

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЗНАЧЕНИЙ

Колешко В.М., Сунка В.Я., Крупская Е.В.

*The simulation data of vibration viscosimeter sensitive elements for large viscosity values measurements are presented. The viscosity measurement intelligent sensor system was developed and measurement errors of this system was determined.*

В различных областях промышленности остро ощущается необходимость в создании широкого класса автоматизированных интеллектуальных сенсорных систем (ИСС) измерения вязкости газов и жидкостей в диапазоне от  $10^{-5}$  до  $10^8$  Па·с, в том числе неньютоновских жидкостей в трубопроводах и емкостях.

При проектировании современных ИСС измерения к хорошо известным требованиям повышения метрологических параметров, ужесточения эксплуатационных параметров и уменьшения габаритов добавляются, в соответствии с мировыми стандартами IEEE 1451 специфические требования по интерфейсам ИСС измерения как в составе микропроцессорной системы автоматического контроля и управления, так и при передаче информации по беспроводным каналам связи, выполненным по требованиям мировых стандартов IEEE 802.11-802.16.

Для существенного расширения диапазона измеряемой динамической вязкости вплоть до величин ( $10^6$ - $10^8$ ) Па·с предложен фазовый метод, при котором измеряют величину фазового сдвига  $\varphi$  между электрическими напряжениями возбуждающего и приемного преобразователей вибрационного измерительного зонда. Для данного фазового метода вибрационные зонды должны иметь только сосредоточенные параметры и в исследуемой вязкой жидкости должны создавать плоские сдвиговые волны. Для вибрационных зондов используют поступательные и вращательные (крутильные) механические колебания. Значения безразмерных коэффициентов демпфирования используемых зондов запишутся выражениями [1,2]:

$$\text{зонд поступательных колебаний} \quad D_n = \frac{h\sqrt{\eta\rho_{\text{ж}}}}{m\sqrt{2\omega_0}} \quad (1)$$

$$\text{зонд вращательных колебаний} \quad D_b = \frac{M\sqrt{\eta\rho_{\text{ж}}}}{J\sqrt{2\omega_0}}, \quad (2)$$

где  $h$  – площадь соприкосновения зонда с жидкостью,  $m$  – масса зонда,  $M$  – момент инерции площади соприкосновения зонда с жидкостью,  $J$  – кинетический момент инерции зонда.

Для моделирования величины коэффициентов демпфирования  $D_o$  для поступательных и вращательных колебаний зонды конструктивно выбраны в виде стального шарика диаметром  $d = 2r$  от 5 до 100 мм и стального цилиндра диаметром  $d = 2r$  от 5 до 100 мм и длиной  $l = 100$  мм. Конструктивно зонды выполнялись как сплошными, так и пустотелыми с толщиной стенки 2 мм. Моменты инерции выбранных зондов определялись по выражениям:

- для сплошных зондов:

$$M = \frac{8\pi r^4}{3} \text{ – для шара, } M = \pi r^3(2l + r) \text{ – для цилиндра,} \quad (3)$$

- для пустотелых зондов:

$$J = \frac{8\pi\rho_3(r^5 - r_B^5)}{15} - \text{для шара, } J = 0,5\pi\rho_3 l(r^4 - r_B^4) - \text{для цилиндра,} \quad (4)$$

где  $r_B$  – внутренний радиус пустотелого зонда. По приведенным выражениям (1)-(4) выполнено обширное моделирование зависимостей коэффициентов демпфирования  $D_o$  измерительных стальных зондов в зависимости от их конструктивного исполнения и величины вязкости исследуемых жидкостей. Некоторые результаты этого моделирования коэффициентов  $D_o$  (коэффициент вязкого демпфирования без конкретизации типа колебаний зонда)

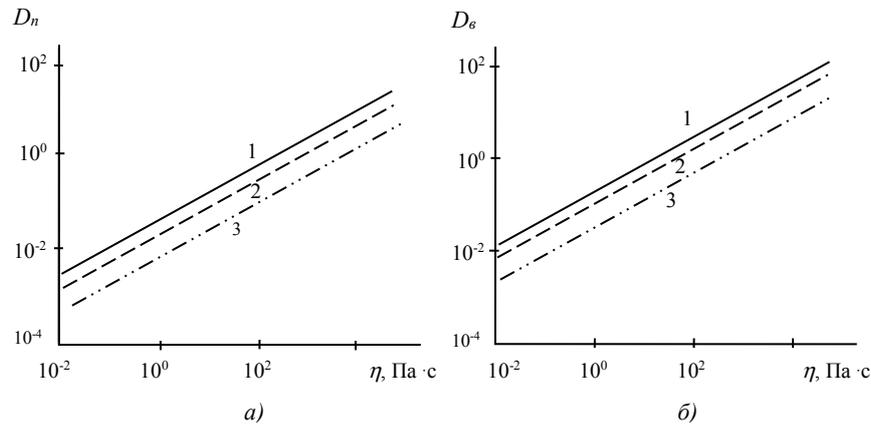


Рис.1. Зависимость коэффициентов демпфирования для поступательных (а) и вращательных (б) колебаний. 1;3- сплошной шарик  $r = 5$  мм и 25 мм, 2 – пустотелый шар  $r = 25$  мм.

для плотности контролируемой жидкости ( $\rho_{ж} = 880 \text{ кг/м}^3$ ) и в зависимости от параметров вибрационных стальных зондов приведены на рис. 1. Анализируя эти зависимости можно констатировать следующее. Измерительные зонды с сосредоточенными параметрами на 1-2 порядка имеют более высокое значение коэффициента демпфирования  $D_o$ , чем зонды с распределенными параметрами, совершающими изгибные колебания. Одинаковой конструкции зонды для вращательных (крутильных) колебаний по сравнению с поступательными имеют величину коэффициента  $D_o$  в 1,5-1,6 раза большую. Измерительный зонд в виде шарика имеет на 20-30 % более высокую чувствительность, чем цилиндрический зонд с одинаковым диаметром зонда. Существенное различие в величинах коэффициента  $D_o$  имеет место для сплошных и пустотелых вибрационных зондов, при этом, чем больше наружный диаметр зонда, тем выше чувствительность к демпфированию (рис. 1. зависимость 2). Например, сплошной шарик диаметром 5 мм (рис. 1, зависимость 1) и пустотелый шар радиусом 25 мм (рис. 1, зависимость 2) имеют близкие значения коэффициентов  $D_o$ . Зонд в виде сплошного шара радиусом 25 мм (рис. 1, зависимость 3) имеет чувствительность по коэффициенту  $D_o$  в  $\sim 2$  раза меньшую, чем пустотелый шар-зонд.

При малых значениях колебаний вибрационного зонда зависимость угла сдвига фаз  $\varphi$  между электрическими напряжениями приемного и возбуждающего преобразователей зонда записывается выражением:

$$\varphi = \arctg \frac{D_0 v^{3/2} + v^2 - 1}{\chi + D_0 v^{3/2}} + \varphi_0, \quad (5)$$

где  $v = \omega/\omega_0$  – безразмерная круговая частота колебаний зонда,  $\omega_0$  – резонансная частота ненагруженного зонда,  $\chi$  – тангенс угла механических потерь в упругом элементе зонда, можно считать, что величина  $\chi$  обратно пропорционально величине ме-

ханической добротности  $Q$ ,  $\varphi_0 \sim 0,1^\circ$  – постоянный фазовый сдвиг в электронной цепи, создаваемый электрическими и механическими цепями.

Типичные частотные зависимости угла сдвига  $\varphi$  от геометрических параметров зонда и коэффициента  $D_0$  приведены на рис. 2. Чем меньше механические потери в зонде, тем выше чувствительность прибора (зависимости 1-3).

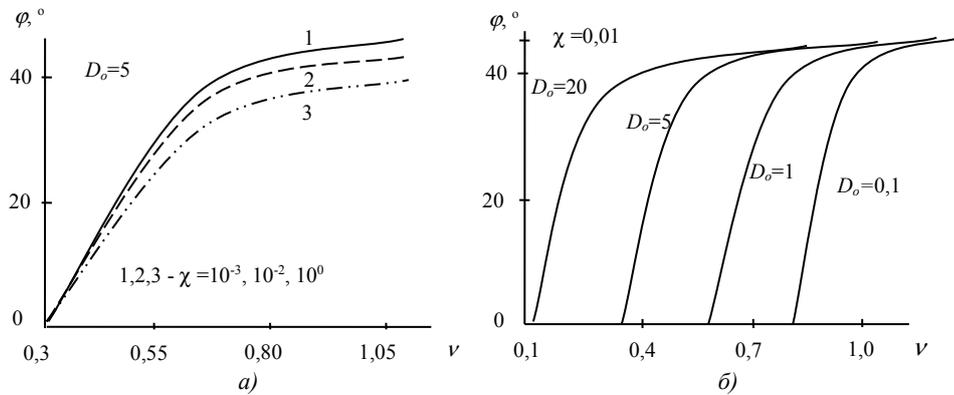


Рис. 2. Частотные зависимости угла сдвига фаз

Из рис. 2,б очевидно, что при увеличении значения коэффициента демпфирования  $D_0$  безразмерная частота  $\nu$ , на которой значение угла сдвига фаз  $\varphi \sim 0$  сдвигается в сторону меньших значений  $\nu$ . Из анализа типичных зависимостей,  $\varphi = \psi(\chi, D_0, \nu)$  очевидно, что этим методом можно вести измерения при коэффициенте демпфирования  $D_0 \geq 0,1$  и  $\chi \geq 10^{-3}$ .

По результатам измеренного (рассчитанного) значения сдвига фаз  $\varphi$  на выбранной частоте  $\nu$  приведенная вязкость жидкости записывается выражением [1]:

$$\sqrt{\eta\rho_{\text{ж}}} = \frac{J\sqrt{2\omega_0}}{M} \cdot \frac{\nu^2 - 1 - \chi \operatorname{tg}(\varphi - \varphi_0)}{\nu^{3/2} [\operatorname{tg}(\varphi - \varphi_0) - 1]} \sqrt{\nu} \quad (6)$$

Рассчитанные по выражению (6) при величине  $\frac{J\sqrt{2\omega_0}}{M} = 3,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>2</sup>·с (постоянная вискозиметра) и плотности жидкости  $\rho_{\text{ж}} = 880$  кг/м<sup>3</sup> значения приведенной вязкости показаны на рис. 3. Величина  $\sqrt{\eta\rho_{\text{ж}}}$ , которую можно измерить данным методом повышается с ростом потерь  $\chi$  и уменьшением безразмерной частоты  $\nu$ .

Из графиков рис. 3 и выражений (6) вытекает, что увеличив постоянную вискозиметра  $\frac{J\sqrt{2\omega_0}}{M} \gg 3,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>2</sup>·с и снизив частоту  $\nu$  до значений 0,25-0,35 при  $\chi = 0,02-0,1$  возможно расширить диапазон измеряемых значений вязкости в сторону предельно больших значений  $\sqrt{\eta\rho_{\text{ж}}}$ . Например, при указанных значения  $\chi, \nu, \frac{J\sqrt{2\omega_0}}{M}$  и плотности жидкости  $\rho_{\text{ж}} = 880$  кг/м<sup>3</sup> можно измерить вязкость до  $\eta = (10^6 - 10^8)$  Па·с, что до сих пор является рекордным значением для вибрационных вискозиметров.

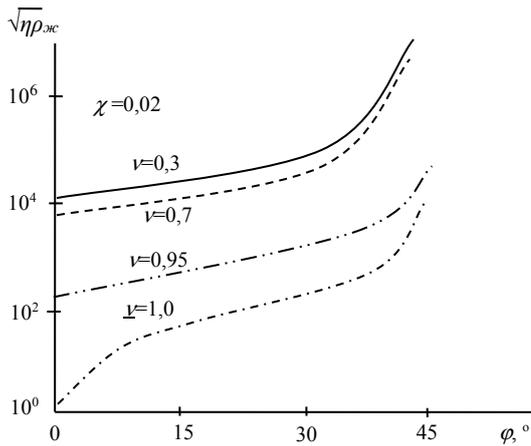


Рис. 3. Зависимость приведенной вязкости от угла сдвига

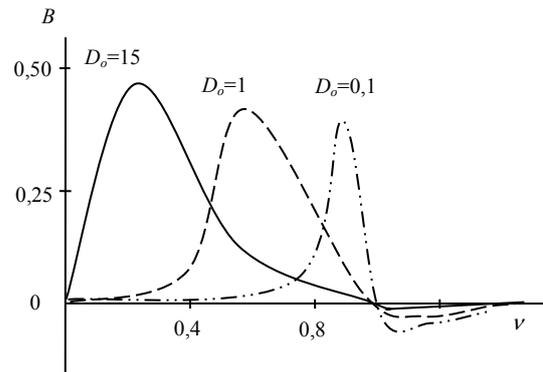


Рис. 4. Частотные зависимости чувствительности фазового вискозиметра

Чувствительность рассматриваемого фазового метода, равная отношению приращения угла  $\varphi$  к вызвавшему его изменению вязкости  $\Delta\eta$  по [2] имеет вид:

$$B = \frac{D_o v^{3/2} (1 + \chi - v^2)}{2((\chi + D_o v^{3/2})^2 + [v^2 (1 + D_o / \sqrt{v})]^2)} \quad (7)$$

Анализ приведенной зависимости чувствительности (рис. 4), рассчитанной по формуле (7) показывает, что повышение механической добротности  $Q$  зонда всегда ведет к увеличению чувствительности. Увеличение коэффициента демпфирования  $D_o$  сдвигает максимум чувствительности в сторону уменьшения безразмерной частоты  $v$ . Чем меньше величина  $D_o$ , тем ближе значение максимума  $B$  к резонансной частоте ненагруженного зонда. Максимальное значение чувствительности стремится к своему предельному значению  $B \cong 0,5$ . Характерным для частотных зависимостей  $B = \psi(v)$  является нулевая чувствительность при условии  $v^2 = (1 + \chi)$ . На этой безразмерной частоте все фазочастотные характеристики вибрационного зонда пересекаются в единой точке равной  $\varphi = \pi/4$ . При  $v^2 > 1 + \chi$  шкала вискозиметра будет обратной. Поэтому при измерении рассматриваемым фазовым методом частоту измерения всегда необходимо выбирать ниже резонансной частоты  $\omega$ .

Широкодиапазонная фазовая вибрационная ИСС вискозиметрии по рассматриваемому методу может быть выполнена по функциональной схеме рис. 5. Кварцевый генератор 6 вырабатывает стабильную частоту  $f_{эм}$ . Автоматически управляемым делителем 5 частота  $f_{эм}$  понижается и через усилитель мощности 4 напряжение низкой частоты подается на возбуждающий преобразователь 2 вибрационного зонда 1, где и преобразуется в низкочастотные механические колебания. На другом, противоположном конце зонда 1 (или в непосредственной близости от него) расположен приемный преобразователь 3, воспринимающий колебания жидкой среды.

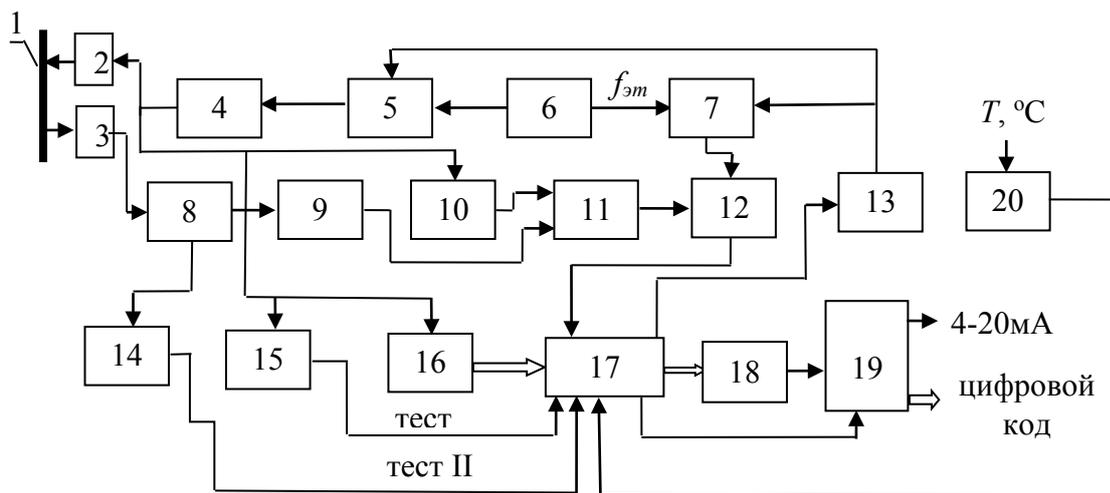


Рис. 5 Структурная схема фазовой ИСС вискозиметрии

От приемника 3 напряжение низкой частоты поступает на вход усилителя 8. Данный усилитель имеет глубокую автоматическую регулировку усиления в пределах 50÷60 дБ и цепи коррективы для уменьшения влияния высокой частоты, модулирующей слабый низкочастотный сигнал. Напряжения на входе преобразователя 2 и выходе преобразователя 3 не синфазные, при этом величина сдвига фаз  $\varphi$  между ними пропорциональна реакции жидкости на вводимые в нее механические колебания. Выходные напряжения усилителей 4 и 8 подаются на нуль-органы (триггеры Шмита) соответственно 10 и 9, в которых при переходе напряжения через нулевое значение формируется прямоугольный импульс с очень высокой крутизной фронтов (0,01 мкс). При подаче импульсов с нуль-органов 9 и 10 по их передним фронтам в формирователе 11 получают прямоугольный импульс, длительность которого  $t_i$  прямо пропорциональна величине фазового сдвига  $\varphi$ , т. е. вязкости исследуемой жидкости  $t_i \approx \varphi \approx \eta$ .

Измерение длительности импульса  $t_i$  выполняется с помощью хорошо разработанных электронных время импульсных методов измерения, суть которых состоит в счете количества импульсов генератора эталонной частоты, прошедших на счетчик в течение времени  $t_i$ . Для выполнения этой операции в вискозиметре имеется делитель частоты 7 и пересчетное устройство 12, на один вход которого подается от формирователя 11 импульс, длительностью  $t_i$ , а на другой – напряжение эталонной частоты от блока 7. Полученный с выхода пересчетного устройства 12 последовательный код, пропорциональный величине вязкости, подается на вход микроконтроллера 17, где и формируется двоичный N-разрядный выходной цифровой код.

Для управления отдельными исполнительными элементами технологического процесса наиболее приемлемым является получение выходного унифицированного аналогового тока (4÷20) мА. В этом случае с выхода микроконтроллера 17 выходной цифровой код подается на цифроаналоговый преобразователь 18. Выходные унифицированные сигналы вискозиметра через выходной сетевой интерфейс 19 передаются непосредственно потребителю по проводным или беспроводным каналам связи. Для выполнения самодиагностики и тестирования выходные напряжения усилителей 4 и 8, как наиболее информативных о надежной работе вискозиметра, подаются на входы выпрямителей-формирователей соответственно 14 и 15. Постоянные напряжения величиной (2,5÷3,5)В этих формирователей, при правильной работе прямо-возбуждающих преобразователей 2 и 3 и усилителей 4 и 8, подаются на входы микроконтроллера 17 (тест I и тест II) для последующего размещения логических «1» в старших разрядах выходного кода. В вискозиметр вводится также сенсор тем-

пературы 20 для корректировки температурной погрешности измерений вязкости и приведения значения измеряемой вязкости к температуре 20°C.

Околорезонансные измерения фазы и частоты реально осуществимы при скачкообразном изменении частоты возбуждения измерительного зонда. Для выбора оптимальной частоты измерения в зависимости от вязкости контролируемой жидкости задающий генератор выполняется электронно-перестраиваемым. Это позволяет одним и тем же измерительным зондом перекрывать очень широкий диапазон значений вязкости. Учитывая, что вибрационный вискозиметр работает в широком диапазоне вязкостей, то это создает значительную механическую нагрузку на измерительный зонд при больших значениях вязкости (верхняя часть предела измерения). Безусловно, в этих условиях усилитель мощности, возбуждающий измерительный зонд, должен иметь достаточный запас по выходной электрической мощности.

В микроконтроллере 17 в течение измерительного процесса проводится анализ измеряемого значения фазы. Если величина фазы  $\varphi \geq 45^\circ$ , то с выхода микроконтроллера подается импульс напряжения через блок 13, который выдает управляющее напряжение на делитель частоты 5. При этом частота генератора 4 понижается до тех пор, пока угол сдвига фаз не будет находиться в диапазоне  $10^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$ . При выходе в этот диапазон угла сдвига фаз прекращается дальнейшее изменение частоты. В микроконтроллер 17 постоянно вводится информация о величине фазы и частоты напряжения возбуждения вибронда.

При определенных выше значениях фазы, частоты и величине плотности контролируемой жидкости по выражению (6) и проводится вычисление измеряемой вязкости в широком диапазоне значений.

В состав микроконтроллера 17 входит и перепрограммируемое запоминающее устройство, в котором записана вся программа измерительно-вычислительного процесса. Микроконтроллер 17 выполняет следующие основные функции: метрологическую обработку информации по результатам измерения; выбор необходимой частоты измерения по величине вязкости и управление частотой задающего генератора для возбуждения измерительного зонда; управление процессом измерения; выбор и регулировку диапазона измерения; формирование идентификационной информации о вискозиметре и передачи полной информации по запросу потребителя.

Для рассматриваемого метода приведем выражения для определения полной погрешности измерения в виде:

$$\Delta\eta/\eta = N_{\varphi\varphi}(\Delta\varphi/\varphi) + N_{\varphi f}(\Delta f/f) + N_{\varphi v}(\Delta v/v) + N_{\varphi P}(\Delta P/P) \quad (8)$$

где  $N_{\varphi\varphi}$ ,  $N_{\varphi f}$ ,  $N_{\varphi v}$  и  $N_{\varphi P}$  – соответственно коэффициенты ошибок измерения сдвига фаз, частоты, резонансной частоты ненагруженного зонда и подводимой мощности для возбуждения измерительного зонда ( $\Delta\varphi/\varphi$ ), ( $\Delta f/f$ ), ( $\Delta v/v$ ) и ( $\Delta P/P$ ) – относительные приведенные погрешности измерения фазы, частоты генератора, резонансной частоты вибрационного зонда обусловленной изменением температуры, старением и т.д., а также стабильность электрической мощности генератора. Коэффициенты  $N_{\varphi\varphi}$ ,  $N_{\varphi f}$ ,  $N_{\varphi v}$  и  $N_{\varphi P}$  – суть методические ошибки выбранного метода измерения вязкости, которые определяются, прежде всего, параметрами вибрационного зонда и они показывают во сколько раз суммарная приведенная относительная погрешность вибрационного вискозиметра больше чем, относительная погрешность электронных измерителей амплитуды (вольтметра), фазы (фазометра), частоты (частотомера) и электрической мощности.

Фазовые погрешности отдельных электронных блоков вискозиметра можно суммировать с погрешностью измерителя фазы и представлять их в составляющей  $\varphi_0$ . Пренебрегая величинами  $N_{\varphi f}$  (ввиду ее малости для кварцевых генераторов) и  $N_{\varphi P}$

(можно автоматически поддерживать достаточно точно постоянной величину электрической мощности, вводимой в вибрационный зонд) полная приведенная погрешность запишется суммой составляющих:

$$\Delta\eta/\eta = N_{\varphi p}(\Delta\varphi/\varphi) + N_{\varphi v}(\Delta v/v). \quad (9)$$

Коэффициенты ошибки  $N_{\varphi v}$  и  $N_{\varphi p}$  запишутся в виде [1]:

$$N_{\varphi v} = \frac{3(1-v^2)/v^2 + 2v}{1+\chi-v^2}, \quad (10)$$

$$N_{\varphi p} = 2 \frac{(\chi + D_0 v^{3/2})^2 + (D_0 v^{3/2} + v^2 - 1)^2}{D_0 v^{3/2}(1+\chi-v^2)}. \quad (11)$$

Анализируя приведенные на рис.6 зависимости коэффициентов ошибок  $N_{\varphi v}$  и  $N_{\varphi p}$ , рассчитанных по выражениям (10) и (11) можно констатировать. Увеличение

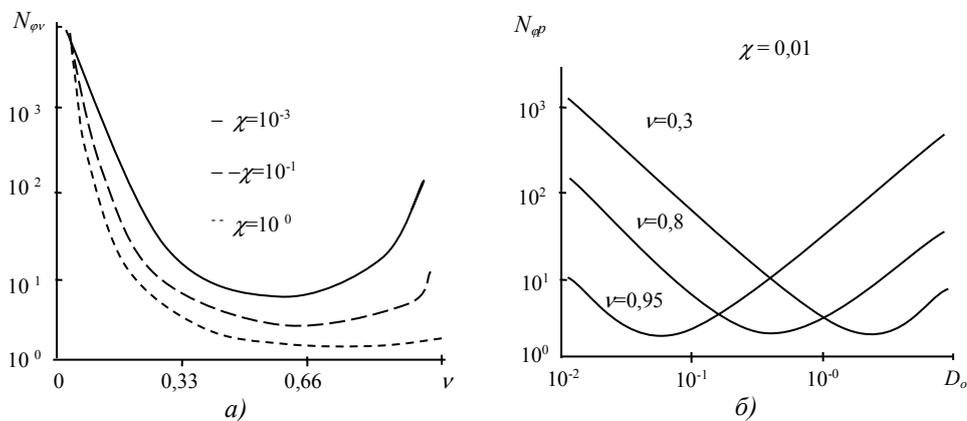


Рис. 6 Зависимости коэффициентов ошибок частотной (а) и фазовой (б) нестабильно-

механических потерь  $\chi$  (рис. 6,а) приводит к некоторому снижению ошибки  $N_{\varphi v}$ , возможно из-за уменьшения чувствительности вибрационного зонда. При величине  $(\Delta v/v) \sim 10^{-5} - 10^{-6}$  (кварцевые задающие генераторы) безразмерная частота измерения  $\nu$  может сдвигаться в сторону ее уменьшения вплоть до  $\nu = 0,2-0,3$  (измерение больших значений вязкости жидкостей). При этих условиях погрешность  $N_{\varphi v}(\Delta v/v)$  при  $\chi = (10^{-3} - 1,0)$  не превысит значений  $(0,4-1) \%$ .

Зависимости коэффициентов ошибки сдвига фаз  $N_{\varphi p}$  (рис. 6,б) от величины коэффициента демпфирования  $D_0$  имеют явно выраженный минимум своих значений при выбранных для измерения вязкости значениях безразмерной частоты  $\nu$ . Минимальные значения  $N_{\varphi p}$  находятся в пределах  $N_{\varphi p} \sim (1,5-2,0)$ . Чем меньше значения вязкости, тем ближе частота измерений к резонансной частоте не нагруженного измерительного зонда. Частотные зависимости минимума  $N_{\varphi p}$  хорошо коррелируют с зависимостями чувствительности фазового метода (рис.4).

В целом, можно констатировать, что погрешности измерения в амплитудном методе имеют наибольшее значение [3], а в компенсационном амплитудном методе эти погрешности меньше [4,5]. Принципиально наиболее перспективны вибрационные вискозиметры на основе фазовых методов, имеющих меньшую погрешность, чем амплитудные вискозиметры. Однако фазовые вибрационные вискозиметры схемотехнически существенно сложнее (требуется многоканальное построение задающего генератора), чем амплитудные вискозиметры.

При конструировании вибрационных вискозиметров материал для вибросотного зонда должен обладать малыми несовершенствами упругости, высокой релаксационной стойкостью, стабильностью упругих свойств во времени и в переменных внешних условиях, необходимой коррозионной стойкостью при работе с агрессивными средами. Для высокого класса ИСС вибровискозиметрии при измерении неагрессивных жидких сред и при небольшом температурном диапазоне окружающей среды для изготовления вибрационных зондов хорошо использовать хромокремниймарганцевистую сталь 35ХГСА. Для ИСС измерения вязкости общего назначения вибросотные зонды можно изготавливать из сталей 35ХГС, 50ХГА, 50ХФА, а также из сталей 20Х13 и 40Х13.

Для образцовых и 1-го класса ИСС измерения вязкости при работе в агрессивных средах и повышенной температуре для изготовления вибрационных зондов используют элинварный сплав 44НХТЮ – ферромагнитной сплав с железохромникелевой основой с добавками титана и алюминия.

Материалы для вибросотных измерительных зондов должны быть ферромагнетиками, способными хорошо взаимодействовать с магнитным полем для построения качественных электромагнитных преобразователей зонда (возбуждающего и приемного).

Для материалов вибросотных измерительных зондов очень важным является следующее соотношение  $\sigma_n / \sigma_y \cong (0,1-0,15)$ , где  $\sigma_n$  – предел прочности и  $\sigma_y$  – предел упругости материала (сопротивляемость металла механической пластической деформации).

Для повышения метрологических и эксплуатационных характеристик вибросотных измерительных зондов разработаны методы упрочнения материала резонатора, для замедления роста процессов ползучести (развитие необратимой деформации во времени), основанные на комбинированном воздействии теплового и механического воздействия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крутин, В.Н. К методике расчета колебательных крутильных вискозиметров с сосредоточенными параметрами / В.Н. Крутин, И.Б. Смирницкий // Зав. лаборатория. -1975. - № 4. - С. 461-466.
2. Крутин, В.Н. Фазовый вибрационный метод измерения вязкостей / В.Н. Крутин, Л.А. Ушаков // Зав. лаборатория. - 1976, -№ 8. - С. 1197-1199.
3. Дзюба, А.П. Разработка вибрационного вискозиметра общепромышленного назначения и опыт его внедрения / А.П.Дзюба, В.Н.Крутин, Л.А.Ушаков и др. // Сборник научных трудов. Под ред. Чл. корр. АН СССР С.С. Кутателадзе. - Новосибирск: 1976, - С. 78-87.
4. Колешко, В.М. Электронный прибор для измерения плотности- вязкости нефтепродуктов / В.М. Колешко, В.Я. Сунка // Материалы, технология, инструменты. - 1997, - №1, - С. 96-99.
5. Колешко, В.М. Реанимация нефтегазовых скважин / В.М. Колешко, В.Я. Сунка – Минск, М., 1996, - 60 с.