

РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ ОСЕВЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ТРЕХЛОПАСТНЫЕ МЕШАЛКИ

Сташевская О.В., Федотов В.В.

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург*

Ключевые слова: крутящий момент, мощность перемешивания, осевая гидродинамическая сила, трехлопастная мешалка.

Аннотация. В настоящей работе применительно к трехлопастной с наклонными лопастями мешалке получены расчетные зависимости для пусковой мощности, пускового крутящего момента на валу мешалки и осевой гидродинамической силы, воздействующих на мешалку во время пуска. Получены также зависимости, связывающие осевую гидродинамическую нагрузку с пусковой мощностью и пусковым крутящим моментом.

CALCULATION OF STARTING AXIAL HYDRODYNAMIC FORCES FOR THREE BLADES IMPELLERS

Stashevskaja O.V., Fedotov V.V.

Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint-Petersburg

Keywords: torque, power consumption, axial hydrodynamic force, three – blades impeller.

Abstract. Formulas for starting power consumption, starting torque and axial hydrodynamic force acting on the impeller with three inclined blades are obtained. Also formulas connecting the axial hydrodynamic force with starting power and starting torque are obtained.

Введение

Трехлопастные с наклонными лопастями мешалки относятся к числу быстроходных и широко применяются в химической и смежных отраслях промышленности при проведении процессов гомогенизации всевозможных жидкофазных сред в гладкостенных реакторах с центральным или эксцентричным расположением валов мешалок, а также в реакторах, оборудованных различными внутренними устройствами (например, отражательными перегородками, змеевиками и т.п.). Особенно эффективны такие мешалки при проведении процессов суспендирования [1,2].

Целью настоящей работы является получение расчетных зависимостей для максимальных значений мощности перемешивания, крутящего момента на валу мешалки и осевой гидродинамической силы, приложенной к мешалке в момент пуска реактора.

Эти зависимости позволяют физически обоснованно учесть воздействие гидродинамической среды с целью последующего выбора и комплексного расчета привода механического перемешивающего устройства и его элементов на прочность.

Основные расчетные зависимости

Рассмотрим трехлопастную с наклонными лопастями мешалку, состоящую из ступицы и трех приваренных к ней наклонных лопастей в виде прямоугольных пластин (рис. 1).

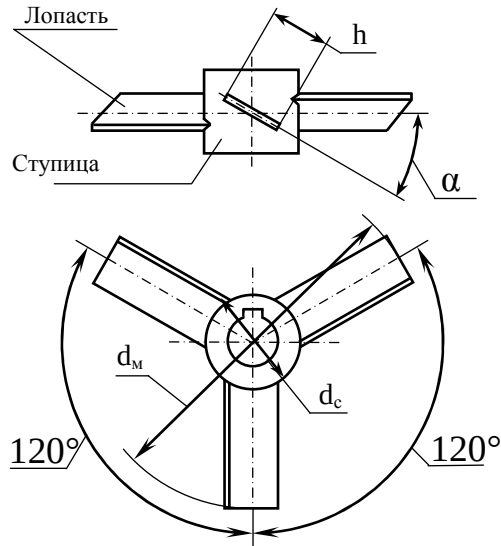


Рис. 1. Трехлопастная мешалка

Во время пуска условия обтекания лопасти мешалки с радиусом $r_m = 0,5d_m$ и радиусом ступицы $r_c = 0,5d_c$ соответствуют ее движению в неподвижной гидродинамической среде.

При этом на малый элемент лопасти hdr с углом наклона α к плоскости, перпендикулярной оси вращения мешалки, и находящейся на расстоянии r от начала координат в центре мешалки, со стороны жидкости в направлении нормали к лопасти действует элементарная гидродинамическая сила [2]:

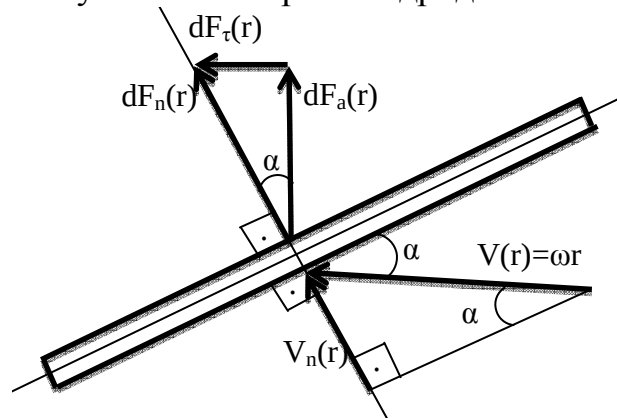


Рис. 2. Схема сил, действующих на лопасть мешалки

$$dF_n(r) = \xi \frac{\rho V_n^2(r)}{2} h dr, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент сопротивления лопасти; h – ширина лопасти; ρ – плотность жидкости; $V_n(r)$ – нормальная составляющая скорости набегающего потока жидкости.

Последняя, очевидно, равна (см. рис 2):

$$V_n(r) = \omega r \sin \alpha, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения мешалки.

Определим элементарный крутящий момент относительно оси вращения мешалки, возникающий за счет составляющей элементарной гидродинамической силы $dF_t(r)$, расположенной в плоскости, перпендикулярной оси вращения мешалки:

$$dT(r) = r dF_{\tau}(r) = r dF_n(r) \sin \alpha = \frac{1}{2} \xi \rho h \sin^3 \alpha \omega^2 r^3 dr. \quad (3)$$

Полная величина крутящего момента на валу мешалки может быть определена в результате интегрирования зависимости (3) по всей длине лопасти. С учетом наличия трех лопастей окончательно имеем:

$$T = 3 \int_{r_c}^{r_M} dT(r) = \frac{3}{2} \xi \rho h \sin^3 \alpha \omega^2 \int_{r_c}^{r_M} r^3 dr = \frac{3}{8} \xi \rho h r_M^4 \omega^2 \sin^3 \alpha \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^4 \right] =$$

$$\frac{3}{128} \xi \rho h d_M^4 \omega^2 \sin^3 \alpha \left[1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^4 \right]. \quad (4)$$

На основании формулы (4) возможна оценка мощности перемешивания в момент пуска:

$$N = T \omega = \frac{3}{8} \xi \rho h r_M^4 \omega^3 \sin^3 \alpha \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^4 \right] = \frac{3}{128} \xi \rho h d_M^4 \omega^3 \sin^3 \alpha \left[1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^4 \right]. \quad (5)$$

Суммарную осевую гидродинамическую силу F_a , действующую на мешалку, определим, проинтегрировав осевую составляющую элементарной гидродинамической силы по длине лопасти (см. рис. 2):

$$dF_a(r) = dF_n(r) \cos \alpha. \quad (6)$$

С учетом наличия трех лопастей у мешалки получим:

$$F_a = 3 \int_{r_c}^{r_M} dF_a(r) = \frac{3}{2} \xi \rho h \sin^2 \alpha \cos \alpha \omega^2 \int_{r_c}^{r_M} r^2 dr =$$

$$\frac{1}{2} \xi \rho h r_M^3 \omega^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^3 \right] = \frac{1}{16} \xi \rho h d_M^3 \omega^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha \left[1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^3 \right]. \quad (7)$$

Для типовой трехлопастной с наклонными лопастями мешалки (тип 01 по АТК 24.201.17-90) [1,3] с учетом $\alpha = 30^\circ$ формулы (4), (5) и (7) могут быть записаны в следующем виде:

$$T = 4,69 \cdot 10^{-2} \cdot \xi \rho h r_M^4 \omega^2 \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^4 \right] = 2,93 \cdot 10^{-3} \xi \rho h d_M^4 \omega^2 \left[1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^4 \right], \quad (8)$$

$$N = 4,69 \cdot 10^{-2} \cdot \xi \rho h r_M^4 \omega^3 \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^4 \right] = 2,93 \cdot 10^{-3} \cdot \xi \rho h d_M^4 \omega^3 \left[1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^4 \right], \quad (9)$$

$$F_a = 1,09 \cdot 10^{-1} \cdot \xi \rho h r_M^3 \omega^2 \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^3 \right] = 1,36 \cdot 10^{-2} \cdot \xi \rho h d_M^3 \omega^2 \left[1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^3 \right]. \quad (10)$$

Анализ зависимостей (4), (5) и (7) указывает на следующие закономерности:

1) по мере уменьшения угла наклона лопасти α уменьшаются крутящий момент на валу T , мощность перемешивания N и осевая гидродинамическая сила F_a ; при малых значениях α очевидны соотношения $T \sim \alpha^3$, $N \sim \alpha^3$ и $F_a \sim \alpha^3$, и, следовательно, при $\alpha \rightarrow 0$ будут выполняться условия $T \rightarrow 0$, $N \rightarrow 0$ и $F_a \rightarrow 0$;

2) по мере увеличения угла наклона α к его предельному значению $\alpha \rightarrow \pi/2$

$$T \rightarrow T \Big|_{\alpha = \frac{\pi}{2}}; \quad N \rightarrow N \Big|_{\alpha = \frac{\pi}{2}} \quad \text{и} \quad F_a \rightarrow 0,$$

где

$$T \Big|_{\alpha = \frac{\pi}{2}} = \frac{3}{8} \xi \rho h r_M^4 \omega^2 \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^4 \right] = \frac{3}{128} \xi \rho h d_M^4 \omega^2 \left[1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^4 \right], \quad (11)$$

$$N \Big|_{\alpha = \frac{\pi}{2}} = \frac{3}{8} \xi \rho h r_M^4 \omega^3 \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^4 \right] = \frac{3}{128} \xi \rho h d_M^4 \omega^3 \left[1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^4 \right]. \quad (12)$$

Сопоставляя формулы для мощности перемешивания N (5), крутящего момента на валу T (4) и осевой гидродинамической силы F_a (7), получим полезные для практики расчетные зависимости, связывающие осевую нагрузку с мощностью и крутящим моментом:

$$F_a = \frac{4}{3} \frac{N \operatorname{ctg} \alpha}{\omega r_M} \cdot \frac{1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^3}{1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^4} = \frac{8}{3} \frac{N \operatorname{ctg} \alpha}{\omega d_M} \cdot \frac{1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^3}{1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^4}, \quad (13)$$

$$F_a = \frac{4}{3} \frac{T \operatorname{ctg} \alpha}{r_M} \cdot \frac{1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^3}{1 - \left(\frac{r_c}{r_M} \right)^4} = \frac{8}{3} \frac{T \operatorname{ctg} \alpha}{d_M} \cdot \frac{1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^3}{1 - \left(\frac{d_c}{d_M} \right)^4}. \quad (14)$$

Заключение

В настоящей работе получены расчетные зависимости для максимальных значений мощности перемешивания, крутящего момента на валу мешалки и осевой гидродинамической силы, приложенной к мешалке в момент пуска.

Проанализированы особенности нагружения лопастей мешалки распределенной гидродинамической нагрузкой.

Полученные расчетные зависимости позволяют физически обоснованно учесть воздействие гидродинамической среды на мешалку в момент пуска с целью последующего выбора и комплексного расчета привода механического перемешивающего устройства аппарата с мешалкой и его элементов на прочность.

Полученные расчетные зависимости являются оригинальными, имеют теоретическую и практическую значимость. Эти зависимости могут быть использованы в комплексных прочностных расчетах приводов аппаратов, используемых в химической и смежных отраслях промышленности. Предложенные в данной работе расчетные зависимости в настоящий момент внедряются в учебный процесс при подготовке инженеров – химиков-технологов по учебной дисциплине «Прикладная механика».

Список литературы

1. Луцко А.Н. Прикладная механика. Пособие по проектированию / А.Н. Луцко, М.Д. Телепнев, В.М. Барановский, В.А. Яковенко, В.З. Борисов, Н.А. Марцулевич. – Изд. 4-ое, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2012. – 274с.
2. Брагинский Л.Н. Перемешивание в жидких средах / Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачев, В.М. Барабаш. – Ленинград: Изд-во «Химия», 1984. – 336с.
3. Механические перемешивающие устройства. Руководящий нормативный документ. Метод расчета. – Ленинград: Изд-во РТП ЛенНИИхиммаш, 1986. – 253с.

Сведения об авторах:

Сташевская Ольга Владимировна – старший преподаватель кафедры механики, СПбГТИ (ТУ), Санкт-Петербург;

Федотов Владимир Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры механики, СПбГТИ (ТУ), Санкт-Петербург.