



Научная статья

УДК 66.023

DOI: 10.52957/2782-1900-2024-5-2-61-68

ИЗМЕРЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА ОПЫТНОЙ УСТАНОВКЕ

В. К. Леонтьев, О. Н. Кораблева

Валерий Константинович Леонтьев, канд. техн. наук, доцент; **Ольга Николаевна Кораблева**, канд. хим. наук, доцент

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия, leontievvk@ystu.ru; korablevaon@yandex.ru

Ключевые слова:

крутящий момент, измерители крутящего момента, механическое перемешивание, мощность, пьезометр

Аннотация. Рассмотрен механизм измерения крутящего момента процесса механического перемешивания. Возникающие напряжения сдвига или деформации служат мерой крутящего момента. Приведена классификация измерителей крутящего момента, а также представлены различные способы измерения крутящего момента, позволяющие точно измерять и контролировать крутящий момент, что является важным параметром при разработке и производстве различных устройств и механизмов. Авторами представлена схема опытной установки по исследованию механического перемешивания с использованием разработанного устройства для измерения крутящего момента без использования стробоскопа. Предложенный авторами способ решает задачу, связанную с упрощением технической реализации измерения крутящего момента. Рассчитан диапазон изменения уровня жидкости в пьезометре при исследовании процесса перемешивания на опытной установке с учетом минимального и максимального значения давления в емкости.

Для цитирования:

Леонтьев В.К., Кораблева О.Н. Измерение крутящего момента при исследовании процесса перемешивания на опытной установке // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2024. Т. 5, вып. 2. С. 61-68. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/5176/view>

Введение

Крутящий момент (КМ) – векторная величина, которая характеризует действие силы на физическое тело и вызывает его вращательное движение [1]. Он является наиболее важным показателем, характеризующим силу вращения вала, в связи с чем измерение крутящего момента составляет необходимую часть измерения мощности, передаваемой вращающимися валами. Его можно рассчитать как произведение силы гидродинамического сопротивления вращению на плечо этой силы [2].



Основная часть

В целом измерение крутящего момента можно разделить на две группы: прямое и косвенное.

Прямые методы – измерение крутящего момента с помощью датчиков крутящего момента. Эти методы являются более точными, чем косвенные.

Косвенные методы заключаются в измерении физических величин, с использованием которых рассчитывается крутящий момент. Это может быть, например, измерение силы, действующей на рычаг, длина которого известна, или измерение тока и скорости вращения электрического двигателя. Часто этот вид косвенного измерения крутящего момента может быть более быстрым, простым и достаточно точным **в промышленных условиях** по сравнению с прямыми методами [3].

Важнейшей частью датчика крутящего момента является, как правило, чувствительный цилиндрический элемент, который под действием приложенного к нему момента закручивается (рис. 1) [3].

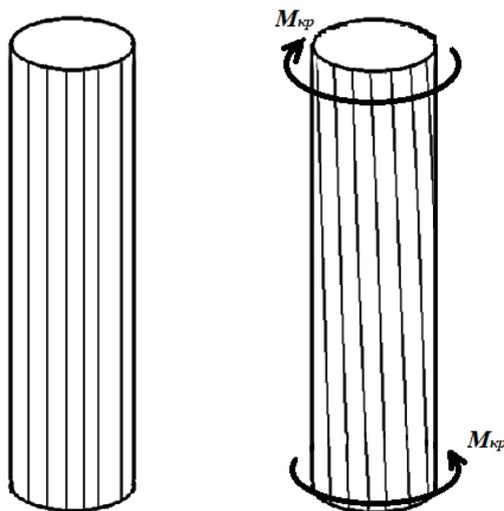


Рис. 1. Цилиндрический элемент датчика измерения крутящего момента

Возникающие при этом напряжения сдвига или деформации служат мерой крутящего момента. Упомянутые напряжения или деформации воспринимаются тензорезисторами, которые приклеивают к чувствительному элементу под углом 45° к его продольной оси и включают в схему моста Уинстона. Для передачи питающего напряжения и измерительного сигнала применяют контактные кольца или передачу сигналов без использования контактных колец [1].

Крутящий момент на валу можно определить по углу скручивания вала между двумя сечениями по его длине. Для сплошного вала угол скручивания ϕ определяется следующей зависимостью [2]:

$$\phi = \frac{M_{кр} \cdot l}{G \cdot \pi \cdot d^4}$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент, Н·м; l – расстояние между сечениями, м; G – модуль упругости материала при сдвиге, Па; d – диаметр вала, м.



Из этой формулы видно, что для данного вала на участке длиной l угол скручивания пропорционален передаваемому крутящему моменту $M_{кр}$.

Наиболее простыми и распространенными способами и устройствами для измерения КМ, применяемыми в настоящее время в исследовательских целях, являются:

1) способ измерения крутящего момента и устройство для его реализации [3], включающий измерение угла взаимного разворота концов базового участка упругого вала, на котором установлены оптические отражатели, под действием крутящего момента с помощью оптико-электронного преобразователя, состоящего из источников излучения и фотоприемных устройств;

2) устройство измерения крутящего момента, содержащее вал и неподвижно установленную на валу втулку, которая имеет на наружной боковой поверхности лыску. На втулке смонтирована с возможностью поворота обойма, в которой выполнены радиальные пазы, расположенные напротив лыски с угловым смещением относительно друг друга. А также содержит измерительный датчик, соединенный с измерительной системой, и устройство воздействия на датчик [4].

Важнейшими компонентами в устройствах для измерения КМ являются измерители. Они позволяют точно измерять и контролировать крутящий момент, что является важным параметром при разработке и производстве различных устройств и механизмов [4, 5]. Поэтому такие устройства широко применяются в различных областях промышленности, включая машиностроение, автомобилестроение, электронику и другие.

Измерители крутящих моментов могут быть различных типов и конструкций (рис. 2).



Рис. 2. Классификация измерителей крутящего момента

Каждый тип измерителя крутящего момента имеет свои преимущества и ограничения, и выбор конкретного типа зависит от требований и условий конкретного приложения:

- механические измерители КМ основаны на использовании механических элементов, таких как рычаги, пружины и весы. Они позволяют измерять КМ путем измерения силы, которая возникает при вращении объекта. Примером механического измерителя является динамометрический ключ;

- электрические измерители КМ используют электрические принципы для измерения КМ. Они обычно основаны на эффекте Холла или эффекте пьезоэлектричества. Эти измерители генерируют электрический сигнал, который



пропорционален крутящему моменту. Примерами электрических измерителей являются датчики крутящего момента и тензодатчики;

- оптические измерители КМ используют оптические принципы для измерения КМ. Они обычно основаны на использовании лазеров и оптических датчиков, позволяют получать высокую точность измерений и могут использоваться в сложных и точных приложениях. Примером оптического измерителя является лазерный датчик крутящего момента;

- бесконтактные измерители КМ используют бесконтактные методы для измерения КМ. Они обычно основаны на использовании магнитных полей или радиочастотных сигналов. Бесконтактные измерители позволяют измерять крутящий момент без физического контакта с измеряемым объектом. Примером бесконтактного измерителя является индукционный датчик крутящего момента [2].

Движение жидкости в аппарате с мешалкой можно рассматривать как движение по каналу, имеющему сложную геометрическую форму. Ввиду конечного числа лопаток мешалки течение жидкости в аппарате является нестационарным [6]. Процесс перемешивания механическими мешалками сводится к внешней задаче гидродинамики - обтеканию тел потоком жидкости. Задача внешнего обтекания тел в условиях перемешивания может быть решена с помощью уравнений Навье-Стокса и неразрывности потока. Для решения этой задачи используют теорию подобия [7].

Из литературных источников известно, что процесс перемешивания:

- широко используется в химической технологии для получения гомогенных растворов, различных эмульсий, интенсификации теплообменных и массообменных процессов. Эффективное перемешивание в ряде случаев является одной из важнейших стадий производства и определяет производительность технологического процесса в целом [8];

- представляет собой многократное перемещение частиц текучей среды под действием импульса, передаваемого струей жидкости или газа (гидравлическое, пневматическое перемешивание), мешалкой (механическое перемешивание). Одним из наиболее распространённых способов перемешивания в промышленности является перемешивание с использованием механических мешалок различной конструкции с вращательным, реже поступательным движением [9];

- характеризуется интенсивностью и эффективностью, а также расходом энергии на его проведение. Интенсивность процесса перемешивания определяется временем достижения заданного технологического результата. Повышение интенсивности перемешивания приводит к увеличению эксплуатационных затрат на удельную энергию, подводимую к перемешиваемой среде и уменьшению капитальных затрат за счет повышения производительности оборудования. Выбор оптимального варианта производится по технико-экономической оценке обеспечивающих минимальное значение удельных затрат. Эффективность процесса характеризует его качество и определяется равномерностью распределения или изменением коэффициента теплопередачи, массопередачи в зависимости от цели проведения процесса [10].

При расчете процесса механического перемешивания важнейшей величиной, которую необходимо вычислить является мощность, затрачиваемая на перемешивание.



Она зависит от окружной скорости, площади распределения давления и перепада давления на лобовой и тыльной частях мешалки. Рассматривая работу мешалки как работу насоса, мощность N , потребляемую мешалкой, теоретически можно определить по уравнению [11-13]

$$N = K_N \rho n^3 d_M^5,$$

где K_N – коэффициент мощности; ρ – плотность перемешиваемой среды, кг/м³; n – частота вращения мешалки, об/с; d_M – диаметр мешалки, м.

Определить мощность, развиваемую мешалкой через крутящий момент [Нм], можно по уравнению [9]:

$$N = 2\pi n M_{кр}.$$

На кафедре «Химическая технология органических веществ» Ярославского государственного технического университета была модернизирована лабораторная установка для исследования эффективности работы механических мешалок, в которой используется устройство для измерения КМ [14]. Схема установки приведена на рис. 3.

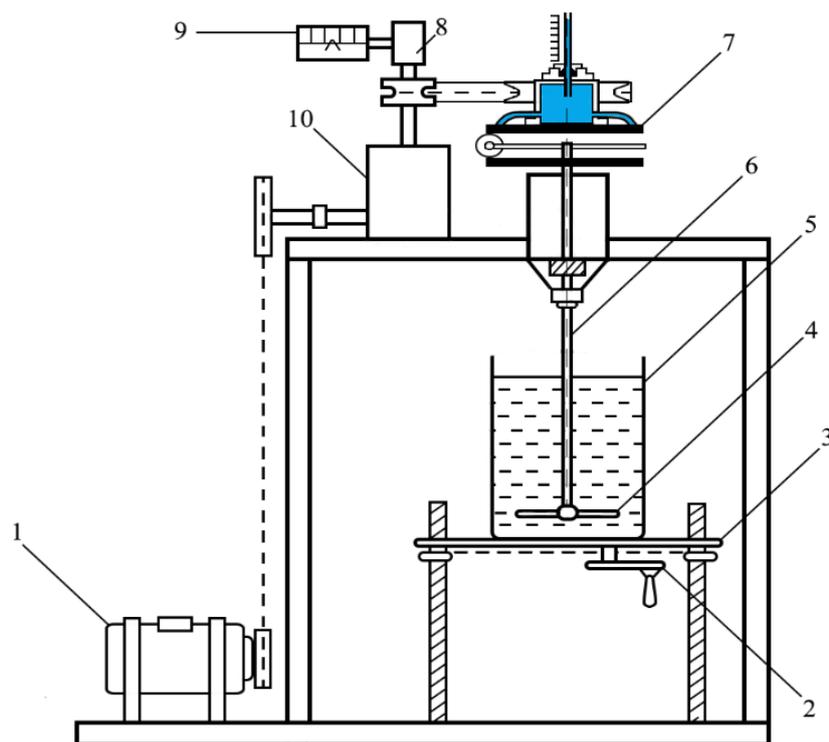


Рис. 3. Схема лабораторной установки для исследования эффективности работы механических мешалок: 1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – маховик; 3 – подъемный стол; 4 – мешалка; 5 – сосуд с перемешиваемой жидкостью; 6 – вал; 7 – устройство для измерения крутящего момента; 8 – датчик тахометра; 9 – указатель частоты вращения; 10 – редуктор

Мешалка 4 приводится во вращение электродвигателем постоянного тока 1 через редуктор 10. Сосуд с перемешиваемой жидкостью 5 установлен на подъемном столе 3, перемещение которого в вертикальном направлении достигается вращением маховика 2. Это позволяет проводить смену мешалок и устанавливать необходимую глубину их погружения. Измерение крутящего момента производится устройством 7.



Частота вращения вала мешалки n измеряется электромагнитным тахометром, состоящим из датчика 8 и указателя частоты вращения 9 [15].

Основной элемент установки – устройство для измерения КМ. Ранее для измерения КМ использовалось устройство с применением стробоскопа [9], имеющего достаточно большую стоимость в изготовлении и несущего опасность для здоровья при эксплуатации. И поэтому целью работы, проведенной авторами, явилась разработка упрощенного устройства для измерения КМ без использования стробоскопа, конструкция которого представлена на рис. 4.

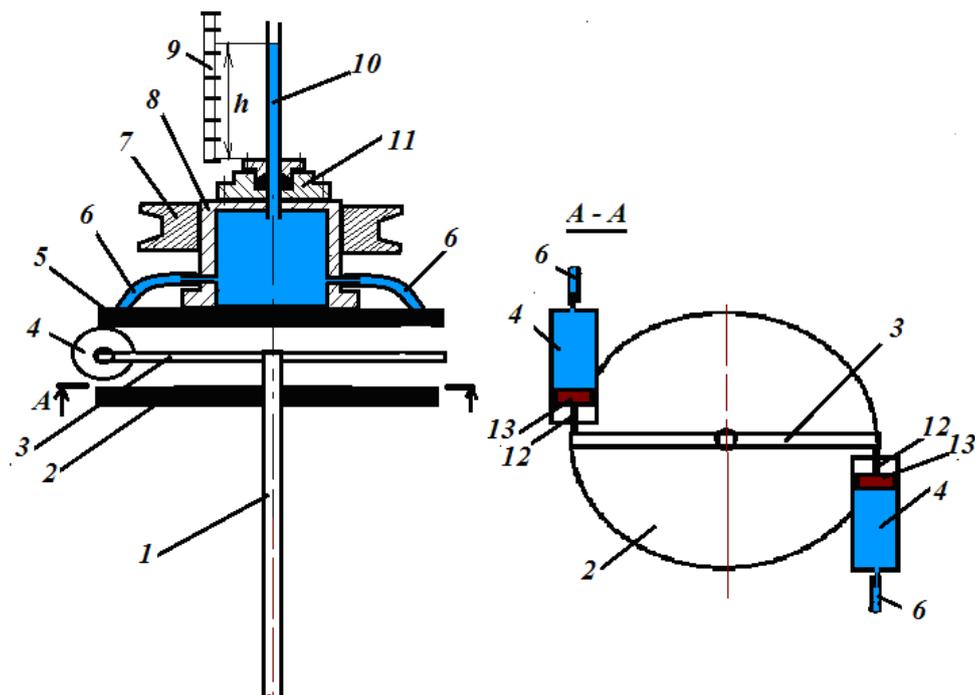


Рис. 4. Устройство для измерения крутящего момента: 1 – вал; 2 – нижняя полумуфта; 3 – рычаг; 4 – гидроцилиндры; 5 – верхняя полумуфта; 6 – гибкие трубки; 7 – шкив; 8 – емкость для подкрашенной жидкости; 9 – неподвижная шкала; 10 – пьезометр; 11 – сальниковое уплотнение; 12 – штоки; 13 – поршни

При передаче крутящего момента от шкива 7 к валу 1 происходит смещение верхней 5 и нижней 2 полумуфт. В результате давления рычага 3 на штоки 12 поршней 13 гидроцилиндров 4 в жидкости образуется избыточное давление. Гидроцилиндры с помощью гибких трубок 6 соединены с емкостью для подкрашенной жидкости 8. Это давление измеряется с помощью пьезометра 10, который закреплен в емкости для подкрашенной жидкости с помощью сальникового уплотнения 11. При этом пьезометр вращается вместе с верхней полумуфтой. Уровень жидкости в пьезометре h фиксируется визуально с помощью неподвижной шкалы 9.

По величине h определяется избыточное давление в емкости устройства $p = \rho gh$, где ρ – плотность подкрашенной жидкости, кг/м^3 . Это давление создается силой давления поршня на жидкость $F = pS$, где S – площадь поперечного сечения поршня, м^2 .

Крутящий момент через величину силы F рассчитывается как $M = Fl$, где l – длина рычага (плечо действующей силы), м [16].

По величине крутящего момента определяется мощность, затрачиваемая на перемешивание: $N = 2\pi nM$.



Для сравнения эффективности работы различных типов мешалок используют зависимость [13]:

$$K_N = f(\text{Re}_m, l_1, l_2, \dots),$$

где $K_N = \frac{N}{\rho n^3 d_m^5}$ – коэффициент мощности мешалки;

$\text{Re}_m = \frac{\rho n d_m^2}{\mu}$ – модифицированный критерий Рейнольдса;

d_m – диаметр мешалки, м;

μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

По величине крутящего момента можно рассчитать диаметр вала перемешивающего устройства по формуле [16]

$$d = 1,73 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_{кр}}{\sigma_{доп}}},$$

где $\sigma_{доп}$ – допустимое напряжение на кручение для выбранного материала вала; Па.

На основании многочисленных экспериментов на лабораторной установке для исследования эффективности работы механических мешалок определен диапазон изменения КМ, который составил от 0,05 до 0,3 Н·м. Приняв диаметр гидроцилиндра 32 мм и длину рычага 10 см, было рассчитано минимальное и максимальные значения давления в емкости устройства, которые составили 625 и 3750 Па соответственно. Тогда уровень жидкости в пьезометре h будет изменяться в пределах от 6,38 до 38,27 см.

Выводы

Разработана упрощенная конструкция устройства для измерения крутящего момента на учебной лабораторной установке для исследования эффективности работы механических мешалок.

Определен диапазон изменения крутящего момента, который составил от 0,05 до 0,3 Н·м.

Выполнен гидравлический расчет высоты уровня жидкости в пьезометре, который изменяется в пределах от 6,38 до 38,27 см.

Список источников

1. **Одинец С.С., Топлин Г.Е.** Средства измерения крутящего момента. М.: Машиностроение, 1977. 160 с.
2. **Гапонов В.Л., Гуринов А.С., Дудник В.В.** Измерение крутящего момента на вращающихся валах // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2012. № 1-2 (62). С. 25-32.
3. **Окопный Ю.А., Радин В.П., Чирков В.П.** Механика материалов и конструкций: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2001. 408 с.
4. Патент № 42312 РФ. Устройство измерения крутящего момента (варианты) / **Васильев В.В., Хохряков Б.Г., Бакалов С.И., Селезнев Г.Н., Писанко Е.Д.** Оpubл. 17.11.2004.
5. Патент № 2152011 РФ. Способ измерения крутящего момента и устройство для его реализации / **Великотный М.А., Кауфельдт А.К.** Оpubл. 27.06.2000.
6. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. 12-е изд., стер. и дораб. М.: Альянс, 2005. 750 с.
7. **Брагинский Л.Н., Бегачёв В.И., Барабаш В.М.** Перемешивание в жидких средах. Л.: Химия, 1984. 336 с.



8. **Барабаш В.М., Зеленский В.Е.** Перемешивание суспензий // *Теоретические основы химической технологии*. 1997. Т. 31, № 5. С. 465–473.
9. **Гирба Е.А., Леонтьев В.К.** Гидромеханические процессы: учеб. пособие. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2009. 91 с.
10. **Гельперин Н.И.** Основные процессы и аппараты химической технологии: в 2 кн. М.: Химия, 1981. 812 с.
11. **Айнштейн В.Г. и др.** Общий курс процессов и аппаратов химической технологии : учебник для студ. вузов, обуч. по хим.-технол. напр. и спец.: в 2 кн. Кн. 2. М.: Логос: Физматкнига, 2006. С. 891-1758.
12. **Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З.** Процессы и аппараты химической технологии: учебник для учащихся техникумов. 5-е изд., стер. М.: Химия, 1968. 848 с.
13. **Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов. 12-е изд., стер. М.: ООО ТИД «Альянс», 2005. 576 с.
14. **Леонтьев В.К., Кораблева О.Н.** Разработка комбинированной мешалки для перемешивания вязких сред // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2015. № 5. С. 13-14.
15. **Соломаха Г.П., Тарасова Т.А.** Масштабирование массообмена в системах газ – жидкость в аппаратах с механическим перемешиванием // *Теоретические основы химической технологии*. 1998. Т. 32, № 5. С. 502-506.
16. **Карпушкин С.В., Краснянский М.Н., Борисенко А.Б.** Расчёты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов: учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. 168 с.

Поступила в редакцию 26.12.2023

Одобрена после рецензирования 16.04.2024

Принята к опубликованию 22.05.2024