

УДК 681.5:622.276:622.279

ВИБРАЦИОННЫЕ ПЛОТНОМЕРЫ ДЛЯ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

М.В. Богущ, О.В. Зацерклянный
(ООО "Пьезоэлектрик")

В вибрационных плотномерах плотность жидкости или газа определяется по резонансной частоте механического резонатора, взаимодействующего с измеряемой средой. В погружных преобразователях резонатор помещают в контролируемую среду, действие которой подобно действию некоторой "присоединенной массы", связанной с резонатором и увлекаемой им в колебательное движение. Величина присоединенной массы зависит от плотности вещества, следовательно, девиация частоты резонансных колебаний является параметром, по которому определяется плотность.

На основе этого принципа разработан вибрационный плотномер 804 [1], который нашел применение в системах контроля продукции газоконденсатных скважин. Высокая точность измерений и широ-

кий температурный диапазон оказались востребованы и существенно расширили спектр использования плотномеров в нефтяной, химической, пищевой промышленности. Новые применения выявили необходимость в существенном расширении диапазона вязкостей измеряемых жидкостей. Целью данной работы является изучение возможности расширения диапазона измеряемых вязкостей от существующего предела в 100 сП до 10000 сП.

В общем случае частота резонатора является функцией плотности и вязкости жидкости, а также температуры резонатора:

$$f = F(\rho, \eta, T),$$

где f – резонансная частота в жидкости; ρ – плотность жидкости; η – динамический коэффициент вязкости; T – температура резонатора.

Основываясь на модели простого затухающего гармонического осциллятора, можно записать:

$$m\ddot{x} + \nu\dot{x} + kx = F, \quad (1)$$

где m – масса камертона и жидкости, вовлеченной в колебания; ν – коэффициент, связанный с вязкостью и внутренним трением резонатора; k – жесткость резонатора; F – сила, действующая на резонатор.

В соответствии с этим подходом действие вязкости считается идентичным влиянию внутреннего трения резонатора. При постоянной плотности среды ($m = \text{const}$) увеличение вязкости приводит к уменьшению частоты резонанса амплитуд и уменьшению добротности системы. Погружение механического резонатора в вязкую жидкость приводит к снижению добротности, которое может достигать двух порядков. На рис. 1 представлены фазочастотные характеристики камертонного преобразователя с различной добротностью.

Видно, что при соблюдении условий резонанса фаз ($\varphi = \pi/2$) частота колебаний не зависит от трения. Вывод о необходимости опережения фазой воз-

буждающей силы на 90° фазы смещения резонатора подтверждается в [2].

С целью проверки этого положения, а также определения требований к электронной схеме возбуждения камертона была проведена серия испытаний вибрационных первичных преобразователей камертонного типа (камертонов). В качестве образца для испытаний использовался серийно выпускаемый первичный преобразователь плотномера 804. Испытания проводились на двух типах ньютоновских жидкостей. Первый тип составляли жидкости с разной плотностью и малой вязкостью (не более 1,2 сП), жидкости второго типа, наоборот, были близки по плотности и отличались вязкостью (табл. 1).

Испытания проводились на стенде для проверки плотномера 804 эталонными (поверочными) жидкостями [1], в нормальных условиях. Температура в термостате поддерживалась в пределах $(20 \pm 0,05)^\circ\text{C}$. Измерения фазочастотных и амплитудно-частотных характеристик резонаторов проводились в области ± 500 Гц от частоты резонанса. Область фазочастотных характеристик камертона в интервале $\pm 0,3\%$ от частоты резонанса представлена на рис. 2.

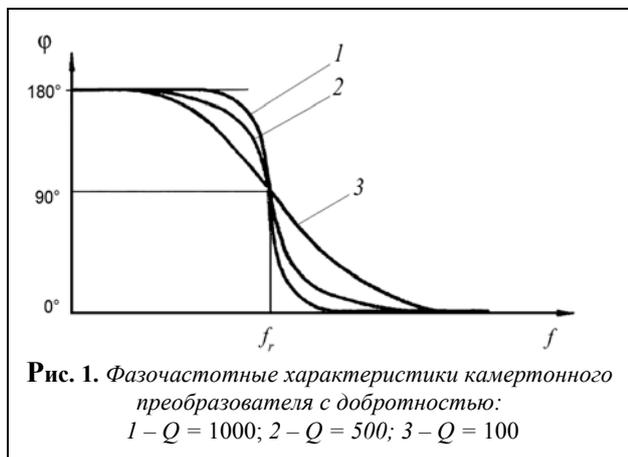
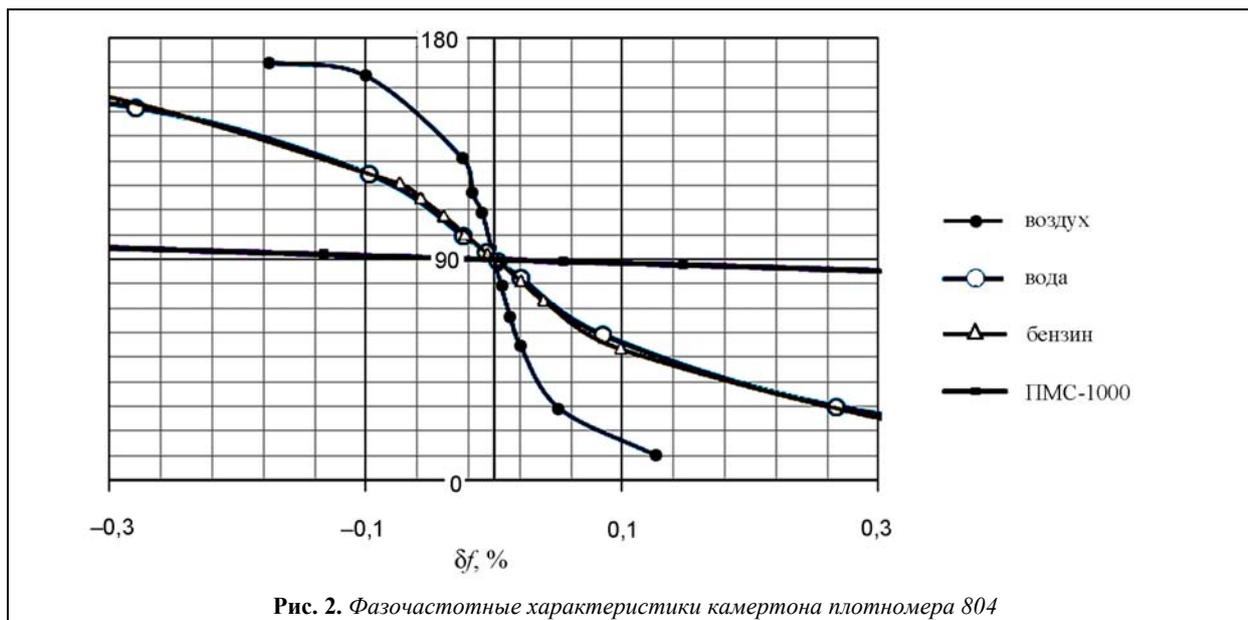


Таблица 1

Значения плотности и вязкости жидкостей при температуре 20°C

Жидкости	Плотность, кг/м^3	Вязкость, сП
Вода	998	1,00
Бензин	686	0,54
Хлористый метилен	1326	0,46
Перхлорэтилен	1625	0,68
ПМС-5	921	5
ПМС-20	945	20
ПМС-100	961	100
ПМС-1000	966	1000
ПМС-10000	971	10000



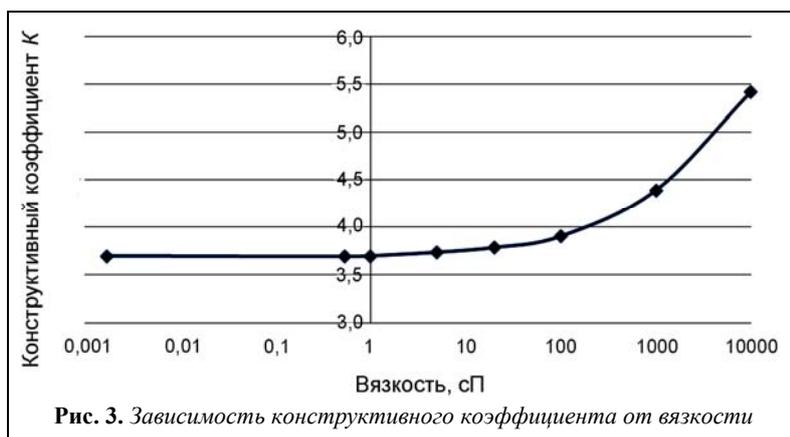


Рис. 3. Зависимость конструктивного коэффициента от вязкости

По результатам измерений можно сделать следующие наблюдения:

- погрешность поддержания сдвига фаз для резонатора в жидкостях с вязкостью меньше 100 сП не оказывает существенного влияния на погрешность измерения плотности и может достигать 20° во всем частотном диапазоне. Это открывает возможность применения недорогих схем автогенераторов для измерения жидкостей с малой вязкостью;

- для жидкостей с вязкостью порядка 1000 сП и более ошибка в поддержании фазового сдвига 10° приводит к отклонению от частоты резонанса ±0,3 %. Приведенное к девиации частоты от плотности это значение соответствует ошибке ±1,5 кг/м³. Следовательно, одним из требований к схеме возбуждения резонатора является точное поддержание фазового сдвига 90°. В частности, в [1] рекомендуется для поддержания постоянного сдвига фаз использовать схему фазового компаратора.

Согласно [3], частота колебаний камертона связана с плотностью жидкости следующим соотношением:

$$\frac{f}{f_0} = \sqrt{1 + K \frac{\rho_f}{\rho_m}}, \quad (2)$$

где f, f_0 – частоты в среде и в вакууме; ρ_f, ρ_m – плотности среды и материала камертона; K – безразмерный коэффициент, связанный с геометрией и материалом камертона.

Константа K определяется по экспериментальным данным. Из (2) следует:

$$K = \left(\frac{f^2}{f_0^2} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_f}. \quad (3)$$

Если частота резонанса при φ , равном 90°, не зависит от вязкости, то коэффициент K останется постоянным для сред с различной вязкостью.

Результаты расчетов коэффициента K для сред с различной вязкостью представлены на рис. 3.

Видно, что для сред с малой вязкостью значения коэффициента K близки друг к другу, а для вязкой среды ПМС-10000 – отличаются на 46,7 %. Полученные результаты не позволяют рассматривать погружение в жидкость вибрационного преобразова-

теля только как увеличение массы, а вязкость как простое уменьшение добротности системы.

Как способ учета влияния вязкости на систему может быть предложена калибровка плотномера ($K = f(\eta)$) по вязкости. В этом случае плотномер следует рассматривать как измерительную систему с одновременным измерением плотности, вязкости и температуры:

$$\rho_n = F(\rho, \eta, T). \quad (4)$$

Определим минимальную погрешность измерения плотности при учете влияния вязкости и температуры. Погрешность измерения плотности в этом случае будет суммой погрешностей измерения каждого параметра, умноженных на коэффициенты влияния этого параметра:

$$\delta_n = \left(\frac{\partial F}{\partial \rho} \right) \delta_\rho + \left(\frac{\partial F}{\partial \eta} \right) \delta_\eta + \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right) \delta_T, \quad (5)$$

где $\delta_n, \delta_\rho, \delta_\eta, \delta_T$ – относительные погрешности плотномера, измерения плотности, вязкости и температуры.

Погрешность измерения каждого из влияющих факторов ограничена снизу погрешностью эталонных средств измерений, поэтому минимальной итоговой погрешностью будет сумма погрешностей эталонных средств измерения с учетом коэффициентов влияния. Перейдем к неравенству

$$\delta_n > \left(\frac{\partial F}{\partial \eta} \right) \delta_\eta \quad (6)$$

и рассмотрим влияние вязкости на итоговую погрешность измерения плотности. Исходя из представления $K = f(\eta)$, можно записать коэффициент влияния вязкости в виде

$$\frac{\partial F}{\partial \eta} = \frac{\Delta K}{K}, \quad (7)$$

где $\Delta K = |K_v - K_j|$ – отклонение безразмерного коэффициента калибровочной жидкости с известной вязкостью K_j от коэффициента для воды K_v .

$$\delta_\rho > \frac{\Delta K}{K} \delta_n. \quad (8)$$

То есть при отклонении K на 5,5 % (100 сП), для получения погрешности измерения плотности не более ±0,1 % (при плотности воды 1 кг/м³) необходимо измерить вязкость с погрешностью меньше 2 %, что вполне реально и применяется для калибровки плотномеров 804. Для расширения диапазона вязкостей необходимо существенно повысить точность измерения этой вязкости, т. е. разработать прецизионный вискозиметр-плотномер.

Относительная погрешность δ_0 эталонов вязкости при доверительной вероятности 0,95 составляет

0,2 %. Для ПМС-10000: $\delta_p > 0,467 \cdot 0,2 \cdot 3$, т. е. погрешность вычисления плотности не может быть меньше $\pm 0,28$ %, или приведенная к плотности воды $\pm 2,8$ кг/м³.

В результате проведенных исследований разработан и проходит опытную эксплуатацию плотномер 804 с верхним пределом вязкости измеряемой среды 10000 сП, при этом погрешность измерения плотности не превышает ± 5 кг/м³, или 0,5 %. Ведутся работы по снижению погрешности измерения плотности до ± 1 кг/м³.

Сравнение плотномеров 804 с лучшими зарубежными и отечественными аналогами приведено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение отечественных и зарубежных плотномеров

Параметры	Solartron 7828 (Великобритания)	Плот-3 (Россия)	804 (Россия)
Диапазон измерений, кг/м ³	0...3000	0...120 420...1600	0...160 620...1630
Погрешность, кг/м ³	1,0	0,3	0,5; 1,0; 5,0
Температура среды, °С	-50...+200	-40...+85	-70...+80
Вязкость жидкости, сП	До 20000	До 200	До 10000
Давление среды, МПа	20	6,3	16
Потребляемая мощность, В·А	1,68	0,54	0,48

Анализ табл. 2 показывает, что плотномер 804 по диапазону вязкости контролируемой жидкости превосходит лучшие отечественные аналоги и практически не уступает зарубежным образцам.

Плотномер 804 обеспечивает измерения при температурах от -70 °С, т. е. адаптирован к условиям Крайнего Севера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зацерклянный О.В. Вибрационные плотномеры газов и жидкостей для продукции газоконденсатных скважин. // Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2011. – № 2.
2. Жуков Ю.П. Вибрационные плотномеры. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.: (Б-ка по автоматике; Вып. 678).
3. Лопатин С.С., Пфайффер Х. Датчики предельного уровня для жидкостей. Физические принципы работы и возможности вибрационных датчиков // Технические средства автоматизации. – 2004. – № 12. – С. 24–29.
4. Пьезоэлектрическое приборостроение: сб. в 3 т. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – Т. 3 / Богуш М.В.: Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. – 346 с.
5. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский [и др.]: под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.