

И.И. Бортников, В.Н. Павлечко, И.С. Павлушенко

О РАБОТЕ АППАРАТА С НЕСИММЕТРИЧНЫМИ ШАРНИРНО ЗАКРЕПЛЕННЫМИ МЕШАЛКАМИ

Шарнирное крепление мешалки представляет интерес не только при использовании нормализованных [1, 2, 4] быстроходных мешалок, но также и при использовании тихоходных несимметричных перемешивающих устройств.

В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований работы аппарата с несимметричными лопастными мешалками на шарнирно закрепленном валу и с мешалками лопастного типа, шарнирно соединенными непосредственно с валом привода.

При вращении вала привода на вал с несимметричной мешалкой действует неуравновешенная сила, отклоняющая вал от вертикальной оси аппарата на угол θ , при этом лопасть совершает сложное движение, интенсифицирующее процесс перемешивания по всему объему аппарата.

Эксперименты показали, что первоначально при незначительных скоростях вращения вала лопасть расположена относительно проекции вала под углом α (рис. 1, а). С увеличением скорости вращения угол хода

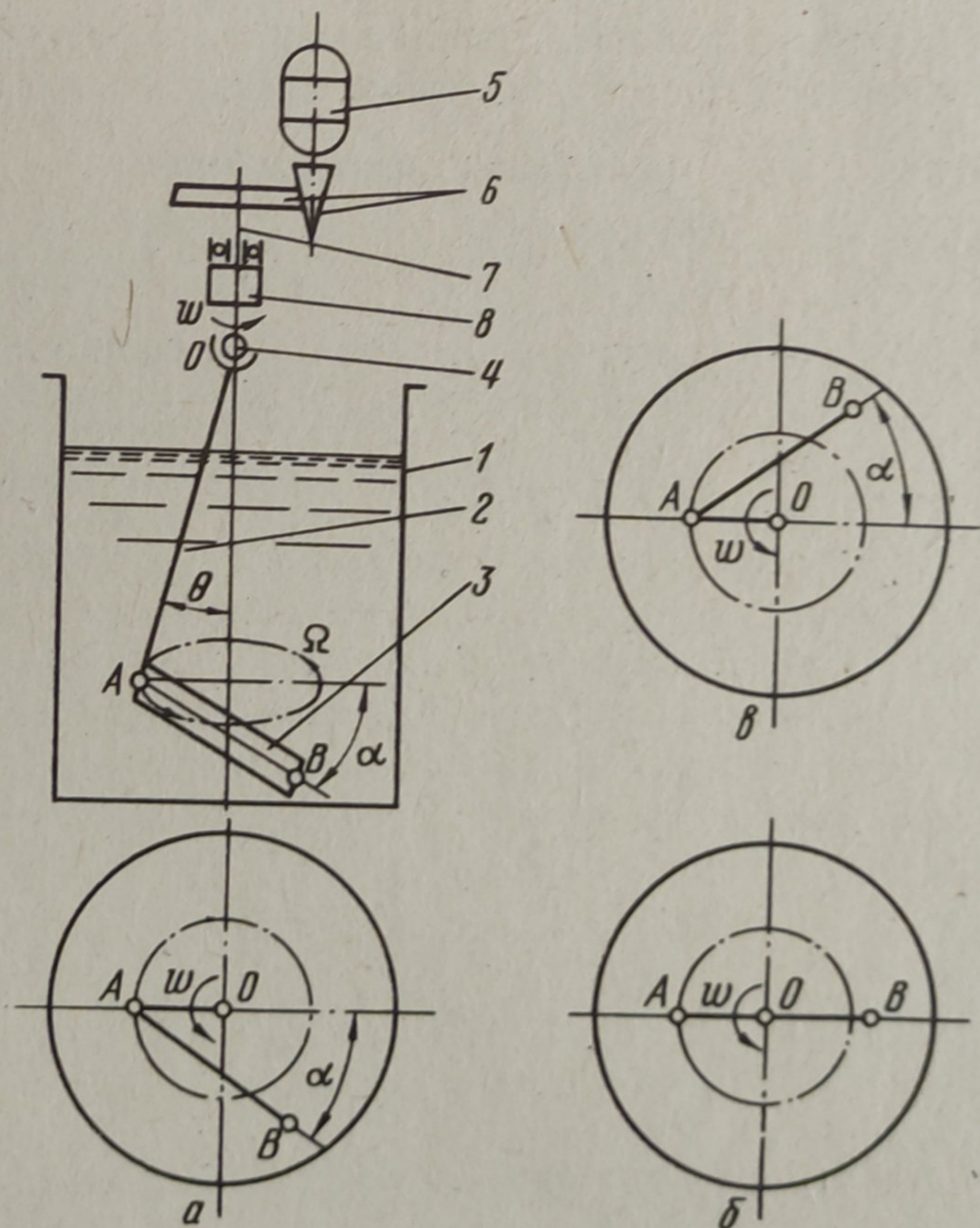


Рис. 1. Принципиальная схема аппарата с несимметричной мешалкой:
1—сосуд; 2—вал; 3—лопасть; 4—шарнир; 5—двигатель; 6—фрикционная передача; 7—вал привода; 8—тензометрическое устройство

лопасти α уменьшается и при некоторой скорости, называемой критической $\omega_{кр}$, проекция лопасти совпадает с проекцией вала (рис. 1, б). При дальнейшем увеличении скорости вращения вала, т.е. в закритическом режиме, проекция лопасти расположена по другую сторону от проекции вала (рис. 1, в).

При установившихся условиях мешалка с несимметричными лопастями имеет устойчивую траекторию движения. Угол отклонения вала от вертикальной оси аппарата θ и угол хода лопасти α зависят от размеров лопастей, частоты вращения и свойств перемешиваемой среды.

Для выяснения технологической пригодности аппаратов с несимметричными мешалками, шарнирно соединенными с валом привода, проведены экспериментальные исследования интенсивности и эффективности работы таких мешалок при перемешивании сред "жидкость— твердое" и "жидкость— жидкость".

Экспериментальные исследования показали, что при перемешивании несимметричными мешалками энергия на перемешивание пропорциональна кубу частоты вращения мешалки и длине лопасти r_m в пятой степени. Таким образом, энергия, потребляемая на перемешивание, в этом случае может быть определена по формуле

$$N = K_N \rho n^3 r_m^5 \quad \text{вт} \quad (1)$$

Проведенные опыты позволили установить графическую зависимость критерия мощности K_N от критерия Рейнольдса Re_ω для несимметричных мешалок различной формы при $Re_\omega = 1 \cdot 10^{-1} \div 1 \cdot 10^5$. Кроме того, было определено влияние ширины лопасти на потребляемую энергию. Эксперименты показали, что с учетом значений симплекса $\Gamma_\theta = \frac{b}{r_m}$ критерий мощности можно определить по выражению

$$K'_N = 1,9 K_N \Gamma_\theta^{0,39} \quad (2)$$

где K'_N — значение критерия мощности для мешалки с заданными значениями симплекса Γ_θ ; K_N — значение критерия мощности для мешалки с $\Gamma_\theta = 0,2$, определяемое по графику.

Из зависимости (2) видно, что мощность, подводимая к обрабатываемой среде, может быть значительно увеличена за счет увеличения ширины лопасти.

Результаты экспериментальных исследований по перемешиванию взвесей показали, что для нашего случая процесс суспендирования описывается следующим критериальным уравнением [5]:

$$\frac{n_0 \rho r_m^2}{\mu} = C \left(\frac{r_m^3 \rho^2 g}{\mu^2} \right)^t \left(\frac{\rho_r}{\rho} \right)^{k_1} \left(\frac{d_r}{r_m} \right)^{l^*} \left(\frac{b}{r_m} \right)^{m_1} \quad (3)$$

Результаты исследований, обработанные графоаналитическим спосо-

бом, позволили определить показатели степеней и коэффициент уравнения (3)

$$Re_{\omega} = C G \alpha^{0,5} J_p^{0,5} \Gamma_{d_r}^{0,25} \Gamma_b^{-0,15} \quad (4)$$

для мешалки, показанной на рис. 1, $C=0,75$. Определены значения этого коэффициента для несимметричных лопастных мешалок других форм. Среднее отклонение опытных и расчетных данных, вычисленных по уравнению (4), составляет $\pm 12\%$. Уравнение (4) справедливо в следующих пределах: $Re_{\omega} = 5 \cdot 10^1 \div 9 \cdot 10^3$; $G \alpha = 2 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^7$; $\Gamma_{d_r} = 4,58 \cdot 10^{-3} \div 2,75 \cdot 10^{-2}$; $\Gamma_b = 0,1 \div 0,6$.

Результаты экспериментов по перемешиванию взвесей позволили оценить интенсивность и эффективность перемешивания несимметричными мешалками. Эффективность оценивали по затратам мощности различными мешалками для обеспечения одинакового технологического результата, т.е. при определяющих частотах вращения. Экспериментальные данные показывают, что использование несимметричных мешалок дает возможность в некоторых случаях существенно снизить энергетические затраты на перемешивание.

Опыты по определению интенсивности работы мешалки при нейтрализации раствора щелочи позволили записать для нашего случая [3] выражение

$$\tau_n = C^* \left(\frac{n^2 r_m}{g} \right)^{-0,38} \left(\frac{D}{r_m} \right)^{0,48} \left(\frac{b}{r_m} \right)^{-0,68}, \quad (5)$$

где для мешалки, приведенной на рис. 1, $C=0,7$. Найдены также значения этих коэффициентов и для лопастных несимметричных мешалок других форм.

Полученные результаты позволяют выбрать оптимальные конструкции и формы несимметричных лопастных мешалок, подвижно соединенных с валом привода.

Для нормализованных аппаратов с лопастными мешалками на жестко закрепленном валу [6] рекомендуются значения $\Gamma_D = \frac{D}{r_m} = 1,4 \div 1,7$, что в аппаратах большого объема приводит к резкому возрастанию потребляемой энергии. Как показали эксперименты, при использовании несимметричных мешалок, шарнирно соединенных с валом привода, удельные затраты энергии практически не изменяются в сравнительно широком диапазоне изменения симплекса Γ_D (от 1,84 до 3). Следовательно, эффективное перемешивание мешалками этих типов можно осуществлять при высоких значениях симплекса Γ_D , что особенно важно для процессов перемешивания, осуществляемых в аппаратах больших объемов.

Для конструирования аппаратов с несимметричными перемешивающими устройствами, шарнирно соединенными с валом привода, необходимо определить угол отклонения вала θ от вертикальной оси аппарата и угол хода лопасти α .

При вращении несимметричной мешалки, рис. 1, в жидкой среде на шарнирно закрепленную систему действуют следующие силы: неравно-
вешенная сила S_1 , вызванная сопротивлением вращению лопасти;
сила сопротивления движению вала S_8 , сила веса P_1 , сила инер-
ции $F_{ин}$ и сила сопротивления вращению системы вокруг мгновен-
ной оси $S_{п}$.

В результате анализа получены следующие выражения для опреде-
ления этих сил, приведенных к точке А:

$$\begin{aligned} S_1 &= C_1 \rho \omega^2 b r_m^3, \text{ Н}; \\ S_8 &= C_2 \rho \omega^2 \sin^2 \theta d_b \frac{L^4 - H^4}{L}, \text{ Н}; \\ F_{ин} &= \frac{1}{3} m \omega^2 \sin \theta L, \text{ Н}; \\ P_1 &= \frac{mg}{2} \operatorname{tg} \theta, \text{ Н}; \\ S_{п} &= C_3 \rho \omega_1^2 b A, \text{ Н}, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{L \sin \theta \cos \alpha}{(r_m - K) - L \sin \theta \cos \alpha} \omega, \text{ рад/сек}; \\ A &= \left[(r_m - K)^3 + \frac{d_b}{b} (r_m - K)^2 \frac{L^3 - H^3}{L^2} - K^3 \right], \text{ м}^3; \end{aligned}$$

K — расстояние от свободного конца лопасти до мгновенного центра
вращения, м.

Величина K зависит от формы, размеров мешалки и уровня среды в
аппарате.

C_1, C_2, C_3 — коэффициенты сопротивления, зависящие от режима дви-
жения среды, размеров и формы мешалки.

Из условий равновесия системы получены следующие уравнения
для определения угла хода лопасти α и угла отклонения вала θ .

$$C_3 \left(\frac{L a \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha}}{(r_m - K) - L a \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha}} \right)^2 A = C_1 r_m^3 - \frac{d_b}{b} \frac{L^4 - H^4}{L} a^2 \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha}; \quad (7)$$

$$\theta = \arcsin \left(\frac{a}{\operatorname{tg} \alpha} \right), \quad (8)$$

где

$$a = \frac{4mgL \left(3 - 2\omega^2 \frac{L}{g}\right)}{3C_2 \rho d_s \omega^2 (L^4 - H^4)} \quad (9)$$

Решение уравнений (7) и (8) производили на ЭВМ "Промень-М", используя для определения коэффициентов сопротивления каждой мешалки экспериментальную зависимость $K_M = f(Rl_\omega)$.

В критическом режиме

$$\theta = \arcsin \frac{r}{2L},$$

При перемешивании взвесей и вязких сред предпочтительнее закритический режим работы, так как при этом достигается лучшее качество перемешивания.

Результаты исследований показали удовлетворительную сходимость опытных и расчетных значений углов θ и α . Среднее отклонение не превышает $\pm 18\%$.

Обозначения

D — диаметр аппарата, м; L — длина вала, м; b — ширина лопасти мешалки, м; r_M — длина лопасти мешалки, м; d_s — диаметр вала, м; m — масса вала, кг; $d_{r_{cp}}$ — средний диаметр твердой фазы, м; G_T — масса твердой фазы, кг; $G_{ж}$ — масса жидкой фазы, кг; g — ускорение свободного падения, м/сек²; H_0 — высота уровня жидкости в аппарате, м; H — расстояние от шарнира до уровня жидкости в аппарате, м; n — частота вращения мешалки, об/сек; n_0 — определяющая частота вращения мешалки при перемешивании взвесей, об/сек; C, C^*, t, K_1, l^*, m_1 — коэффициенты уравнений и показатели степеней, определяемые опытным путем; θ — угол отклонения вала мешалки от вертикали, рад; α — угол хода лопасти, рад; μ — динамический коэффициент вязкости среды, н сек/м²; ρ — плотность среды, кг/м³; ρ_r — плотность твердой фазы, кг/м³; τ — время достижения заданной степени однородности среды, т.е. время гомогенизации, сек; Ω — угловая скорость вращения мешалки относительно вертикальной оси привода, рад/сек; ω — угловая скорость собственного вращения мешалки, рад/сек; ω_1 — угловая скорость вращения системы вокруг мгновенной оси, рад/сек; $Rl_\omega = \frac{\rho n r_M^2}{\mu}$ — центробежный

критерий Рейнольдса; $Fr_\omega = \frac{n^2 r_M}{g}$ — центробежный критерий Фру-

да; $Ga = \frac{r_M^3 \rho^2 g}{\mu^2}$ — критерий Галилея; $J_\rho = \frac{\rho_r}{\rho}$;

$$\Gamma_{d_r} = \frac{d_r}{r_M} ; \quad \Gamma_B = \frac{b}{r_M} \quad - \text{симплексы геометрического подобия.}$$

Литература

1. И.И. Бортников и др. Химическое и нефтяное машиностроение № 6, 21 (1967).
2. И.С. Павлушенко, А.И. Мильченко. Химическое и нефтяное машиностроение, № 6, 10 (1971).
3. Гидродинамические и тепломассообменные процессы в химической аппаратуре. Тр. — ЛенинНИИХИММАШ, № 2, 66 (1967).
4. МН 5874-66. Аппараты с перемешивающими устройствами вертикальные. Перемешивающие устройства механические. Типы, параметры, конструкция и исполнительные размеры. М., 1970.
5. И.С. Павлушенко, Н.М. Костин, С.Ф. Матвеев. ЖПХ, 30, 8, 1160 (1957).
6. РТМ 144-66. Аппараты с перемешивающими устройствами вертикальные. Перемешивающие устройства механические. Область применения, методика расчета. М., 1969.
7. Zwietering T.N. Chem. Eng. Sci., 8, 244 (1958).