

УДК 534:535

© 1992 г. Ю.В. Бочаров, О.А. Капустина, В.Н. Решетов

СЕНСОРЫ НА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Обсуждаются пути построения новых нетрадиционных измерителей – оптических сенсоров на жидких кристаллах. Сенсоры функционируют на едином физическом принципе (эффекте поляризационной модуляции света) и способны отслеживать изменения основных физических величин, характеризующих состояние среды: вариации давления, флуктуации температуры, угловая и линейная колебательные скорости и ускорения. Описана методика расчета основных узлов чувствительного элемента сенсора и приведены их основные функциональные параметры. Указаны преимущества новых сенсоров на жидких кристаллах по отношению к традиционным приборам.

Успехи в развитии оптоэлектроники привели к созданию нового типа приборов – волоконно-оптических датчиков для измерения различных физических величин. Их можно разделить на две группы. К первой группе относятся датчики с чувствительным элементом (ЧЭ) из оптического волокна, определенным образом скомпонованного [1]. В датчиках второй группы оптическое волокно используется только для подвода считывающего излучения к ЧЭ, в которой введены инородные звенья (шторки, диафрагмы, решетки и т.п.) или материалы (фотолюминесцирующие кристаллы, жидкие кристаллы и т.п.). Разработки, связанные с созданием датчиков второй группы, – это стремление не только по новому использовать волоконно-оптические материалы и расширить функциональные возможности приборов на их основе, но и попытка снизить требования, предъявляемые к элементной базе, на которой строятся эти измерители.

В настоящей работе обсуждаются вопросы построения одной из модификаций измерителей второй группы – сенсоров на нематических жидких кристаллах (НЖК), действующих на известном физическом принципе – эффекте поляризационной модуляции света [2]. Эти приборы позволяют по величине переменной составляющей оптического сигнала на выходе сенсора регистрировать основные физические характеристики, описывающие состояние среды: вариации давления $P(t)$, скорость флуктуаций температуры $\dot{T}(t)$, линейную $\dot{\xi}(t)$ и угловую $\dot{\Omega}(t)$ колебательную скорости, линейное $\ddot{\xi}(t)$ и угловое $\ddot{\Omega}(t)$ колебательное ускорения.

Первым, кто обратил внимание на возможность использования НЖК для создания измерителей слабых физических воздействий, был А.П. Капустин. Еще в 1968 г. он получил свидетельство на изобретение "Способ обнаружения механических импульсов" [3]; его функциональная схема приведена на рис. 1, а, а формульное представление следующее:

$$\xi(t) \rightarrow V(z, t) \rightarrow \varphi(z, t) \rightarrow \Phi(t) \rightarrow I(t). \quad (1)$$

Здесь $\xi(t)$ – смещение одной из опорных пластин, составляющих ЧЭ; $V(z, t)$ – осциллирующий поток нематической жидкости в ЧЭ; $\varphi(z, t)$ – угол осцилляций директора¹ в этом потоке; $\Phi(t)$ – разность фаз между обыкновенным и необыкновенным

¹ В физике жидких кристаллов принято описывать локальную ориентацию длинных осей молекул с помощью директора \mathbf{n} – единичного вектора, указывающего на преимущественную ориентацию длинных осей молекул в каждой точке.

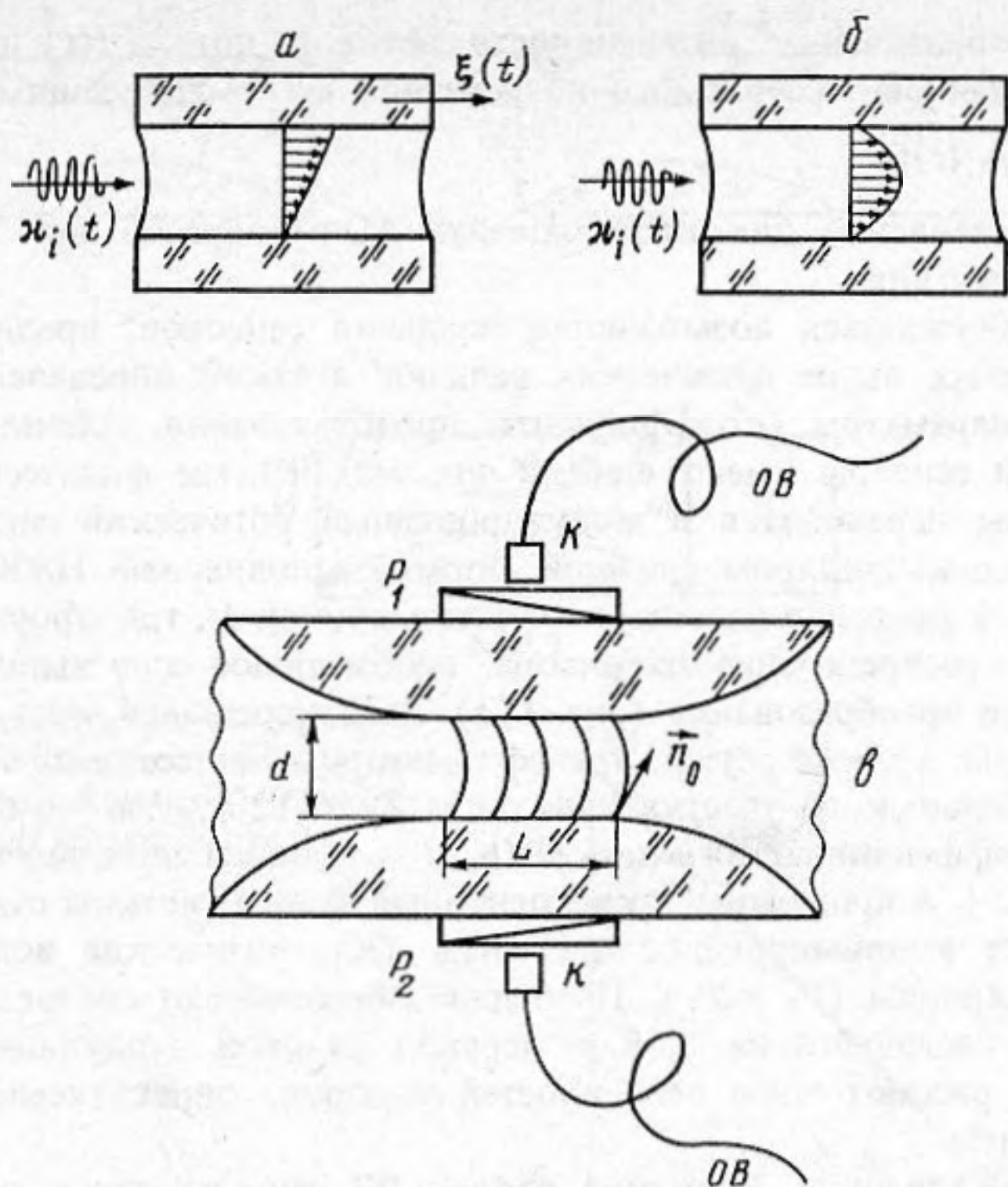


Рис. 1. Чувствительный элемент сенсора на НЖК; схемы преобразования в условиях сдвиговой деформации (а) и "перетекания" (б); функциональная схема ЧЭ с "перетеканием" (в)

лучами света, $I(t)$ — интенсивность светового потока на выходе измерителя. Дальнейшее развитие этой идеи нашло свое отражение в серии экспериментальных и теоретических работ, основные результаты которых обобщены в монографии [5]. Описанные в этих работах физические схемы функционирования сенсоров используют различные виды механических деформаций (сдвиг, сжатие) и типы граничных условий в ЧЭ (гомеотропные, планарные), но имеют общий функциональный признак: "перевод" внешнего воздействия в изменение ориентационного состояния НЖК и соответствующие осцилляции интенсивности считывающего излучения осуществляются вследствие колебательного движения опорных пластин ЧЭ с помощью механических звеньев (мембраны, рычаги, соединительные штоки, упругие переходные слои и т.п.), т.е. по схеме (1). Однако в этой классической схеме НЖК "работает" как традиционный акустооптический (АО) материал, и его уникальные гидродинамические и вязко-упругие свойства полностью не используются. Поэтому для построения перспективных сенсоров на НЖК целесообразнее перейти к иной схеме АО-преобразования [6, 7], где измеряемое воздействие вида $\kappa_i(t)$ "переводится" в ЧЭ непосредственно в осцилляции потока нематической жидкости $V(z, t)$ (рис. 1, б). Это позволяет упростить конструкцию сенсора и обеспечивает ему возможность благодаря изгибной упругости НЖК отслеживать в определенных пределах изменения внешних условий. Формульное представление новой схемы следующее:

$$\kappa_i(t) \rightarrow V(z, t) \rightarrow \varphi(z, t) \rightarrow \Phi(t) \rightarrow I(t). \quad (2)$$

Детальный теоретический анализ схемы (2) дан в работе [6] и относится к диапазону частот, удовлетворяющих условию $\omega_B = 15 \eta / \rho d^2 \gg \omega \gg \omega_H = \pi^2 K_{33} / \gamma_1 d^2$. Здесь ρ и γ_1 — плотность и вращательная вязкость НЖК, d — толщина слоя НЖК в ЧЭ, ω_H и ω_B — нижняя и верхняя предельные частоты. В этом диапазоне частот в условиях квази-

линейного АО-преобразования² интенсивность светового потока $I(t)$ на выходе сенсора связана с величиной измеряемого воздействия $\kappa_i(t)$ следующим соотношением:

$$I(t) \approx I_0 [1 + A_i \kappa_i(t)]. \quad (4)$$

Формульное представление для коэффициента АО-преобразования зависит от вида измеряемого воздействия.

Далее будут обсуждаться возможности создания сенсоров, предназначенных для измерения указанных выше физических величин, а также определены их основные функциональные параметры (коэффициенты преобразования, уровни пороговых сигналов и т.п.). Эти сенсоры имеют единый для всех ЧЭ, где физические воздействия различной природы переводятся в модулированный оптический сигнал $I(t)$. Это — замкнутый сосуд с капилляром сложной формы, заполненный НЖК. АО-преобразование происходит в пределах участка капилляра длиной L , где сформировано исходное стационарное распределение директора, необходимое для выполнения условия (4) и линеаризации преобразования (рис. 1, в). Расширяющаяся часть канала ЧЭ является звукопроводом, а также служит трансформатором для согласования акустического импеданса квазиплоского участка капилляра $Z_0 = 12 \eta_{эф} L / d^2$ с окружающей средой. Здесь $\eta_{эф}$ — эффективная вязкость НЖК, d — толщина слоя на участке капилляра длиной L . На рис. 1, в приведены также основные звенья системы считывания информации: оптические коллимирующие элементы (К), оптические волоконные световоды (ОВ) и поляроиды (P_1 и P_2). Последние обеспечивают соответственно поляризацию излучения, падающего на слой, и перевод фазовой модуляции в амплитудную. Перейдем к рассмотрению особенностей сенсоров, определяемых их функциональным назначением.

Сенсор вариаций давления. Методика расчета ЧЭ сенсора этого типа основана на анализе линеаризованной системы уравнений, описывающей движение несжимаемой нематической жидкости в плоском капилляре с открытыми концами. Если в таком капилляре перепад давления ΔP на длине слоя L изменяется по закону $\Delta P(t) = \Delta P \cos \omega t$, то согласно [6, 7], распределение угла отклонений директора $\varphi(z, t)$ по толщине слоя подчиняется следующей закономерности:

$$\varphi(z, t) = (\Delta P d / \eta_{эф} L \omega) (2z/d) \sin \omega t. \quad (5)$$

Следующую из этой формулы зависимость угла отклонений $\varphi(z, t)$ директора от частоты осцилляций потока $V(z, t)$, определяемой частотой вариаций давления, можно устранить, вводя конструктивные изменения в простейший ЧЭ: закрыть симметричные концы капилляра мембранами М, как это показано на рис. 2, а или замкнуть его на вспомогательную камеру объемом V_0 (см. рис. 2, б). Эти изменения приведут к перемене акустического импеданса ЧЭ от значения Z_0 , соответственно к значениям

$$Z_I = Z_0 + Z_M \quad \text{и} \quad Z_{II} = Z_0 + Z_{V_0}. \quad (6)$$

Здесь $Z_M = 6 E \delta_M^3 b d / i \omega \pi R_M^4$, $Z_{V_0} = b d \rho_0 c_0^2 / i \omega V_0$; E — модуль Юнга материала мембраны; δ_M и R_M — толщина и радиус; b — ширина капилляра; ρ_0 и c_0 — плотность и скорость звука в среде, заполняющей вспомогательную камеру. На рис. 2, в приведена схема комбинированного ЧЭ, где одна из мембран изолирована от внешнего воздействия, а другая контактирует с окружающей средой и это воздействие испытывает. Расчеты показывают, что в этом случае угол $\varphi(z, t)$ отклонений директора, вызванных вариациями давления, определяет следующее соотношение:

$$\varphi(z, t) = (2z \Delta P / \eta_{эф} L) [(\omega^*)^2 + \omega_H^2 + \omega^2 + \omega_H^2 (\omega^*)^2 / \omega^2]^{-1/2}. \quad (7)$$

² Согласно [6], создавая в слое НЖК определенное исходное статическое распределение директора n_0 , подобное динамическому распределению, формирующемуся в осциллирующем потоке $V(z, t)$, можно линеаризовать АО-преобразование. В терминах разности фаз Φ_{0m} между необыкновенным и обыкновенным лучами света это условие линеаризации имеет следующий вид:

$$\Phi_{0m} \approx \pi/2 + m\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

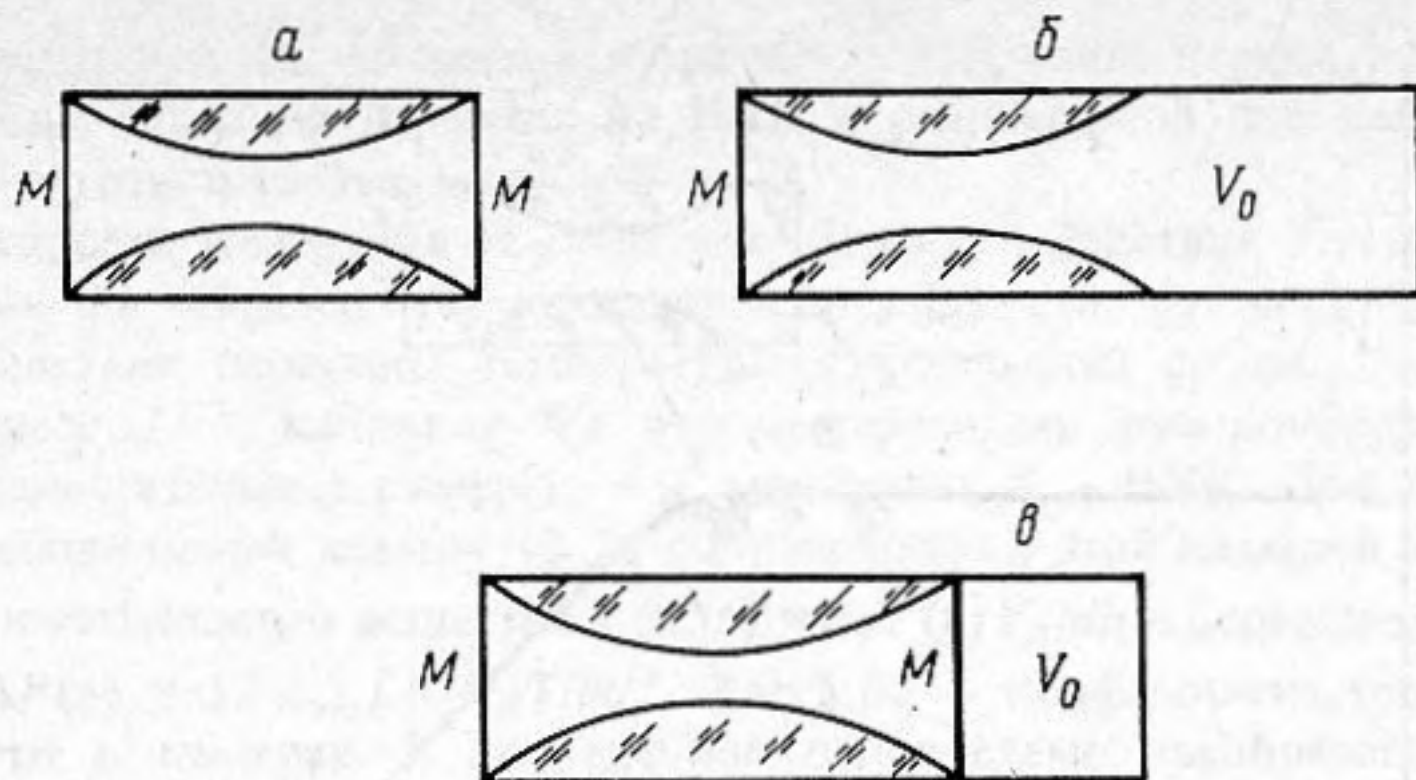


Рис. 2

Рис. 2. Сенсоры вариаций давления на НЖК: с мембранами (а), со вспомогательной камерой (б), комбинированная модификация (в)

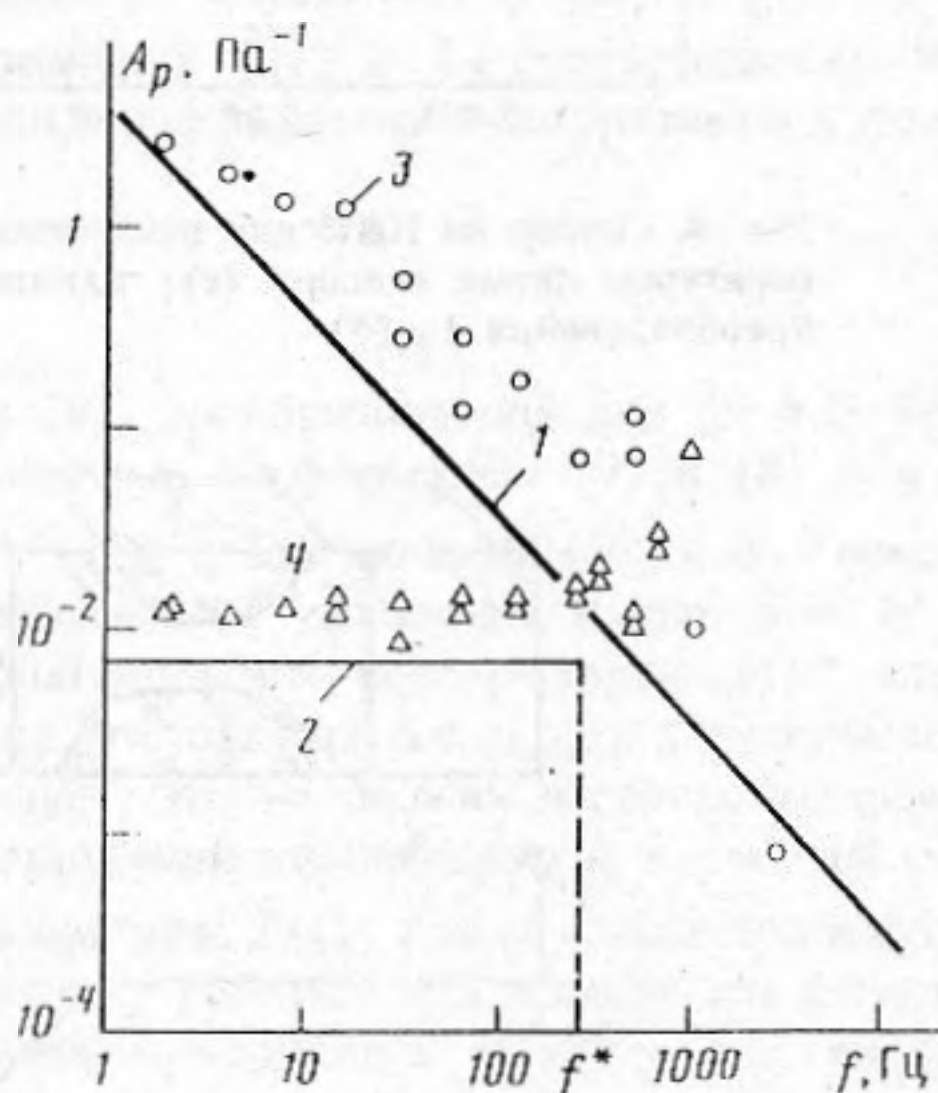


Рис. 3

Рис. 3. Влияние частоты осцилляций давления на коэффициент преобразования A_p для сенсоров на НЖК, различающихся жесткостью мембран

Оно учитывает ориентационную упругость НЖК и частотную зависимость импедансов Z_0 , Z_M и Z_{V_0} . Здесь введены следующие обозначения: $\omega^* = (\omega_H^2 + \omega_{V_0}^2)^{1/2}$; $\omega_H = E\delta_M^3 d^2 / \eta_{эф} L R_M^4$; $\omega_{V_0} = b d^3 \rho_0 c_0^2 / 12 \eta_{эф} L V_0$. Следуя далее схеме преобразования (2) и учитывая формулу (3), где $\kappa_i(t) = \Delta P(t)$, можно показать, что коэффициент A_p преобразования по давлению равен

$$A_p = d[(0,5 + m)\Delta n k_0 d]^{1/2} / \eta_{эф} L [\omega_H^2 + (\omega^*)^2 + \omega^2 + \omega_H^2 (\omega^*)^2 / \omega^2]^{1/2}. \quad (8)$$

Из этой формулы следует, что в области частот, удовлетворяющих условию $\omega_H < \omega < \omega^*$, коэффициент A_p от частоты ω не зависит. На рис. 3 представлен график, рассчитанный для частот 1–10⁴ Гц по формуле (8) для сенсора со следующими характерными параметрами: $L = 10^{-3}$ м; $d = 10^{-4}$ м; $b = 10^{-2}$ м; $k_0 = 10^7$ м⁻¹; $\Delta n = 0,25$; $\eta_{эф} = 0,05$ Па·с; $m = 0$; $\omega^* = 1,6 \cdot 10^3$ с⁻¹ ($f^* = 260$ Гц). Обозначения 1 и 2 показывают теоретические значения коэффициента A_p для двух сенсоров, различающихся только значениями частот ω^* (260 и 0,1 с⁻¹ соответственно), которая определяет границу плоского участка на графике функции $A_p(f)$. В опытах частоту f^* изменяли, варьируя толщину мембраны δ_M , что влияло на ее податливость $c_M \sim \delta_M^3$. Обозначения 3 и 4 на рис. 3 показывают значения A_p для мембран толщиной 15 и 150 мкм, изготовленных соответственно из бериллия и алюминия. Испытания проводились на стенде, описанном в работе [7], в диапазоне частот, где длина волны звука значительно превышает линейные размеры камеры V_0 . Видно, что для определенного

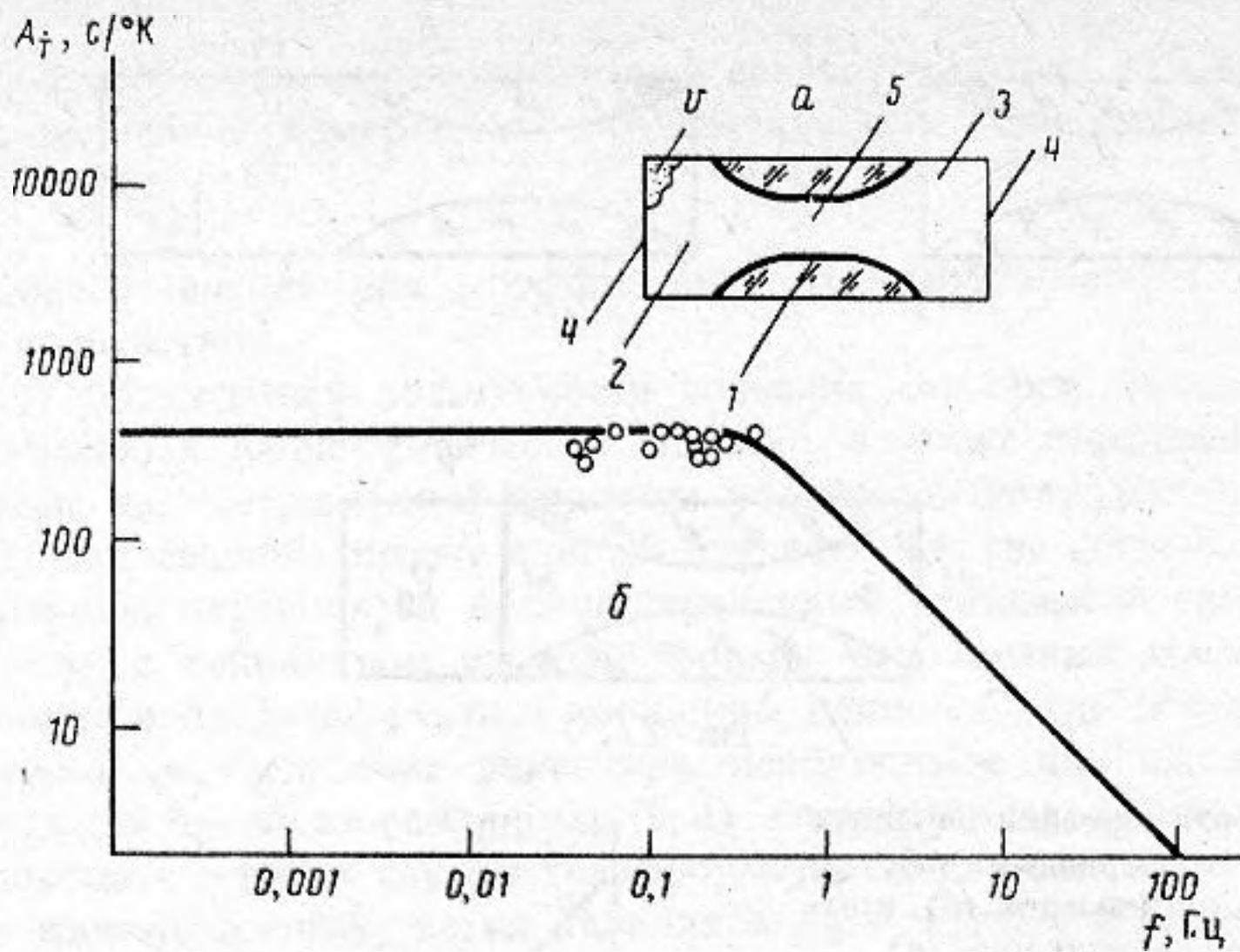


Рис. 4. Сенсор на НЖК для измерения скорости флуктуаций температуры: схема сенсора (а); влияние частоты на коэффициент преобразования A_T (б)

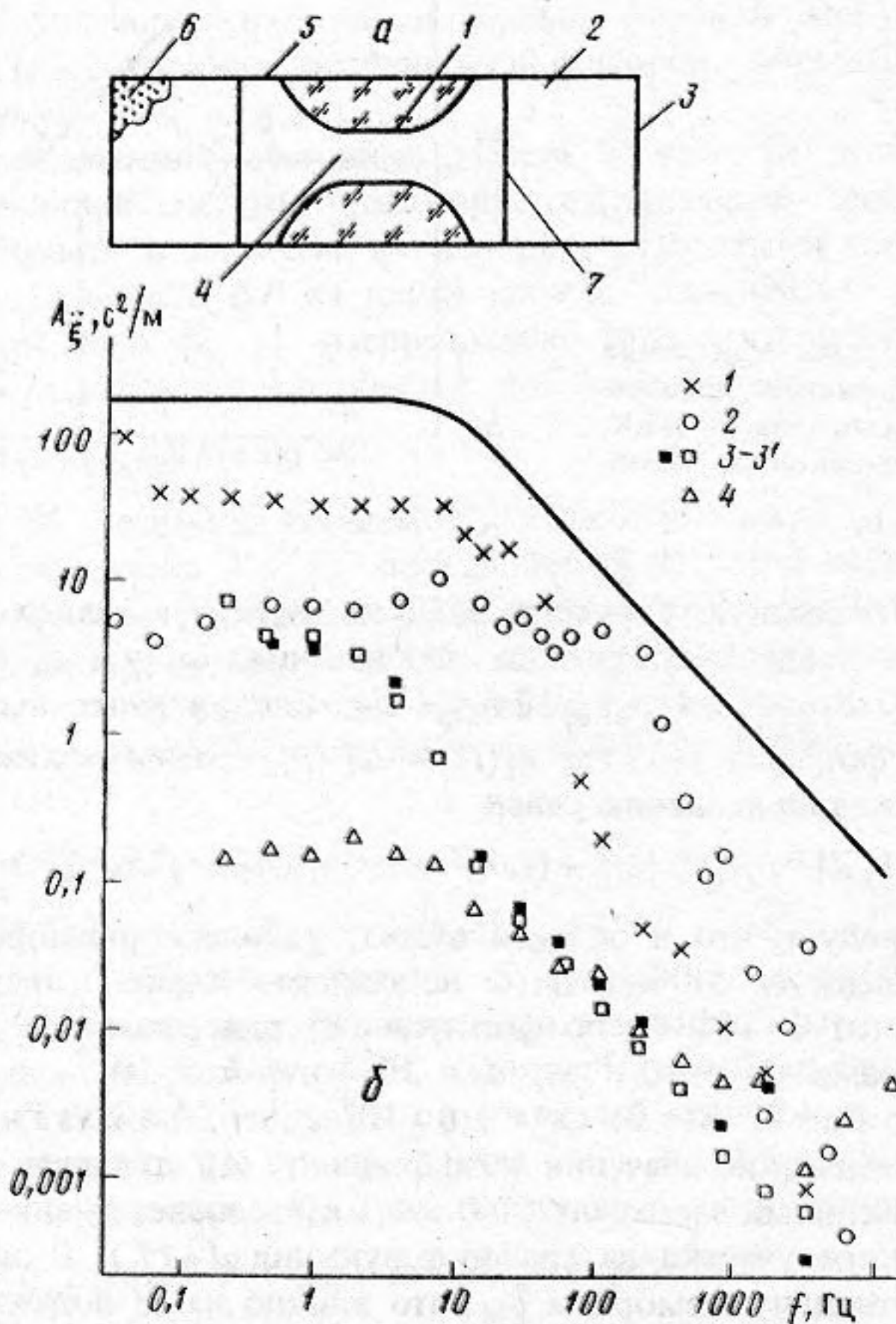


Рис. 5. Сенсоры линейной колебательной скорости и ускорения: схема сенсора (а); влияние частоты колебаний на коэффициент преобразования A_{ξ} для четырех сенсоров, различающихся жесткостью мембран и параметром $\rho_{\text{эф}} H_{\text{эф}}$ (б)

диапазона частот при надлежащем выборе указанных выше параметров можно построить измерители вариаций давления на НЖК с равномерной или падающей, как $1/f$, амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ).

Сенсор скорости изменения температуры. Принцип действия этого вида сенсора на НЖК основан на эффекте терморасширения жидкости, находящейся в замкнутом объеме, вследствие перемены температуры окружающей среды. Его схема дана на рис. 4, а. Здесь 1 — капилляр ЧЭ с симметричными рупорообразными концами; 2 и 3 — вспомогательные камеры; 4 — мембраны, 5 — НЖК. При терморасширении жидкости, заполняющей камеру V_0 , в сопряженном с этой камерой капилляре возникает поток нематического вещества $V(z, t) = \beta_0 \dot{T}(t) V_0 / db$ и перепад давления на длине капилляра $\Delta P(t) = 12 \eta_{эф} L \beta_0 V_0 \dot{T} / bd^3$. Здесь β_0 — коэффициент теплового расширения жидкости в камерах. В приведенной выше схеме преобразования (2) имеем $\kappa_i(t) = \dot{T}(t) \rightarrow \Delta P(t)$. В соответствии с этим связь измеряемой величины $\dot{T}(t)$ с интенсивностью светового потока на выходе сенсора определяет формула (4), где функция $\kappa_i(t)$ и коэффициент A_i принимают значения $\dot{T}(t)$ и A_T соответственно. Расчеты приводят к следующему соотношению для коэффициента преобразования по скорости изменения температуры:

$$A_{\dot{T}} = 12 A_P \eta_{эф} L \beta_0 V_0 / bd^3, \quad (9)$$

где коэффициент A_P определяет формула (8), преобразованная для $\omega^* = 0$. Теоретические значения коэффициента $A_{\dot{T}}$, вычисленные по формулам (9) и (8) для частот осцилляций температуры в интервале $10^{-3} - 10^{+2}$ Гц, даны на рис. 4, б. Геометрические размеры ЧЭ сенсора L и b не отличаются от указанных выше: $d = 40$ мкм; $V_0 = 0,4$ см³; $m = 0$; при расчете предполагалось, что сенсор-термометр заполнен полностью НЖК, а значения его физических постоянных Δn , $\eta_{эф}$, ρ и c соответствуют температуре 40 °С. Из этого графика следует, что на низких частотах коэффициент преобразования с повышением частоты осцилляций увеличивается, т.е. в этой области сенсор измеряет скорость флуктуаций температуры $\dot{T}(t)$, а не ее собственные флуктуации. На более высоких частотах этот же сенсор работает как измеритель флуктуаций температуры. Испытания опытного образца проводились в интервале температур 30–50 °С путем сравнения его показаний с показаниями калиброванной термопары (железо — константан) фирмы Брюль и Кьер. Низкая чувствительность этой термопары в области частот осцилляций температуры, превышающих 1 Гц, позволяет получить достоверные численные данные о коэффициенте $A_{\dot{T}}$ на соответствующих частотах.

Однако вплоть до частоты 50 Гц сенсор уверенно регистрировал осцилляции температуры. Соответствующие опытные значения $A_{\dot{T}}$ приведены на рис. 4, б в обозначениях \circ .

Их согласие с результатами расчетов вполне удовлетворительное. Заметим, что в камеру 2 (объем 1 см³) опытного образца сенсора-термометра был введен пузырек воздуха объемом $v = 0,1$ см³, который играл роль "мягкого элемента": при появлении переменного перепада давления на длине ЧЭ из-за терморасширения жидкости НЖК "движется" в сторону этого пузырька.

Сенсоры линейной колебательной скорости и ускорения. Принцип действия этого типа сенсоров основан на генерации силами инерции потока нематической жидкости при колебательном движении сенсора, что вызывает соответствующие осцилляции директора. Схема простейшего сенсора приведена на рис. 5, а. Здесь 1 — капилляр ЧЭ с симметричными рупорообразными краями; 2 — камеры объемом V_0 ; 3 — мембраны; 4 — НЖК; 5 — корпус; 6 — воздушная "полость" в камере; 7 — внутренние мембраны. Колебательное движение передается от испытываемого объекта корпусу ЧЭ. Благодаря силе инерции возникает перепад давления $\rho_0 H_0 \ddot{\xi}(t)$, величина которого зависит от высоты столба H_0 в жидкости в камерах и ее плотности ρ_0 . Если упругость воздуха в камерах мала по сравнению с упругостью мембран, т.е. выполняется неравенство

$V_0 \gg bd\rho_B c_B^2 R^4 / 12 E\delta_M^3$, то перепад на входе ЧЭ равен

$$\Delta P(t) = [\rho_0 H_0 + \rho H] \ddot{\xi}(t) \approx \rho_{\text{эф}} H_{\text{эф}} \ddot{\xi}(t). \quad (10)$$

Здесь ρ_B и c_B — плотность и скорость звука для воздуха, $H_{\text{эф}}$ — эффективное значение высоты столба жидкости в ЧЭ, $\rho_{\text{эф}}$ — эффективное значение ее плотности, H — высота столба НЖК в ЧЭ. В соответствии со схемой преобразования (2) этот перепад давления вызывает осцилляции интенсивности считывающего излучения. Расчеты показывают, что в общем случае измеряемый сигнал $\ddot{\xi}(t)$ связан с интенсивностью светового потока на выходе сенсора $I(t)$ формулой (4), где $\kappa_i(t) \rightarrow \ddot{\xi}(t)$, а $A_i = A_{\ddot{\xi}}$ и

$$A_{\ddot{\xi}} = \frac{\rho_{\text{эф}} H_{\text{эф}} d [\Delta n k_0 d (0,5 + m)]^{1/2}}{\eta_{\text{эф}} L (\omega_M^2 + \omega_H^2 + \omega^2 + \omega_H^2 \omega_M^2 / \omega^2)^{1/2} (1 + \omega^2 / \omega_B^2)^{1/2}}. \quad (11)$$

Если мембраны имеют достаточно высокую жесткость, так что $\omega_M > \omega_H$ ($E\delta_M^3 / R_M^4 \gg \pi^2 K_{33} L / d^4$), то формула (11) преобразуется к виду

$$A_{\ddot{\xi}} = \rho_{\text{эф}} H_{\text{эф}} d [\Delta n k_0 (0,5 + m)]^{1/2} / \eta_{\text{эф}} L \omega_M. \quad (12)$$

Это означает, что сенсор соответствующей конструкции имеет АЧХ плоскую по ускорению $\ddot{\xi}(t)$. Чтобы увеличить коэффициент преобразования $A_{\ddot{\xi}}$, т.е. повысить чувствительность сенсора, достаточно увеличить плотность жидкости $\rho_{\text{эф}}$ или высоту столба $H_{\text{эф}}$. Если жесткость мембран невысокая, так что $\omega_M < \omega_H$ ($E\delta_M^3 / R_M^4 < \pi^2 K_{33} L d^4$), то коэффициент преобразования описывается следующей формулой:

$$A_{\ddot{\xi}} = \rho_{\text{эф}} H_{\text{эф}} d [\Delta n k_0 d (0,5 + m)]^{1/2} / \eta_{\text{эф}} L. \quad (13)$$

Такой сенсор будет иметь АЧХ плоскую по колебательной скорости $\dot{\xi}(t)$. На рис. 5, б дан график частной зависимости коэффициента преобразования $A_{\dot{\xi}} = f(\omega)$, рассчитанной по формуле (12), для диапазона $5 \cdot 10^{-2} \dots 10^4$ Гц. Геометрические размеры сенсора следующие: $d = 10^{-4}$ м; $L = 10^{-3}$ м; параметр $\rho_{\text{эф}} H_{\text{эф}} = 500$ кг/м²; частота мембран $f_M = 10$ Гц. Испытания сенсоров этого вида проводились на стенде, описанном в работе [7], где источником вибраций служил электродинамический возбудитель (тип 11075), а их амплитуды контролировали с помощью традиционных измерителей фирмы Брюль и Кьер (тип 4333), а также прямыми измерениями через микроскоп. Результаты этих испытаний приведены на рис. 5, б в обозначениях 1–4, которые относятся к показаниям сенсоров, различающимся частотой f_M мембран и параметром $\rho_{\text{эф}} H_{\text{эф}}$: 10 Гц (металлические мембраны) и 500 кг/м² (сенсор № 1); 100 Гц (наиболее жесткие металлические мембраны) и 500 кг/м² (сенсор № 2); 1,6 Гц (мягкие мембраны из лавсана) и 10 кг/м² (сенсор № 3); 7 Гц (металлические мембраны) и 5 кг/м² (сенсор № 4)³. Анализируя эти данные, отметим следующее: а) из-за высокой жесткости мембран сенсор № 2 имеет более низкую чувствительность, чем сенсор № 1; б) в области частот, где сенсоры № 2 и № 3 "работают" как измерители ускорений, они имеют практически равные чувствительности, так как существенное различие по значению параметра $\rho_{\text{эф}} H_{\text{эф}}$ скомпенсировано благодаря использованию в сенсоре № 3 мягких мембран из лавсана; в) низкая чувствительность сенсора № 4 вызвана уменьшением высоты столба $H_{\text{эф}}$ и высокой жесткостью мембран. В свете этих данных можно сделать вывод о возможности управления чувствительностью сенсора и видом его АЧХ, пользуясь изложенными выше теоретическими представлениями.

Сенсоры угловой колебательной скорости и ускорения. Принцип действия этого типа сенсоров также основан на генерации силами инерции потока жидкости при вращательном движении ЧЭ сенсора, создаваемом испытуемым объектом. Схема ЧЭ простейшего сенсора приведена на рис. 6, а. Здесь 1 — кольцеобразная камера; 2 — капил-

³ Очевидно, что у реального сенсора значение параметра $\rho_{\text{эф}} H_{\text{эф}}$ определить нетрудно, тогда как жесткость мембран можно только численно оценить по приведенной выше формуле.

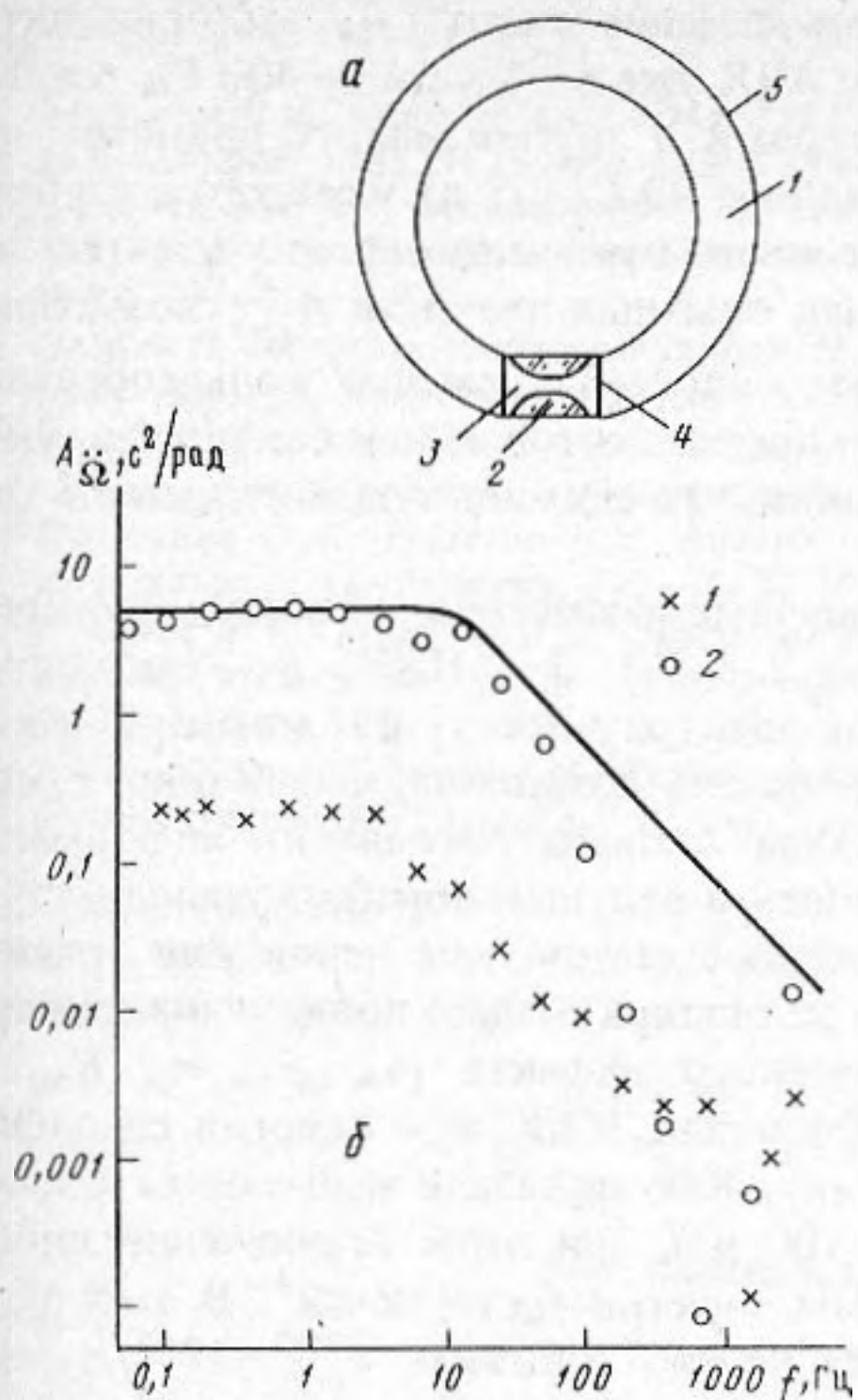


Рис. 6

Рис. 6. Сенсоры угловой колебательной скорости и ускорения: схема сенсора (а); связь частоты колебаний с коэффициентом преобразования $A_{\ddot{\Omega}}$ для двух сенсоров, различающихся диаметром трубки кольцеобразной камеры (б)

Рис. 7. Функциональная схема сенсора на НЖК

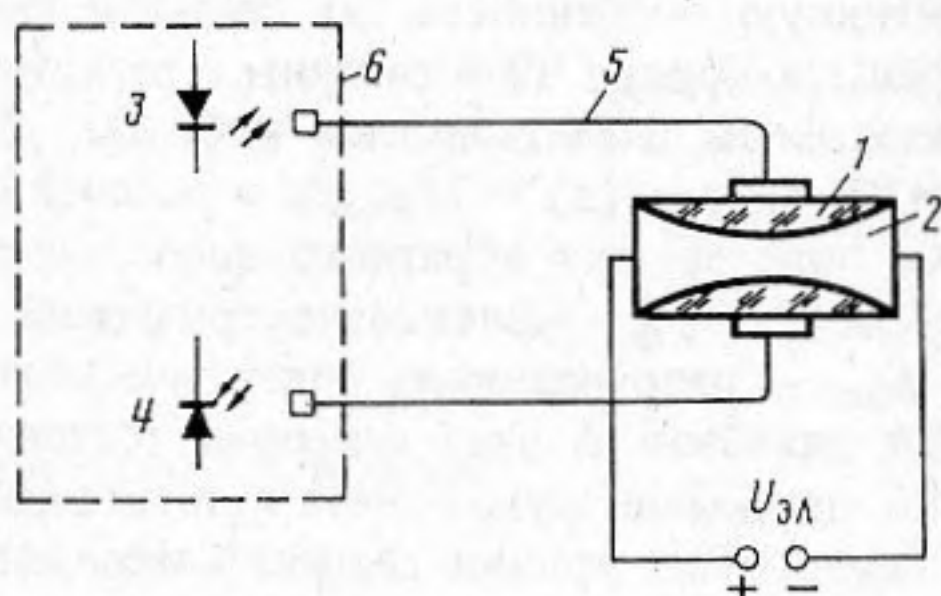


Рис. 7

ляр; 3 – НЖК; 4 – внутренние “разделительные” мембраны; 5 – корпус. Вращательное движение передается испытуемым объектом корпусу сенсора. Благодаря силе инерции $\frac{1}{4}\pi\rho_0 H_0^2 \Omega(t)$, зависящей от общей кольцеобразной камеры H_0 и плотности заполняющей ее “тяжелой” жидкости, это приводит к появлению на входе ЧЭ перепада давления

$$\Delta P(t) = [\rho_0(2\pi NR - H) + \rho H] R \ddot{\Omega}(t) \approx 2\pi R^2 \rho_{эф} N. \quad (14)$$

Здесь N – число витков кольцеобразной камеры, R – ее радиус. В соответствии со схемой преобразования (2) это изменение давления приводит к осцилляции интенсивности считывающего излучения, при этом в общем случае коэффициент преобразования по угловому ускорению равен

$$A_{\ddot{\Omega}} = \frac{2\pi R^2 N \rho_{эф} d [\Delta n k_0 d (0,5 + m)]^{1/2}}{\eta_{эф} L [\omega_M^2 + \omega_H^2 + \omega^2 + \omega_H^2 \omega_M^2 / \omega^2]^{1/2} (1 + \omega^2 / \omega_B^2)^{1/2}}. \quad (15)$$

Из этой формулы следует, что для управления чувствительностью этого типа сенсоров достаточно изменить длину кольцеобразной камеры $2\pi NR$ и плотность заполняющей ее жидкости. Графики теоретической частотной зависимости коэффициента преобразования $A_{\ddot{\Omega}}$, рассчитанный по формуле (15) для частот 0,1–3000 Гц, показан на рис. 6, б. В этих расчетах принято: $d = 10^{-4}$ м; $L = 10^{-3}$ м; $N = 5$; $H = 10^{-1}$ м. Отметим, что существует ограничение на длину камеры, определяемое неравенством $2\pi\omega NR/c_0 \ll 1$.

На стенде, описанном в работе [7], испытаны два сенсора, различающихся внутренним диаметром трубки кольцеобразной камеры. Результаты этих испытаний приведены на рис. 6, б. Анализируя эти данные, можно сделать следующие выводы: а) сенсор с трубкой меньшего диаметра (обозначение 1) имеет более низкую чувствительность, чем сенсор с большим диаметром трубки (обозначение 2) (это вызвано увеличением вязкого трения в трубке малого диаметра, что теория не учитывает); б) этот же сен-

сор имеет более низкое по сравнению с расчетом значение частоты f_M , что приводит к появлению "велосиметрического" участка у его АЧХ уже в области 3–400 Гц (снижение f_M обусловлено возросшими вязкими потерями в трубке малого диаметра, что адекватно увеличению эффективной длины капилляра ЧЭ $L_{эф}$); в) у сенсора с трубкой большого диаметра при частотах $f > f_M$ имеет место отклонение экспериментальной зависимости $A_{\Omega}(f)$ от расчетной и резкий спад опытных значений A_{Ω} ; возможная причина этого эффекта — образование воздушных полостей в каналах кольцеобразной камеры, примыкающих к ЧЭ, в процессе их заполнения, которые как бы "шунтируют" ЧЭ и уменьшают связанную с ним массу жидкости, что снижает чувствительность сенсора.

Описанные выше сенсоры на НЖК имеют различные назначения, но общую функциональную схему, представленную на рис. 7. Здесь 1 — ЧЭ; 2 — НЖК; 3 — светодиод; 4 — фотодиод; 5 — линия связи (оптическая или электрическая); 6 — квантово-электронный модуль. Все сенсоры, с которыми проводились испытания, имели общую конструктивную особенность: а) свето- и фотодиоды системы считывания информации встроены в корпус ЧЭ и связаны с регистрирующей и ведущей обработкой аппаратурой традиционным электрическим кабелем; б) исходное статическое искажение ориентации НЖК вида $\varphi_0(z) = 2z\varphi_{00}/d$ в рабочей части капилляра создает продольное электрическое поле за счет обратного флексоэлектрического эффекта [4] ($\varphi_{00} = f(E_{эл}, d, f_{ф}, w, K_{33})$; $f_{ф}$ — флексоэлектрический коэффициент НЖК, w — энергия сцепления [4], $E_{эл}$ — напряженность электрического поля). Как показали испытания, динамический диапазон Δ этих сенсоров составляет 100 дБ, при этом ограничение вносят только дробовые шумы света и тепловые шумы электрических цепей⁴. В этих условиях пороговые уровни сигналов определяются по соотношению: $\kappa_i^{пор} = 10^{-5}/A_i$ [9] и составляют $P^{пор} = 10^{-4}$ Па/ $\sqrt{\text{Гц}}$, $\dot{T}^{пор} = 10^{-6}$ К/с · $\sqrt{\text{Гц}}$, $\ddot{\xi}^{пор} = 10^{-6}$ м/с² · $\sqrt{\text{Гц}}$, $\dot{\xi}^{пор} = 10^{-7}$ м/с · $\sqrt{\text{Гц}}$, $\dot{\Omega}^{пор} = 10^{-6}$ рад/с · $\sqrt{\text{Гц}}$, $\ddot{\Omega}^{пор} = 10^{-6}$ рад/с² · $\sqrt{\text{Гц}}$.

Проведенное исследование показывает возможность создания семейства новых сенсоров на основе НЖК и волоконно-оптических материалов, функционирующих на едином физическом принципе и способных отслеживать изменения ряда физических величин, характеризующих состояние среды. Эти приборы имеют плоскую или падающую, как $1/f$, АЧХ и могут в определенных пределах адаптироваться к изменению внешних условий. К числу их достоинств относятся совместимость с современной оптической элементной базой, возможность использования многомодового оптического волокна и немонохроматических источников ($\Delta\lambda_0/\lambda_0 \sim 10^{-1}$), простота и универсальность конструкций, низкие пороговые сигналы, широкий диапазон регистрируемых частот (от 10^{-3} до 10^2 Гц). На следующем этапе разработок предполагается создание моделей сенсоров, в которых передача и коммутация сигналов будет осуществляться только оптическими методами без промежуточных преобразований в электрические сигналы.

Основываясь на изложенных выше принципах конструирования ЧЭ, отвечающих тому или иному назначению, можно обеспечить высокую избирательность к измеряемому параметру и низкую чувствительность к влиянию неизмеряемых ("паразитных") факторов, сопутствующих любому физическому процессу.

Область применения описанных сенсоров, как и многоканальных автономных модулей, построенных на их основе, — сейсмология, в том числе векторная, виброметрия, навигация, в том числе ориентация движущегося объекта в пространстве, криминалистика, комплексный контроль за состоянием окружающей среды, медицина, акустические измерения, метеорология, в том числе проведение динамической микробарометрии в полевых условиях с автокоррекцией влияния флуктуации температуры среды и т.п.

⁴ Существенно, что собственные шумы НЖК, обусловленные ориентационными флуктуациями директора, не влияют на величину Δ в области частот $f > f_H$; согласно данным работы [8], они локализованы главным образом в области частот $f < f_H$ и их спектральная плотность с ростом f спадает, как $1/f^2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусургин В.И., Семенов А.С., Удалов Н.П. Оптические и волоконно-оптические датчики // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 5. С. 901–944.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1978.
3. Капустин А.П. Способ обнаружения механических импульсов: А.с. 224102 СССР // Б.И. 1968. № 25. С. 1–3.
4. Де Жён П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977.
5. Капустин А.П., Капустина О.А. Акустика жидких кристаллов. М.: Наука, 1985.
6. Решетов В.Н. Акустически инициируемые ориентационные явления в нематических жидких кристаллах: Автореф. дис. . . . канд. физ.-мат. наук. М.: АКИН, 1986. 130 с.
7. Капустина О.А., Решетов В.Н. Анализ акустического преобразования в нематических жидких кристаллах // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 3. С. 497–504.
8. Бочаров Ю.В., Решетов В.Н. Ориентационные флуктуации и шумы в сенсорах на нематических жидких кристаллах. // Тез. Европейской летней конф. по жидким кристаллам. г. Вильнюс 19–25 августа 1991 г.
9. Bocharov Yu.V., Gurova I.N., Kapustina O.A., Remizova E.I., Reshetov V.N. Nematic Liquid Crystal Sensors // Molecular Crystal and Liquid Crystal. 1992 (in press).

Акустический институт
им. Н.Н. Андреева
Российской Академии наук

Поступила в редакцию
10.10.91

Yu.V. Bocharov, O.A. Kapustina, V.N. Reshetov

LIQUID CRYSTAL SENSORS

A radically new equipment utilizing nematic liquid crystals as a sensitive element and multimode optical fibers for communication are suggested and discussed. The concept exploits the effect of external action-induced changes in the birefringence observed in liquid crystals. The equipment comprises: a sensor for measurement of linear vibrational velocity or acceleration, a sensor registering pressure variations, a sensor for temperature fluctuations measurements and a sensor measuring the angular vibrational velocity or acceleration. Theoretical analysis of the operation principle of these sensors is conducted. Physical conversion schematics are presented and a calculation method of basic design components of a sensitive sensor cell is suggested. The main sensor specifications are determined. New liquid crystal sensors don't have any analogs in the international instrument production. They have essential advantages by an operation frequency range ($10^{-2} - 10^2$), dynamic range (120 dB), response threshold, weight, dimensions and energy consumption relative to standard devices and can be used for a measurement of weak physical fields of various nature (relevant to acoustics, vibrations, rotations and temperature) in industry, medicine, biology, seismology, navigation, etc.