

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ РАСТВОРОВ

М. М. МАЛОВИЧКО, В. А. АНИКЕЕВ, М. Ф. ТКАЧЕНКО

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

При введении технологических процессов во многих отраслях промышленности необходимо измерение отдельных физико-химических параметров технологических сред (плотности, вязкости и т. д.) [1].

Кроме того, измерение отдельных параметров технологических растворов необходимо при проведении анализа многокомпонентных растворов многопараметрическим методом, который находит сейчас широкое применение в практике.

В статье рассматривается возможность создания автоматического плотномера технологических растворов, основанного на использовании эффекта присоединенной массы тела, движущегося в жидкости.

Известно, что при неустановившемся движении тела в жидкости сопротивление движения при данной мгновенной скорости будет больше сопротивления при той же скорости, но при равномерном движении [2].

При неустановившемся движении необходимо преодолеть инерцию тела и инерцию окружающей его массы жидкости, что и вызывает дополнительное сопротивление.

Для анализа неустановившегося движения твердого тела в жидкости кинетическую энергию жидкости T , определяемую по формуле

$$T = \frac{1}{2} \rho \iiint_V v^2 dx dy dz, \quad (1)$$

где V — объем,

v — скорость жидкости,

ρ — плотность жидкости,

относят или к линейной скорости при поступательном движении, или к угловой — при вращательном движении.

$$T = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \iiint_V \frac{v^2}{v_0^2} dx dy dz, \quad (2)$$

где v_0 — скорость твердого тела.

Тройной интеграл в выражении (2) не зависит от скорости движения, а связан только с формой тела и направлением его движения в жидкой среде. Поэтому этот интеграл рассматривают как некоторую самостоятельную величину и обозначают

$$\lambda = \rho \iiint_V \frac{v^2}{v_0^2} dx dy dz, \quad (3)$$

λ — присоединенная масса тела.

Для некоторых форм тел значения присоединенных масс рассчитаны теоретически. Например, для шара радиуса r при поступательном движении вдоль одной из осей координат

$$\lambda = \frac{2}{3} \pi \rho r^3, \quad (4)$$

а для диска радиуса r при поступательном движении по направлению, перпендикулярному его плоскости

$$\lambda = \frac{8}{3} \rho r^3. \quad (5)$$

Как видно из формул (3, 4, 5), при неизменном направлении движения тела определенной формы

$$\lambda = Cf(\rho), \quad (6)$$

где C — постоянная, определяемая формой тела и направлением движения.

Таким образом, измеряя значение присоединенной массы тела определенной формы в жидкости, можно судить о плотности жидкости.

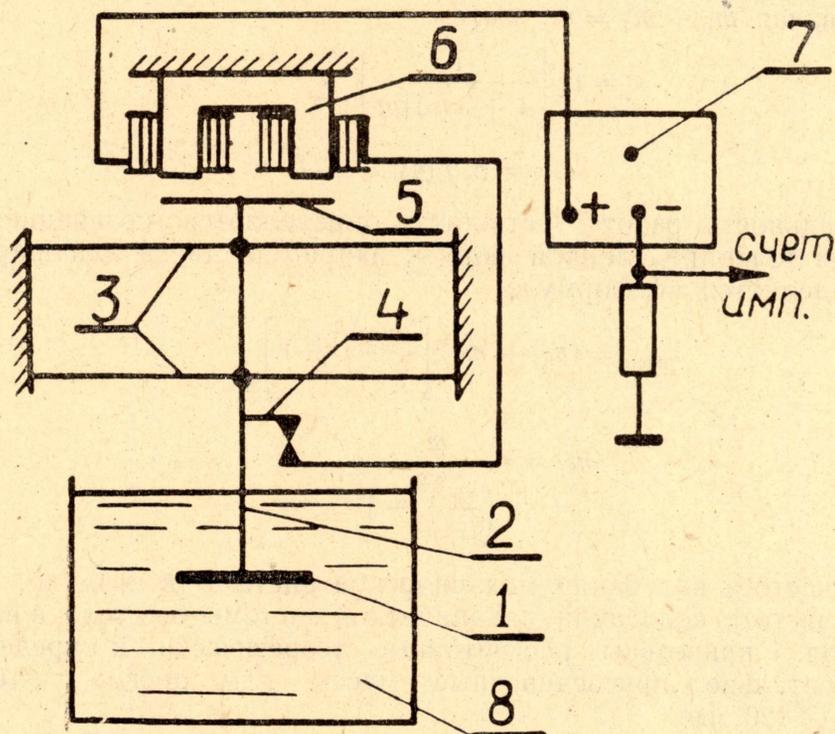


Рис. 1. Устройство для измерения присоединенной массы тел, движущихся в жидкости. 1 — тело, 2 — шток, 3 — плоские пружины, 4 — контактная группа, 5 — якорь, 6 — электромагнит, 7 — источник постоянного тока, 8 — сосуд с исследуемым раствором

Существует несколько методов определения присоединенных масс тел [3]. Наиболее простым, легко поддающимся автоматизации методом, является метод малых вертикальных колебаний тела, полностью погруженного в жидкость.

Присоединенные массы тел по методу малых вертикальных колебаний можно определять с помощью устройства, показанного на рис. 1.

Тело 1, жестко скрепленное штоком с двумя плоскими пружинами 3, обеспечивающими только вертикальные колебания подвижной системы, и якорем 5, погружено в сосуд 8 с исследуемым раствором. Если подвижная система получает отклонение от положения равновесия вниз, замыкается контактная группа 4. (Контактная группа может быть заменена бесконтактной системой на основе индуктивного, емкостного или другого датчика перемещения). По обмотке электромагнита 6 течет ток, якорь и с ним вся подвижная система отклоняется вверх, контакт замыкается, подвижная система под действием сил упругости пружин и веса тела отклоняется вниз, контакт замыкается и т. д.

В устройстве устанавливается автоколебательный режим. Частота автоколебаний, как показано в работе [3], равна собственной частоте колебаний подвижной системы и определяется по формуле

$$\omega = \left[\frac{k}{m_0 + m_1 + \lambda(\rho)} \right]^{1/2}; \quad (7)$$

k — жесткость пружин,

m_0 — масса твердого тела,

m_1 — приведенная масса штока и пружин.

В выражении (7) величины k , m_0 , m_1 для данной механической системы постоянные, а $\lambda(\rho)$ зависит от плотности жидкости.

Обозначая $m_0 + m_1 = m$, имеем

$$\omega = c_1 \left[\frac{1}{1 + \lambda(\rho) |m|} \right]^{1/2}, \quad (8)$$

т. е.

$$\omega = c_1 f(\rho). \quad (9)$$

Правильность работы устройства определяется сравнением $\lambda_{\text{теор}}$ и $\lambda_{\text{эксп}}$ для тел определенной формы, например, диска или шара. $\lambda_{\text{эксп}}$ определяется по формуле

$$\lambda_{\text{эксп}} = (m_0 + m_1) \left[\left(\frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 - 1 \right], \quad (10)$$

где

$$m_1 = \frac{m_0}{\left(\frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^2 - 1}, \quad (11)$$

ω_1 — частота колебаний механической системы в воздухе,

ω_0 — частота колебаний механической системы без тела в воздухе.

В табл. 1 приведены рассчитанные теоретически и определенные экспериментально присоединенные массы для дисков $\varnothing 60$ мм, $\varnothing 90$ мм, $\varnothing 120$ мм.

Таблица 1

№ п/п	Тело	m_0 г	ω_0 гц	ω_1 гц	ω гц	m_1 г	$\lambda_{\text{эксп}}$ г	$\lambda_{\text{теор}}$ г	Δ %
1	Диск $\varnothing 60$ мм	7,595	34,50	32,18	21,56	50,97	71,91	72	0,1
2	Диск $\varnothing 90$ мм	17,495	34,50	29,75	13,85	50,71	246,50	243	1,3
3	Диск $\varnothing 120$ мм	31,43	34,50	27,12	9,55	50,84	581,20	576	0,3

Чтобы при изменении плотности получить максимальное изменение частоты по формуле 9, необходимо, чтобы отношение $\lambda \delta m$ было как можно больше. Это достигается выбором формы тела и его расположением относительно твердых стенок, так как известно, что наличие твердых стенок вблизи колеблющегося тела вызывает увеличение значения присоединенной массы.

На рис. 2 приведена экспериментально определенная зависимость между частотой колебаний системы с диском $\varnothing 120$ мм и плотностью раствора $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Частота измерялась путем счета импульсов в цепи электромагнита постоянного тока за определенное время. Плотность определялась с помощью набора денсиметров.

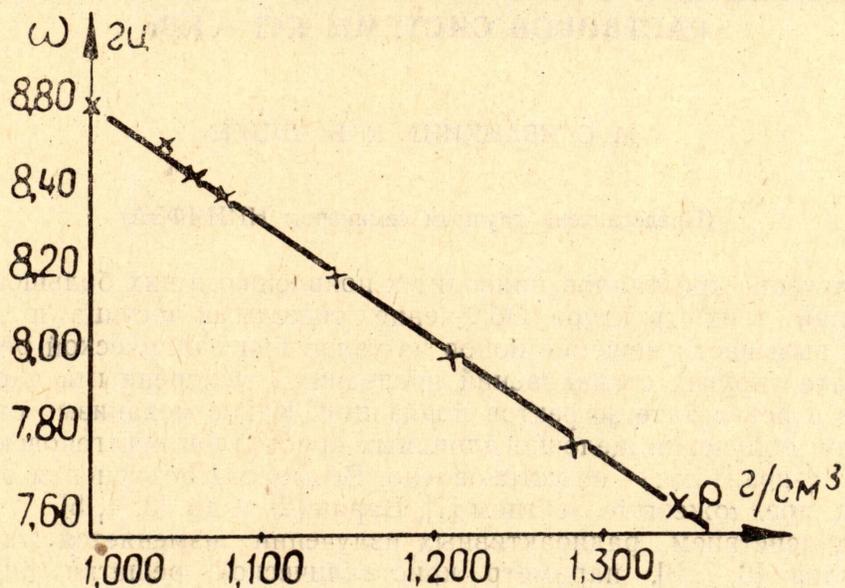


Рис. 2. Зависимость частоты колебаний механической системы от плотности раствора

Экспериментальные результаты подтверждают, что на основе использования эффекта присоединенной массы тела, движущегося в жидкости, может быть создано простое автоматическое устройство для измерения плотности технологических растворов.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Кивилис. Техника измерения плотности жидкостей и твердых тел, Стандартгиз, М., 1959.
2. М. Я. Алферьев. Гидромеханика, М., 1961.
3. Н. С. Римап, Р. Л. Крепс. Присоединение массы тел различной формы, Труды ЦАГИ, № 635, 1947.