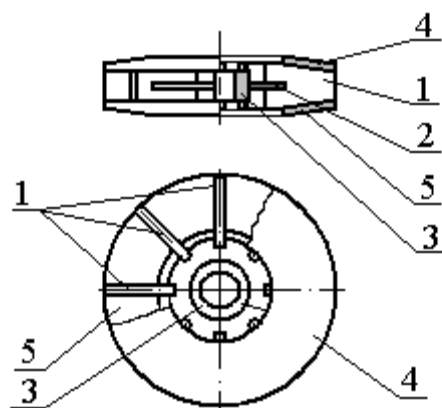


Рис. 16.10 – Турбинная мешалка закрытого типа
 1 – лопасти; 2 – диск; 3 – втулка; 4 и 5 – покровные кольца

жидкости. Однако это увеличивает расход мощности на перемешивание и вызывает образование дополнительных застойных зон. Воронкообразование также снижается при асимметричной и наклонной установке мешалок в аппаратах. Для устранения застойных зон днища аппаратов с мешалками следует выполнять выпуклыми (эллиптическими). Тихоходные мешалки для перемешивания вязких сред для обеспечения осевой циркуляции выполняют с ленточными спиральными лопастями либо шнековыми.

16.3 Применение других способов перемешивания

Пневматическое перемешивание применяют для перемешивания агрессивных жидкостей, быстро разрушающих мешалки. Также его применяют при перемешивании сред повышенной пожаро- и взрывоопасности и в случаях, когда перемешивающий газ является реагентом, взаимодействующим с жидкостью в аппарате. В зависимости от свойств жидкости и других требований в качестве перемешивающей среды используют воздух, инертные газы и т.д. Пузырьки газа, барботируя через жидкость, перемешивают ее. Интенсивность перемешивания, отнесенная к расходу энергии, по сравнению с механическими мешалками невелика, а удельный расход энергии – большой.

Перемешивание в трубопроводах осуществляют, как правило, при совмещении этого процесса с транспортировкой жидкости на значительные расстояния. Перемешивание достигается за счет турбулентных пульсаций в жидкости, оно может быть дополнительно интенсифицировано за счет установки турбулизующих вставок в трубопровод.

Перемешивание в соплах и насосах осуществляется за счет больших напряжений сдвига между движущимися с разными скоростями струй жидкости.