

**Перемешивающие устройства со сложным законом движения мешалок**

к.т.н. доц. Торубаров Н.Н., д.т.н. проф. Малышев Р.М.  
Университет машиностроения  
ipb\_msuie@mail.ru

*Аннотация.* Рассмотрено применение смесителей с непрерывным изменением амплитуды и частоты угловой скорости рабочих органов, показано, что они позволяют повысить эффективность процесса перемешивания

*Ключевые слова:* перемешивающие устройства, сложный закон движения, энергоэффективность

Механическое перемешивание жидких сред как средство получения эмульсий, суспензий, однородных смесей или увеличения контакта фаз, интенсификации тепло- и массообмена, химических реакций является одним из распространенных процессов в химической, нефтехимической, биохимической и других отраслях промышленности.

С целью обеспечения эффективного и тщательного перемешивания рекомендуют использовать смесители с непрерывным изменением угловой скорости и ускорения мешалки внутри цикла или ее периодического углового возврата без изменения режима работы электродвигателя.

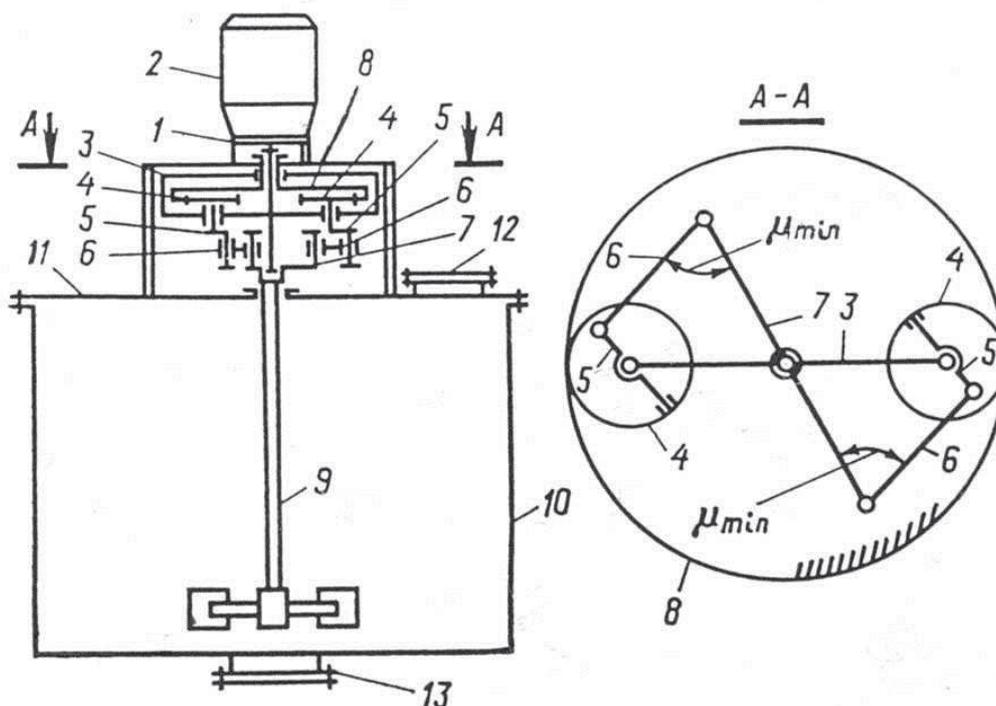
Создание заданного непрерывно изменяющегося режима движения мешалки внутри цикла позволяет воздействовать на перемешиваемую среду оптимальным образом, обеспечивая необходимые, постоянно изменяющиеся по величине и направлению тангенциальные и радиальные составляющие перемешивания материалов и повышение меридиальной циркуляции, что способствует интенсификации процессов тепло- и массообмена и т.п.

Одним из путей реализации такого процесса является применение смесителей с программируемым в зависимости от свойств перемешиваемой среды непрерывным изменением амплитуды и частоты угловой скорости рабочих органов. В таких аппаратах вследствие изменения силового воздействия лопастей на перемешиваемый материал более эффективно используются инерциальные силы, возникающие в перемешиваемом объеме.

Кинематическая схема конструкции смесителя, в котором внутрицикловое изменение амплитуды и частоты угловой скорости мешалки осуществляется за счет установки между валом электродвигателя и валом мешалки зубчато-рычажного механизма привода (ЗРМП) представлена на рисунке. Движение от вала 1 электродвигателя 2 передается водилу 3 и сателлитам 4, которые одновременно вращаются вокруг собственной оси в результате взаимодействия с зубьями неподвижного колеса 8. При этом кривошип 5, жестко закрепленные на сателлитах 4, описывают гипотрохоиду, которая характеризуется неравномерной скоростью движения кривошипов относительно оси колеса 8. Шатуны 6 передают неравномерное движение в одном направлении ведомому валу 7, на котором закреплена мешалка 9. Таким образом, мешалка получает сложный закон движения с переменной частотой вращения внутри одного цикла работы.

Внутрицикловое изменение угловой скорости мешалки обеспечивает непрерывное изменение поля скоростей перемешиваемого материала. При ускоренном вращении мешалки твердые частицы, обладающие большей инерционностью, чем жидкие, отстают от последних, а в случае замедленного вращения обгоняют их, что приводит к увеличению разницы между скоростями жидкой и твердой фаз. Кроме того, нестационарное движение рабочих органов порождает крупномасштабные вихревые движения, способствующие выравниванию концентрации внутри объема аппарата. Нестационарное движение перемешиваемого материала обуславливает значительное увеличение энергии турбулентных пульсаций. На основе теоретических и практических работ известно, что энергия турбулентных пульсаций при нестационарном режиме в 3 раза больше, чем при стационарном. Подобное повышение степени турбулизации потока удастся создать в предлагаемом аппарате. С увеличением коэффи-

циента неравномерности вращения и частоты изменения угловой скорости мешалки степень турбулентности возрастает, что способствует интенсификации процесса перемешивания.



**Рисунок 1. Кинематическая схема смесителя с нестационарным движением мешалки:**

- 1 – вал электродвигателя; 2 – электродвигатель; 3 – водило; 4 – сателлиты; 5 – кривошипы; 6 – шатуны; 7 – ведомый вал; 8 – неподвижное колесо; 9 – мешалка; 10 – корпус аппарата; 11 – крышка аппарата; 12 – загрузочный штуцер; 13 – выгрузочный штуцер**

Аппараты с ЗРМП можно использовать для растворения вещества со дна аппарата, суспендирования, эмульгирования и ряда других процессов. В смесителях могут быть применены лопастная, турбинная, пропеллерная, якорная и другие типы мешалок. ЗРМП можно устанавливать на открытые или закрытые аппараты и химические реакторы емкостью от 0,03 до 10 м<sup>3</sup>.

Неравномерность вращения мешалки характеризуется коэффициентом неравномерности

$$K = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{cp}} = \left| -\frac{2K_{\omega}}{\rho} (\Delta + \Delta^3) \right|, \quad (1)$$

где  $\omega_{\max}$ ,  $\omega_{\min}$  и  $\omega_{cp}$  – соответственно максимальное, минимальное и среднее значения угло-

вой скорости мешалки, с<sup>-1</sup>;  $K_{\omega} = \left| U_{4,8}^{(3)} \right| = \frac{z_8}{z_4}$  – коэффициент изменения частоты угловой ско-

рости мешалки, определяемый модулем передаточного отношения  $\left| U_{4,8}^{(3)} \right|$ ;  $z_4$  и  $z_8$  – число

зубьев зубчатых колес 4 и 8;  $\Delta = l_5/l_3$  и  $\rho = l_7/l_3$  – безразмерные метрические параметры;  $l_3, l_5, l_6$  и  $l_7$  – длины звеньев соответственно 3, 5, 6 и 7.

Входящую в формулу (1) текущие значения угловой скорости вращения мешалки  $\omega$  можно найти из выражения:

$$\omega_7 = \omega_9 = \omega_3 \left\{ 1 + \frac{\Delta [\cos(\varphi U_{48}^{(3)}) - \Delta] U_{48}^{(3)}}{A^2} + \frac{\Delta \sin(\varphi U_{48}^{(3)}) (A^2 + B^2) U_{48}^{(3)}}{A^2 \sqrt{4\rho^2 A^2 - (A^2 - B^2)^2}} \right\}, \quad (2)$$

где  $\omega_3$  – угловая скорость водила 3,  $\text{с}^{-1}$ ;

$A = \sqrt{1 + \Delta^2 - 2\Delta \cos(\varphi U_{48}^{(3)})}$ ;  $B^2 = \lambda^2 - \rho^2$ ;  $\lambda = l_6/l_3$ ;  $l_3/l_3 = 1$ ;  $\varphi$  – угол поворота звена 3.

Из условия сохранения наименьших габаритов ЗРМП  $\lambda$  и  $\rho$  будут равны:

$$\Delta = \frac{\cos \mu_{\min}}{1 + \sin \mu_{\min}}, \quad \rho = \lambda = \frac{1}{\sqrt{1 + \sin \mu_{\min}}}, \quad (3)$$

где  $\mu_{\min}$  – допускаемый угол передачи.

Для устранения застойных зон в аппарате и интенсификации процесса перемешивания важным является угловое смещение мешалки относительно своего начального положения за один цикл работы (один оборот водила 3). Смещение возможно тогда, когда радиусы начальных окружностей  $r_4$  и  $r_8$  зубчатых колес 4 и 8 (см. рисунок 1) несоизмеримы; кинематические параметры мешалки, соответствующие его начальному положению, никогда не будут повторяться. Заданное угловое смещение осуществляется соответствующим выбором чисел зубьев зубчатых колес 4 и 8.

Используя метод инверсии, мгновенное значение КПД ЗРМП определяется по формуле

$$\eta = \frac{\eta_{84}^{(3)} \cos \gamma}{U_{37} \eta_{84}^{(3)} \cos \gamma + |1 - U_{37}|}, \quad (4)$$

где  $\gamma = 90^\circ - \mu$  – угол давления;  $\mu$  – текущий угол передачи;

$U_{37} = \frac{\omega_3}{\omega_7}$  – передаточное отношение ЗРМП;

$\eta_{84}^{(3)}$  – КПД пары зубчатых колес 4 и 8 при инверсии.

Результаты исследований по оценке эффективности перемешивания в аппарате с постоянной и переменной частотой вращения мешалки показали, что в аппарате с нестационарным движением мешалки скорость перемешивания и выход готового продукта увеличивается по сравнению с аппаратом с мешалкой с постоянной угловой скоростью, причем скорость перемешивания и выход готового продукта возрастают с увеличением  $K$ .

Как видно, качество смеси улучшается с увеличением  $K_\omega$ . Это можно объяснить повышением интенсивности турбулентных пульсаций в перемешиваемом потоке при нестационарном движении мешалки внутри цикла и увеличением крупномасштабных вихрей, характеризующихся их инерционными силами, т.е. ускорением массы вихрей. Чем больше ускорение, тем больше вихри, и наоборот. Было замечено также столкновение вихрей, причем в местах слияния их твердые частицы начинают перемещаться в различных направлениях и с разными скоростями.

Визуально было обнаружено, что при неравномерном вращении мешалки глубина воронки уменьшается в 1,5 – 1,9 раза в зависимости от неравномерности вращения и изменения частоты угловой скорости мешалки по сравнению с ее постоянной угловой скоростью, что также способствует снижению затрат на перемешивание.

Таким образом, эффективность процесса перемешивания в аппаратах с внутрицикловым изменением кинематических параметров мешалок увеличивается по сравнению с аппаратами, у которых угловая скорость мешалки величина постоянная.

### Литература

1. Мартынов Ю.В., Торубаров Н.Н., Чупин Ю.Н. О перемешивании жидких сред якорной мешалкой, вращающейся нестационарно // Теоретические основы химической технологии. 1989. Том XXIII. №4. С. 489-494.

2. Berezkina N.G., Martynov J.V., Torubarov N.N., Chupin J.N. Apparatus for mixing heterogeneous substances U.S. Patent, № 4,786,184 1988
3. Torubarov N.N., Skatchkov J.A., Kopilov V.N. Intermixing of low viscous polymeric solutions «Technomer 2007», ФРГ, 15 – 17.11.2007.

### **Определение рациональных значений расхода раствора и температуры при абсорбции диоксида углерода**

Гуреев А.О., к.т.н. доц. Пикулин Ю.Г.  
Университет машиностроения  
gureev\_aleksei@mail.ru

*Аннотация.* Постоянный рост мировых цен на энергоресурсы требует нахождения оптимальных условий для процессов химической технологии. Приведены результаты апробации ранее составленной математической модели процесса очистки промышленных газов от диоксида углерода. Показаны зависимости абсорбционной ёмкости и количества поглощаемого  $\text{CO}_2$  от расхода по жидкости. Доказано отсутствие необходимости использования расхода жидкости, близкого по значению к захлёбыванию абсорбера, так как на определённом этапе увеличение расхода жидкости перестаёт оказывать значительное влияние на общую поглощательную способность раствора. Также показана возможность снижения расхода раствора в промышленных условиях, что позволит получить экономический эффект от снижения энергозатрат на циркуляцию раствора и на процесс очистки газа в целом. Определено значение температуры для обеспечения максимальной скорости хемосорбции диоксида углерода.

*Ключевые слова:* очистка газов; абсорбер; моделирование; обработка экспериментальных данных; энергоэффективность

На современных заводах в структуре себестоимости синтетического аммиака стоимость энергии составляет до 50%, причём она непрерывно возрастает.

В циркуляционных схемах очистки промышленных газов от  $\text{CO}_2$  основные энергозатраты приходятся на стадию регенерации абсорбента, которая проходит, как правило, при высоких температурах. На регенерацию абсорбент поступает со стадии абсорбционной очистки газа, поэтому для определения рациональных значений параметров технологического режима осуществления процесса абсорбционно-десорбционной очистки газов от диоксида углерода при минимальных энергозатратах на процесс очистки необходимо построить математическую модель процесса абсорбционной очистки газа и проверить её адекватность. Следующим этапом будет являться решение аналогичной задачи для процесса регенерации и на завершающей стадии – их объединение в математическую модель абсорбционно-десорбционного цикла.

Цель предлагаемой работы – экспериментальное и теоретическое изучение процесса абсорбции диоксида углерода водным раствором моноэтаноламина, создание на этой основе математической модели процесса очистки промышленных газов от  $\text{CO}_2$ , проверка адекватности полученной математической модели для расчёта отдельных параметров процесса, а также разработка рекомендаций по снижению приведенных затрат на стадии очистки промышленных газов от диоксида углерода для крупнотоннажных производств.

Поиск оптимальных технологических параметров является трудоёмким процессом, в ходе которого необходимо учесть и рассчитать множество различных параметров и величин.

Первым этапом этой работы явилось создание математической модели процесса абсорбции диоксида углерода для расчёта основных размеров абсорбера и проверка её адекватности.