

Работа выполнена в Белорусском технологическом институте  
имени С.М.Кирова.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент  
Бортников И.И.

Официальные оппоненты - член корреспондент АН БССР,  
доктор технических наук, профессор  
Саламатов И.И.  
кандидат технических наук, доцент  
Карасев И.Н.

Ведущая организация - Ленинградский научно-исследовательский  
и конструкторский институт химическо-  
го машиностроения.

Защита диссертации состоится " 4 " апреля 1979 года в 10  
часов на заседании специализированного совета К-056.01.03 по  
присуждению ученой степени кандидата наук в Белорусском техно-  
логическом институте имени С.М.Кирова, 220630, г.Минск-50,  
ул.Свердлова, 13А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского  
технологического института имени С.М.Кирова.

Автореферат разослан " 12 " апреля 1979 года.

Ученый секретарь специализированного  
совета, кандидат химических наук

Давыд Б.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развивающиеся химическая, микробиологическая, лакокрасочная и другие отрасли промышленности требуют аппаратов большой единичной мощности, в том числе и аппаратов с механическим перемешиванием. Поэтому, одной из главных тенденций развития аппаратов с перемешивающими устройствами является увеличение их единичной мощности. В аппаратах с механическими мешалками при традиционном жестком креплении валов увеличение объема, наряду со значительно возрастающими затратами энергии на привод, требует также существенного увеличения диаметра валов, необходимого для компенсации возрастающих поперечных изгибных колебаний. Аппараты с шарнирным креплением валов выгодно отличаются от аппаратов других конструкций простотой устройства, наличием планетарного (прецессионного) движения, надежностью конструкции привода и уменьшающейся стоимостью привода. Кроме того, отклоненный шарнирно закрепленный вал непосредственно участвует в перемешивании, улучшая качество перемешивания по высоте аппарата. С целью более полного использования вала как активного элемента перемешивающего устройства и улучшения условий перемешивания по высоте аппарата, в последнее время предложен аппарат с несимметричной лопастью на шарнирно закрепленном валу. Практически полное отсутствие данных по исследованию перемешивания несимметричной мешалкой на шарнирно закрепленном валу и обусловило появление настоящей работы.

Цель работы. Цель работы - уточнение физической картины и выявление закономерностей движения несимметричной мешалки на шарнирно закрепленном валу. Исследования проводились с целью определения зависимостей, необходимых для проектирования аппарата с несимметричной мешалкой на шарнирно закрепленном валу, в частности для расчета угла отклонения вала от вертикали  $\theta$ , угла хода лопасти  $\alpha$  и определяющей частоты вращения  $\Pi$ , при перемешивании взвесей и приготовлении эмульсий, а также для выбора оптимального режима движения.

Научная новизна работы. Дополнена физическая картина движения несимметричной мешалки на шарнирно закрепленном валу. Проведен анализ сил, действующих на несимметричную мешалку, и получены уравнения равновесия сил при движении мешалки в установившихся условиях. На основе анализа этих сил в зависимости от угловой

БИБЛИОТЕКА БТИ  
им. С. М. Пирова

скорости и длины вала движение несимметричной мешалки разделено на три режима: докритический, критический и закритический. Решением уравнений равновесия впервые получены зависимости для расчетного определения угла отклонения вала от вертикали и угла хода лопасти для каждого режима. Установлены численные значения коэффициентов, показателей степеней в зависимостях для расчетного определения максимального угла отклонения вала от вертикали при пуске и соответствующего угла хода лопасти. Показано, что конструктивные особенности несимметричной мешалки не оказывают существенного влияния на изменения угла отклонения вала от вертикали и угла хода лопасти при остановке привода. Получены зависимости для инженерного расчета определяющих частот вращения при перемешивании взвесей и приготовления эмульсий. Определены условия наиболее полного использования шарнирно закрепленного вала в качестве перемешивающего органа.

Практическая ценность. Создана методика расчета аппарата с несимметричной мешалкой на шарнирно закрепленном валу, позволяющая определять значения угла отклонения вала от вертикали и угла хода лопасти при установившихся условиях движения и в процессе пуска, а также находить определяющую частоту вращения при перемешивании взвесей и эмульсий. Результаты исследований использованы ЛениИИХиммашем при разработке технической документации несимметричного перемешивающего устройства на шарнирно закрепленном валу для усовершенствования действующих полимеризаторов объемом  $10 \text{ м}^3$  в производстве суспензионного полистирола на Ангарском ПО "Нефтеоргсинтез". Техническая документация передана для внедрения. Кроме того, ЛениИИХиммаш использовал результаты исследований при разработке технического проекта аппарата - усреднителя объемом  $100 \text{ м}^3$  в производстве дисперсии винилацетата с этиленом. Технический проект передан заводу - изготовителю "Центхиммаш".

Апробация работы. Результаты выполненных исследований докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях БИ им.С.М.Кирова в 1973-1978 г.г., на 7 молодежной научно-технической конференции (Харьков, 1976 г.), на Третьей Всесоюзной конференции по теории и практике перемешивания в жидких средах (Черкассы, 1976 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 печатные ра-

боты, включая статьи и опубликованные тезисы докладов.

**Объем работы.** Диссертационная работа изложена на 147 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 7 таблиц и состоит из введения, 4 глав, заключения и приложения. Список цитированной литературы включает 65 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

### 1. Особенности движения несимметричной мешалки на шарнирно закрепленном валу.

При работе несимметричной мешалки на шарнирно закрепленном валу в жидкой среде вал отклоняется на угол  $\theta$  от вертикальной оси аппарата, вращаясь относительно собственной оси с угловой скоростью  $\omega$  и относительно вертикальной оси аппарата с угловой скоростью  $\Omega$ . При этом несимметричная лопасть располагается под углом  $\alpha$  к проекции вала на горизонтальную плоскость.

При малых угловых скоростях лопасть идет впереди вала (рис. 1а). Мешалка работает в докритическом режиме. С увеличением угловой скорости угол хода лопасти уменьшается и при некоторой скорости, называемой критической  $\omega = \omega_{кр}$ , становится равным нулю (рис. 1б). Наступает критический режим работы, при котором проекция вала и лопасти на горизонтальную плоскость совпадают. При дальнейшем увеличении угловой скорости  $\omega > \omega_{кр}$  в закритическом режиме работы угол хода лопасти увеличивается, но лопасть занимает положение, при котором она следует за валом (рис. 1в), то есть лопасть располагается по другую сторону от проекции вала по сравнению с докритическим режимом работы.

При установившихся условиях, когда  $\omega = const$ , несимметричная мешалка имеет устойчивую траекторию движения  $\Omega = \omega$ ,  $\alpha = const$ ,  $\theta = const$ .

### 2. Движение мешалки при установившихся условиях

При анализе сил, действующих на систему, получены следующие выражения их:

$$S = S_1 = S_2 = \int \frac{\rho b}{6} \omega_1^2 z^3; \quad (1)$$

$$S_\theta = S_{\theta_1} = S_{\theta_2} = \int \frac{\rho d_s}{6} \omega_2^2 (L^3 - H^3) \sin^2 \theta; \quad (2)$$

$$S_n = \int \frac{\rho b}{2} \omega_2^2 L^2 z \sin^2 \theta \cos \alpha; \quad (3)$$

$$P_{\theta} = \frac{1}{2} m g \sin \theta; \quad (4)$$

$$P_u = \frac{1}{3} m \omega^2 L \sin \theta, \quad (5)$$

где  $S$  - сила сопротивления среды вращению лопасти относительно оси вала, Н;  $S_1 = S_2 = S$ ;  $S_{\theta}$  - сила сопротивления среды вращению вала относительно вертикальной оси аппарата, Н;  $S_{\theta 1} = S_{\theta 2} = S_{\theta}$ ;  $S_n$  - сила сопротивления среды поступательному перемещению лопасти, Н;  $P_{\theta}$  - составляющая силы веса мешалки, Н;  $P_u$  - сила инерции мешалки, Н;  $\theta, \tau$  - высота и длина лопасти, м;  $d_0, L$  - диаметр и длина вала, м;  $H$  - расстояние от шарнира до уровня жидкости в аппарате, м;  $m$  - масса вала, кг;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho$  - плотность перемешиваемой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi, \xi_{\theta}$  - коэффициенты сопротивления лопасти и вала. Полагаем,  $\xi = \xi_{\theta}$ ;  $\omega_1$  - мгновенная угловая скорость вращения лопасти относительно оси вала, рад/с;  $\omega_2$  - мгновенная угловая скорость вращения вала относительно вертикальной оси аппарата, рад/с.

При установившихся условиях работы мешалка находится в равновесии и сумма проекций сил на ось, проходящую через проекцию лопасти АВ (рис.2), и на ось перпендикулярную к ней, а также моментов всех сил относительно точки А равна нулю. Момент сопротивления, образованный парами сил  $S$  и  $S_2$ ,  $S_{\theta}$  и  $S_{\theta 2}$ , уравновешивается крутящим моментом привода.

$$S_{\theta 1} \sin \alpha - (P_{\theta} - P_u) \cos \alpha = 0; \quad (6)$$

$$S_1 - S_n - S_{\theta 1} \cos \alpha - (P_{\theta} - P_u) \sin \alpha = 0; \quad (7)$$

$$S_1 L \sin \theta \cos \alpha - S_n \frac{\tau}{2} = 0; \quad (8)$$

$$S_1 \left( \frac{3}{4} \tau - L \sin \theta \cos \alpha \right) - S_{\theta} \ell = \frac{K_M \rho \omega_1^2 \tau^5}{(25\pi)^3}, \quad (9)$$

где  $\ell = \frac{1}{4} \frac{L^2 - H^2}{L - H} \sin \theta$ , м;  $K_M$  - критерий мощности. Значения  $K_M$  для всех режимов приведены в работе\*. Несимметричная мешалка на шарнирно закрепленном валу наиболее эффективно работает при максимальном погружении вала в перемешиваемую среду. В этом случае величина  $H$  мала. Поэтому для практических расчетов можно принять

\*Бортников И.И., Павлушенко И.С. Некоторые характеристики несимметричных шарнирно закрепленных мешалок. - Химическое и нефтяное машиностроение, 1974, №9, с.11-13.

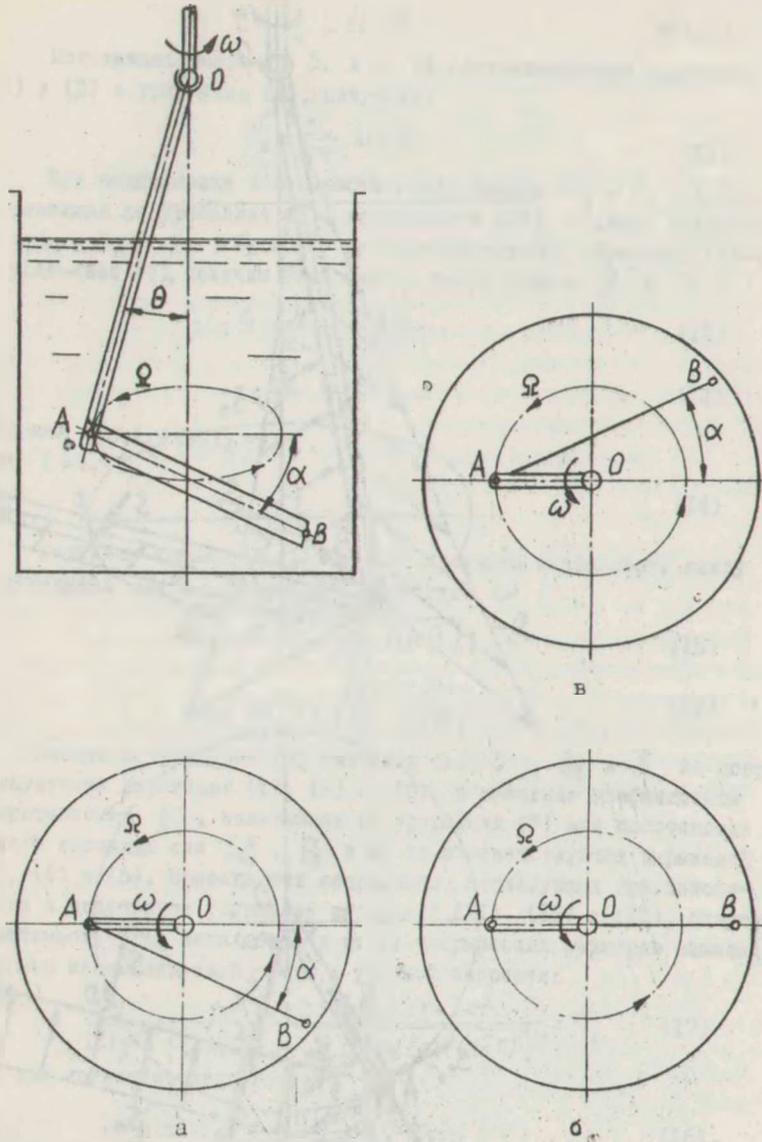


Рис.1. Общий вид и режимы движения несимметричной мешалки:  
а - докритический, б - критический, в - закритический

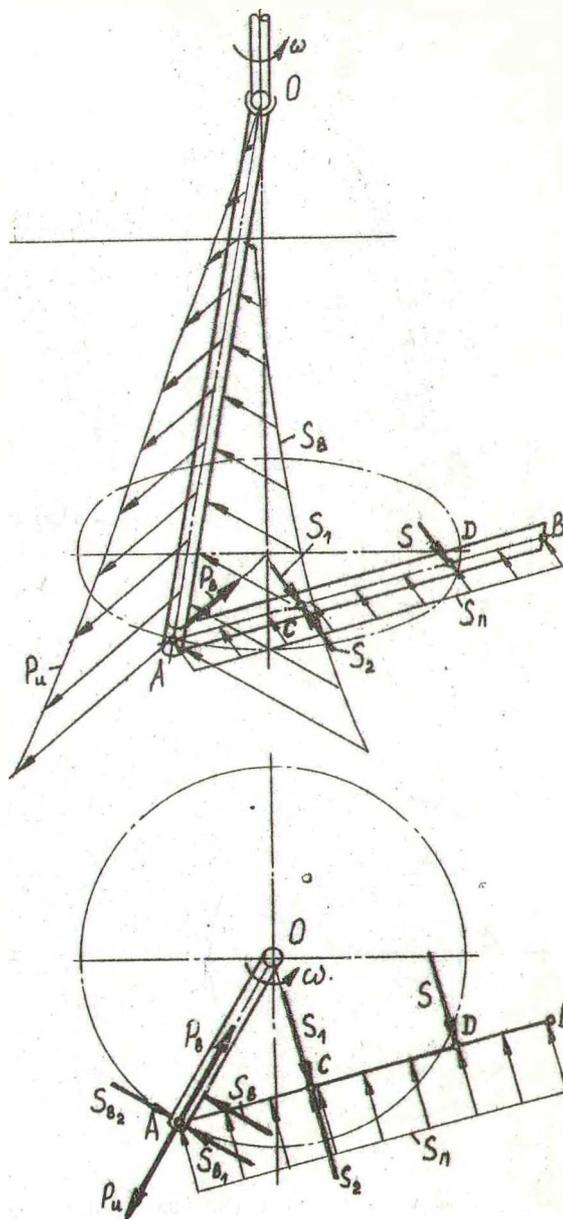


Рис. 2. Силы, действующие на несимметричную мешалку

$$l = \frac{1}{4} L \sin \theta \quad (10)$$

Подставляя значения  $S_1$  и  $S_n$  из соответствующих выражений (I) и (3) в уравнение (8), получаем:

$$\frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{3L}{2\tau} \sin \theta. \quad (11)$$

При подстановке зависимости между силами ( $P_\theta - P_u$ ) и  $S_{\theta 1}$ , вытекающей из уравнения (6), зависимости (10), а также значений сил  $S_1$ ,  $S_{\theta 1}$ ,  $S_n$ ,  $P_\theta$  и  $P_u$  из соответствующих выражений (I)-(5) в уравнение (7), получим зависимость между углами  $\theta$  и  $\alpha$ :

$$\sin \theta = \frac{\tau}{2L} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos^2 \alpha + c}, \quad (12)$$

где

$$c = \frac{d_\theta}{\ell} \cdot \frac{L^3 - H^3}{3L^2\tau}. \quad (13)$$

Так как  $\omega_1 t_1 = \omega_2 t_2 = \omega t$ ,

где  $t = t_1 + t_2$ ,

то

$$\frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_2} = \frac{1}{\omega}. \quad (14)$$

Решением выражений (II) и (14) получаем зависимости между мгновенными  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и угловой скоростью  $\omega$ :

$$\omega_1 = \omega \left( 1 + \sqrt{\frac{3L}{2\tau} \sin \theta} \right); \quad (15)$$

$$\omega_2 = \omega \left( 1 + \sqrt{\frac{2\tau}{3L} \frac{1}{\sin \theta}} \right). \quad (16)$$

Введем в уравнение (9) значения сил  $S$ ,  $S_\theta$  и  $\ell$  из соответствующих выражений (I), (2) и (10) и значение коэффициента сопротивления  $\xi$ , полученное из уравнения (6) при подстановке в него значений сил  $S_{\theta 1}$ ,  $P_\theta$  и  $P_u$  из соответствующих выражений (2), (4) и (5). Проведя ряд сокращений, последующих при подстановке в полученное уравнение выражений (II), (16) и (12), получим зависимость угла хода лопасти от геометрических размеров мешалки, свойств перемешиваемой среды и угловой скорости:

$$\frac{1}{c \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot (\cos^2 \alpha + c + \sqrt{\frac{3}{4}} \cos \alpha (\cos^2 \alpha + c))} = K, \quad (17)$$

где для докритического режима

$$K = K' = \frac{2K_n \rho \omega^2 \tau^3 L}{\pi^3 m g \left( 1 - \frac{2}{3} \omega^2 \frac{L}{g} \right)} \quad (18)$$

или

$$K = K' = \frac{K_H \rho \omega^2 z^3 L}{10 m (15 - \omega^2 L)}. \quad (19)$$

Таким образом, из выражений (17) и (18) или (17) и (19) получаем значение угла хода лопасти  $\alpha$ , а из выражения (12) - значение угла отклонения вала от вертикали  $\theta$ .

Для критического режима, когда  $\alpha = 0$ , из уравнения (6) получаем:

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{g}{L}}. \quad (20)$$

Выражение (20) показывает, что критический режим наступает в случае совпадения угловой скорости вала с частотой колебания шарнирно закрепленной системы как физического маятника, что согласуется с работами по исследованию нормализованных мешалок на шарнирно закрепленных валах.

Из выражения (12) применительно к критическому режиму ( $\alpha = 0$ ) получаем:

$$\sin \theta_{кр} = \frac{z}{2L} \cdot \frac{1}{1+C}. \quad (21)$$

Выражение (21) показывает, что в критическом режиме работы угол  $\theta_{кр}$  не зависит от свойств перемешиваемой среды, а определяется размерами вала и лопасти.

Для закритического режима уравнения равновесия аналогичны уравнениям (6) - (9) для докритического режима. Однако в связи с изменившимся взаимным расположением проекций вала и лопасти на горизонтальную плоскость выражение (19) для закритического режима соответственно имеет вид:

$$K = K'' = \frac{K_H \rho \omega^2 z^3 L}{10 m (\omega^2 L - 15)}. \quad (22)$$

Первая и вторая производные выражения (12) показывают, что наибольший угол отклонения вала от вертикали  $\theta$  при  $C \leq 1$  возможен в случае  $\alpha = \alpha_1 \cos \sqrt{C}$ , а при  $C \geq 1$  - в критическом режиме ( $\alpha = 0$ ).

Для закритического режима при увеличении угловой скорости  $\omega$ , а следовательно, и силы инерции  $P_u$  можно пренебречь составляющей силы веса  $P_g$ . В этом случае выражение (22) принимает вид:

$$K = K'' = \frac{K_H \rho z^3}{10 m}. \quad (23)$$

Выражения (23), (17) и (12) показывают независимость углов  $\theta$  и  $\alpha$  от угловой скорости в закритическом режиме, когда  $\omega \gg \omega_{кр}$ .

### 3. Движение мешалки при неустановившихся условиях

При пуске мешалки вал первоначально отклоняется на угол, значительно больший угла, на который отклоняется вал в установившихся условиях движения. Первоначально при включении привода угол отклонения вала от вертикали увеличивается от нуля до некоторого максимального значения  $\theta_{max}$ . Далее угол отклонения вала от вертикали уменьшается и вал, совершая затухающие колебания, через определенный отрезок времени занимает рабочее положение, которое характеризуется установившимся значением угла  $\theta$ . При пуске изменяется также и величина угла хода лопасти  $\alpha$ . Установлено, что изменение угла отклонения вала от вертикали и угла хода лопасти происходит в противофазе, то есть в момент максимального значения угла отклонения вала от вертикали угол хода лопасти имеет минимальное значение и, наоборот, при минимальном значении угла отклонения вала от вертикали — угол хода лопасти максимален.

Для практических расчетов важно знать максимальные значения углов отклонения вала от вертикали  $\theta_{max}$  и соответствующие им значения углов хода лопасти  $\alpha_{min}$ .

Аналитическое определение максимального угла отклонения вала от вертикали и минимального угла хода лопасти в неустановившихся условиях работы представляет значительные трудности. В связи с этим, методом анализа размерностей получены критериальные уравнения, дающие возможность определить искомые углы. Для случая несимметричной мешалки на шарнирно закрепленном валу эти уравнения имеют вид:

$$\theta_{max} = C_{\theta} Re_{\psi}^{a_1} Fz_{\psi}^{b_1} \left(\frac{D}{z}\right)^{c_1} \left(\frac{b}{z}\right)^{d_1} \left(\frac{L}{z}\right)^{e_1} \left(\frac{d_0}{z}\right)^{f_1} \left(\frac{H_0}{z}\right)^{g_1}; \quad (24)$$

$$\alpha_{min} = C_{\alpha} Re_{\psi}^{a_2} Fz_{\psi}^{b_2} \left(\frac{D}{z}\right)^{c_2} \left(\frac{b}{z}\right)^{d_2} \left(\frac{L}{z}\right)^{e_2} \left(\frac{d_0}{z}\right)^{f_2} \left(\frac{H_0}{z}\right)^{g_2}, \quad (25)$$

где  $Re_{\psi} = \frac{\rho n z^2}{\mu}$  — критерий Рейнольдса;  $Fz_{\psi} = \frac{n^2 z}{g}$  — критерий Фруда;  $D$  — диаметр аппарата, м;  $H_0$  — высота наближения аппарата средой, м;  $n$  — частота вращения мешалки, об/с;  $\mu$  — вязкость перемешиваемой среды, Па·с.

При остановке привода угол отклонения вала от вертикали плавно, без колебаний и скачков уменьшается и принимает нулевое значение. Соответственно изменяется и угол хода лопасти. Таким образом, изменение угла отклонения вала от вертикали и угла хода лопасти при остановке практического интереса не представляют. В связи с этим в настоящей работе более подробного исследования закономерностей изменения этих углов, чем качественный их анализ, не проводилось.

#### 4. Некоторые технологические характеристики аппарата

В настоящей работе исследована работа мешалки для получения взвесей и эмульсий. Частоты вращения, обеспечивающие извешивание твердых частиц и равномерное распределение дисперсной фазы в сплошной среде, могут быть найдены по известным критериальным зависимостям для нормализованной мешалки на жестко закрепленном валу. Для случая несимметричной мешалки на шарнирно закрепленном валу эти критериальные уравнения при получении взвесей и эмульсий имеют соответственно вид:

$$Re_3 = C_1 A_7^{a_1} \left(\frac{d_4}{7}\right)^{b_1} \left(\frac{D}{7}\right)^{c_1} \left(\frac{\delta}{7}\right)^{d_1} \left(\frac{G_7}{G_8}\right)^{e_1}; \quad (26)$$

$$Re_3 = C_1'' A_7^{a_2} \left(\frac{Re_3}{We_3}\right)^{b_2} \left(\frac{D}{7}\right)^{c_2} \left(\frac{\delta}{7}\right)^{d_2} \left(\frac{L}{7}\right)^{e_2} \left(\frac{d_4}{7}\right)^{f_2} \left(\frac{\mu_\phi}{\mu}\right)^{g_2}; \quad (27)$$

где  $Re_3 = \frac{\rho n_0 r^2}{\mu}$  - критерий Рейнольдса;  $A_7 = \frac{r^3 \rho \Delta \rho g}{\mu^2}$  - критерий Архимеда;  $We_3 = \frac{\rho n^2 r^3}{\sigma}$  - число Вебера;  $\Delta \rho = \rho^* - \rho_\phi$  - разность плотностей для эмульсий, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta \rho = \rho_c - \rho$  - разность плотностей для суспензий, кг/м<sup>3</sup>;  $n_0$  - определяющая частота вращения мешалки, об/с;  $\rho_c$  - плотность частиц твердой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $G_7$  - масса твердой фазы, кг;  $G_8$  - масса жидкой среды, кг;  $\sigma$  - поверхностное натяжение, Н/м;  $\mu_\phi$  - вязкость дисперсной фазы, Па·с;  $\rho_\phi$  - плотность дисперсной фазы, кг/м<sup>3</sup>.

#### 5. Экспериментальная часть

Задача экспериментального исследования состояла в подтверждении справедливости зависимостей для расчета значений угла хода лопасти в докритическом (17) и (18) и закритическом (17) и (22) режимах, угла отклонения вала от вертикали (12), угловой скорости мешалки в критическом режиме (20) и угла отклонения вала от вертикали в критическом режиме (21), а также в опытно определе-

нии значений коэффициентов и показателей степеней в обобщенных уравнениях для расчета максимального угла отклонения вала от вертикали (24), минимального угла хода лопасти (25), определяющей частоты вращения при перемешивании взвесей (26) и эмульсий (27).

Экспериментальные исследования проводили на специальной установке, позволяющей в широких пределах изменять рабочие и конструктивные характеристики аппарата: рабочие скорости, геометрические размеры мешалки и аппарата и перемешиваемой среды.

В опытах применяли плоскодонные сосуды диаметром 0,28 и 0,54 м. Установленная под днищем кинокамера "Экран-3" позволяла определять углы  $\theta$  и  $\alpha$ .

Определяющие частоты вращения мешалки, соответствующие взвешиванию всех твердых частиц, находящихся в сосуде, при перемешивании взвесей и полному распределению дисперсной фазы в сплошной среде при приготовлении эмульсий находили по известным методам.

В опытах применяли лопасти длиной  $\tau = 0,06, 0,075, 0,1, 0,125, 0,135$  и  $0,15$  м при  $\frac{L}{\tau} = 0,2$  и длиной  $\tau = 0,1$  м при  $\frac{L}{\tau} = 0,1, 0,4$  и  $0,6$ , валы длиной  $L = 0,365$  м при  $d_d = 0,0095, 0,015$  и  $0,025$  м и длиной  $L = 0,3, 0,4, 0,5$  и  $0,59$  м при  $d_d = 0,01$  м. Высоту заполнения сосуда средой изменяли в пределах  $H_0 = 0,05, 0,1, 0,15, 0,2$  и  $0,25$  м.

Жидкими средами служили вода, глицерин, ( $\rho = 1250$  кг/м<sup>3</sup>), парафин ( $\rho = 780$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 0,005$  Па·с), масло трансформаторное ( $\rho = 877$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu = 0,0165$  Па·с). Вязкость глицерина изменяли в пределах 0,054-3,03 Па·с нагреванием его до различных температур. В качестве твердой фазы применяли кварцевый песок со средним диаметром частиц  $d_c = 0,00075$  и  $0,00275$  м ( $\rho_c = 2620$  кг/м<sup>3</sup>) и барит ( $d_c = 0,00075$  м,  $\rho_c = 4300$  кг/м<sup>3</sup>). Отношение массы твердой фазы к массе жидкой среды изменяли в пределах  $\frac{G_c}{G_{ж}} = 0,05-0,2$ . В качестве сплошных сред использовали воду и глицерин, в качестве дисперсных фаз - парафин и масло трансформаторное.

Результаты экспериментальных исследований показали справедливость проведенного анализа сил и удовлетворительную точность выражений для определения значений угла хода лопасти в докритическом (17) и (18) и закритическом (17) и (22) режимах, угла отклонения вала от вертикали в докритическом, закритическом (12) и критическом (21) режимах и угловой скорости мешалки в критическом режи-

ме (20). Расхождение опытных и рассчитанных по соответствующим формулам данных составляет в среднем  $\pm 15\%$  для  $\theta$  -  $20\%$  для  $\alpha$ ,  $\pm 7\%$  для  $\omega_{кр}$  и  $\pm 12\%$  для  $\theta_{кр}$ . Указанное расхождение для значе- ний углов отклонения вала от вертикали и углов хода лопасти не- сколько больше для воды, причем, опытные значения углов превос- ходят, как правило, их расчетные значения. Последнее связано о- тем, что расчетные зависимости предполагают неподвижность пере- мешиваемой среды, а в аппарате без перегородок маловязкие среды под действием перемешивающего устройства совершают вращательное движение относительно вертикальной оси аппарата. В связи с этим расчетные зависимости (12), (17), (18) и (22) рекомендуется при- менять для аппаратов, в которых перемешиваются среды вязкостью 0,1 Па·с и более.

Опыты по определению максимального угла отклонения вала от вертикали и минимального угла хода лопасти при пуске проведены в закритическом режиме работы аппарата, который рекомендуется бо- чим режимом для промышленных аппаратов.

Эксперименты показали, что при пуске значения максимального угла отклонения вала от вертикали и минимального угла хода ло- пасти в исследованных пределах изменения переменных практически не зависят от свойств перемешиваемой среды.

Проведенные исследования позволили записать уравнения (24) и (25) в виде:

$$\theta_{max} = 40,6 F_{z_4}^{0,25} \left(\frac{D}{z}\right)^{-0,29} \left(\frac{\theta}{z}\right)^{0,35} \left(\frac{L}{z}\right)^{-0,75} \left(\frac{d_4}{z}\right)^{-0,65} \left(\frac{H_0}{z}\right)^{-0,13}, \text{ град.} \quad (28)$$

$$\alpha_{min} = 800 F_{z_4}^{1,4} \left(\frac{D}{z}\right)^{0,23} \left(\frac{\theta}{z}\right)^{-0,12} \left(\frac{L}{z}\right)^{1,8} \left(\frac{d_4}{z}\right)^{0,65} \left(\frac{H_0}{z}\right)^{0,3}, \text{ град.} \quad (29)$$

Расхождение опытных и расчетных данных, вычисленных по урав- нениям (28) и (29), не превышает  $\pm 12\%$  для  $\theta_{max}$  и  $\pm 30\%$  для  $\alpha_{min}$ .

Уравнения (28) и (29) справедливы в следующих пределах изме- нения переменных:

$$Re_{z_4} = 5,8 - 25000; \quad F_{z_4} = 6,12 \cdot 10^{-3} - 63,8 \cdot 10^{-3}; \quad \Gamma_D = 3 - 5;$$

$$\Gamma_{\theta} = 0,1 - 0,4; \quad \Gamma_L = 3,0 - 9,66; \quad \Gamma_{d_4} = 0,095 - 0,417;$$

$$\Gamma_{H_0} = 0,5 - 4,66.$$

Для уменьшения максимального угла отклонения вала от верти- кали при пуске следует применять ограничитель угла отклонения, или устройство демпфирующее отклонение вала от вертикали, или уменьшать скорость разгона вала привода.

Результаты опытов по перемешиванию взвесей показали, что симплекс  $\left(\frac{G_T}{G_M}\right)$  в исследованных пределах незначительно влияет на величину  $\eta_0$  и его можно исключить из уравнения (26). Кроме того, в диапазоне изменения симплекса  $\left(\frac{D}{l}\right) = 1,84 - 3,3$  показатель степени при нем равен нулю. Таким образом, на основании исследований рекомендуется уравнение:

$$Re_u = 0,55 A\tau^{0,5} \left(\frac{d_u}{l}\right)^{0,25} \left(\frac{\beta}{l}\right)^{-0,15} \quad (30)$$

Среднее отклонение опытных и расчетных данных, вычисленных по уравнению (30), составляет около  $\pm 12\%$ . Уравнение (30) справедливо в следующих пределах изменения переменных:

$$Re_u = 5 \cdot 10^1 - 9 \cdot 10^3; \quad A\tau = 4,12 \cdot 10^5 - 2,53 \cdot 10^{11};$$

$$\Gamma_{d_u} = 4,58 \cdot 10^{-3} - 2,75 \cdot 10^{-2}; \quad \Gamma_{\beta} = 0,1 - 0,6; \quad \Gamma_D = 1,84 - 3,3.$$

В опытах по приготовлению эмульсий неизменными оставались высота наполнения аппарата средой, равная диаметру аппарата, диаметр аппарата и расстояние от лопасти мешалки до дна аппарата, равное длине лопасти.

В результате проведенных исследований уравнение (27) было получено в виде:

$$Re_u = 10 A\tau^{0,1} \left(\frac{Re_u^2}{We_u}\right)^{0,35} \left(\frac{\beta}{l}\right)^{-0,28} \left(\frac{L}{l}\right)^{0,12} \left(\frac{d_u}{l}\right)^{-0,22} \left(\frac{M_d}{\mu}\right)^{0,04} \quad (31)$$

Среднее отклонение опытных и расчетных данных, вычисленных по уравнению (31), не превышает  $\pm 12\%$ .

Уравнение (31) справедливо в следующих пределах изменения переменных:

$$Re_u = 174 - 7 \cdot 10^4; \quad A\tau = 1,64 \cdot 10^4 - 2,16 \cdot 10^9;$$

$$Re_u^2 / We_u = 11,5 - 4,87 \cdot 10^6; \quad \Gamma_D = 3 - 5; \quad \Gamma_{\beta} = 0,1 - 0,6;$$

$$\Gamma_L = 3 - 5,9; \quad \Gamma_{d_u} = 0,095 - 0,25; \quad S = 5 - 125;$$

$$S_{\Delta\rho} = 0,123 - 0,376.$$

В экспериментах также проведено сравнение эмульгирования различными типами мешалок на жестком и шарнирно закрепленном валах. Качество эмульгирования оценивали по равномерности распределения дисперсной фазы во всем объеме сплошной среды. Эксперименты свидетельствуют о более высокой интенсивности эмульгирования несимметричной мешалкой на 20-25% по сравнению с нормализованными мешалками на шарнирно и жестко закрепленном валах в аппарате без перегородок и на 12% по сравнению с нормализованными мешалками на жестко закрепленном валу в аппарате с перегородками.

Проведенные исследования показали, что аппарат с несимметричной мешалкой на шарнирно закрепленном валу пригоден для перемешивания как вязких так и легкоподвижных сред.

Применение несимметричной мешалки на шарнирно закрепленном валу так же, как и нормализованной мешалки на шарнирно закрепленном валу, снижает металлоемкость шарнирно закрепленного вала и привода и повышает надежность и ресурс уплотняющих поверхностей.

Из-за отсутствия изгибающих нагрузок шарнирно закрепленный вал может быть выполнен плоским как одно целое с лопастью, что упрощает его изготовление и уменьшает стоимость.

Шарнирно закрепленный вал имеет угловую скорость прецессионного движения, равную угловой скорости привода, благодаря чему он улучшает условия перемешивания по объему аппарата. Это делает возможным увеличение высоты перемешиваемой среды в аппарате. Несимметричная мешалка на шарнирно закрепленном валу в отличие от нормализованной мешалки на шарнирно закрепленном валу отклоняется от вертикали при любой угловой скорости, отличной от нуля, что позволяет использовать аппарат даже при малых угловых скоростях мешалки.

На основании проведенных исследований и предложенной методики расчета несимметричной мешалки на шарнирно закрепленном валу ЛенНИИхиммаш разработал техническую документацию для усовершенствования действующих полимеризаторов объемом  $10 \text{ м}^3$  в производстве суспензионного полистирола на Ангарском ПО Нефтеоргсинтез". Техническая документация передана для внедрения. Кроме того, ЛенНИИхиммаш использовал результаты исследований при разработке технического проекта аппарата - усреднителя объемом  $100 \text{ м}^3$  в производстве дисперсии винилацетата с этиленом. Техпроект передан для изготовления заводу-изготовителю "Пенэхиммаш".

#### ВЫВОДЫ

1. Составлена физическая картина движения несимметричной мешалки на шарнирно закрепленном валу, определены силы, действующие на мешалку, проведен анализ этих сил и получены уравнения равновесия их для установившихся условий.

2. Движение несимметричной мешалки разделено в зависимости

от угловой скорости и длины вала на три режима: докритический, критический и закритический. Определено, что критический режим является частным случаем докритического и закритического режимов.

3. Решением уравнений равновесия теоретическим путем получены зависимости для расчетного определения угла отклонения вала от вертикали и угла хода лопасти для каждого режима при установившихся условиях. Опытным путем получено подтверждение этих зависимостей.

4. Выполнены экспериментальные исследования, на основе которых установлены численные значения коэффициентов и показателей степеней в критериальных уравнениях для расчетного определения максимального угла отклонения вала от вертикали и соответствующего ему угла хода лопасти в процессе пуска несимметричной мешалки.

5. Показано преимущество несимметричной мешалки по интенсивности эмульгирования в сравнении с нормализованными мешалками на жестко и шарнирно закрепленных валах.

6. Получены обобщенные эмпирические зависимости для расчета определяющих частот вращения несимметричной мешалки при перемешивании взвесей и приготовления эмульсий.

7. Найдены условия, при которых угол отклонения вала от вертикали достигает максимальных значений при установившемся движении, то есть условия наиболее полного использования шарнирно закрепленного вала в качестве перемешивающего органа.

8. Несимметричная мешалка на шарнирно закрепленном валу рекомендуется для аппаратов большой емкости и для работы в закритическом режиме.

9. Результаты исследований использованы ЛенНИИхиммашем при усовершенствовании действующих полимеризаторов объемом 10 м<sup>3</sup> в производстве суспензионного полистирола на Ангарском ЦО "Нефтеоргсинтез" и при разработке аппарата-усреднителя объемом 100 м<sup>3</sup> в производстве дисперсии винилацетата с этиленом.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Бортников И.И., Павлечко В.Н., Павлушенко И.С. О работе аппарата с несимметричными шарнирно закрепленными мешалками - Об.Химия и химическая технология. - Минск.: Высшая школа, 1974,

вып.7, с.165-170.

2. Павлечко В.Н., Бортников И.И., Павлушенко И.С. Расчет динамических характеристик несимметричной лопастно мешалки на шарнирно закрепленном валу. - Химическое и нефтяное машиностроение, 1976, №8, с.10-11.

3. Павлечко В.Н., Бортников И.И. Исследование пусковых характеристик аппарата с несимметричной шарнирно закрепленной мешалкой. - Сб.Химия и химическая технология. - Минск.: Высшая школа, 1977, вып.12, с.137-140.

4. Павлечко В.Н., Бортников И.И., Павлушенко И.С. Исследование работы аппарата с несимметричными шарнирно закрепленными мешалками. - Тезисы докладов / Третья Всесоюзная конференция по теории и практике перемешивания в жидких средах. - М.: НИИТЭХИМ, 1976, с.36-38.

*В.Н. Павлечко*

Владимир Никифорович Павлечко

Исследование работы аппарата с несимметричной мешалкой на шарнирно закрепленном валу.

Подписано в печать 26.01.79. АТ-01539. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 72

Бесплатно.

Отпечатано на ротапринте БТИ им. С.М.Кирова.

220630, Минск, Сverdлова, 13.