

УДК 531.787.5; 539.3

# Информативные световые импульсы индикаторного полимерного оптоволоконного PEI-покрытия при вдавливании жёстких шаровых частиц

© 2021 г. **А. А. Паньков, ДОКТОР ФИЗ.-МАТ. НАУК***Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь**E-mail: a\_a\_pankov@mail.ru**Поступила в редакцию 02.03.2021*

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-08-99-106

Разработана математическая модель функционирования индикаторного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным пьезоэлектролюминесцентным (PEI) датчиком для случая диагностирования множественного механического силового воздействия по результатам цифровой обработки информативного светового потока на выходе из оптоволоконного датчика. Распределённое силовое воздействие обусловлено многоточечным низкоскоростным ударом множества жёстких частиц, например, ударов града, вдавливанием частиц по внешней поверхности покрытия. Представлены результаты численного моделирования последовательности информативных световых импульсов на выходе из оптоволоконного PEI-датчика. В результате численного анализа выявлены закономерности влияния на величину и форму световых импульсов значений управляющего электрического напряжения на электродах датчика, наличия возможного пересечения «зон возмущений» соседних шаровых частиц. Исследована фильтрация информативных сигналов индикаторного PEI-покрытия посредством управляющего электрического напряжения датчика с целью исключения влияния на регистрируемый информативный световой сигнал незначительных (ниже рабочего диапазона значений) внешних механических воздействий.

**Ключевые слова:** индикаторное полимерное покрытие, встроенный оптоволоконный датчик, пьезоэлектролюминесцентный эффект, механолюминесценция, удар частиц, численное моделирование.

**Коды OCIS:** 060.2370, 120.5475.

## ВВЕДЕНИЕ

В области измерительной техники актуальной остаётся задача совершенствования сенсорных покрытий для индикации, локализации внешних воздействий, диагностирования геометрических, упругих и трибологических характеристик контактирующих с покрытием исследуемых тел. Гибкие полимерные сенсорные (тактильные) покрытия [1–3] находят применение в системах «ощущения» робо-

тотехнических устройств [4] и в индикаторных полимерных покрытиях для регистрации различных внешних химических и физико-механических воздействий, например, света, радиации, температуры, давления, удара [5]. Индикация, количественная оценка характеристик внешних механических одиночных и/или множественных воздействий, в частности, ударов жёстких частиц по несущим поверхностям авиационной техники

является одной из актуальных задач мониторинга прочностных и аэродинамических характеристик элементов конструкций как при высокоскоростном ударе (кусочками бетонной крошки из-под переднего колеса при взлёте с взлётно-посадочной полосы, осколками снарядов и пуль в боевых ситуациях), так и при низкоскоростном ударе, например, градом [6, 7]. Перспективными являются индикаторные покрытия с чувствительными элементами из пьезоэлектрических материалов [8, 9], в частности, пьезоэлектрических полимерных плёнок PVDF [10] и/или с использованием «механолюминесцентного эффекта» — светотдачи при механическом воздействии, который может проявляться как для однородных материалов, так и для композиционных материалов с пьезоэлектрической и электролюминесцентной фазами [11, 12]. Люминесцентные индикаторные покрытия могут иметь, например, внутренний тензочувствительный графитизированный слой и внешний «цветовой» индикаторный слой из жидкокристаллического полимера, который изменяет свой цвет в зависимости от величины проходящего через него тока. «Умные» функциональные индикаторные покрытия взаимодействуют с окружающей средой и под воздействием различных внешних факторов, например, удара реализуют контролируемые функции диагностики, адаптации и самозалечивания повреждений. Так, адаптивное сенсорное покрытие [13] представляет собой сложную систему в виде электрической сети из ячеек пьезоэлементов и локальных процессоров для включения/выключения ячеек из сети, что позволяет системе автоматически адаптироваться к условиям эксплуатации и локализовать вероятностное расположение диагностируемого внешнего воздействия, например, удара или повреждения. В [14] исследован гибридный вибродатчик с преобразованием пьезоэлектрического сигнала в модуляцию оптического излучения, световой сигнал от которого далее передаётся по оптоволокну. Результаты численного моделирования оптоволоконного датчика с люминесцентной оболочкой даны в [15].

Цель — разработка оптико-механической математической модели функционирования индикаторного полимерного покрытия [16] со встроенным оптоволоконным пьезоэлектро-

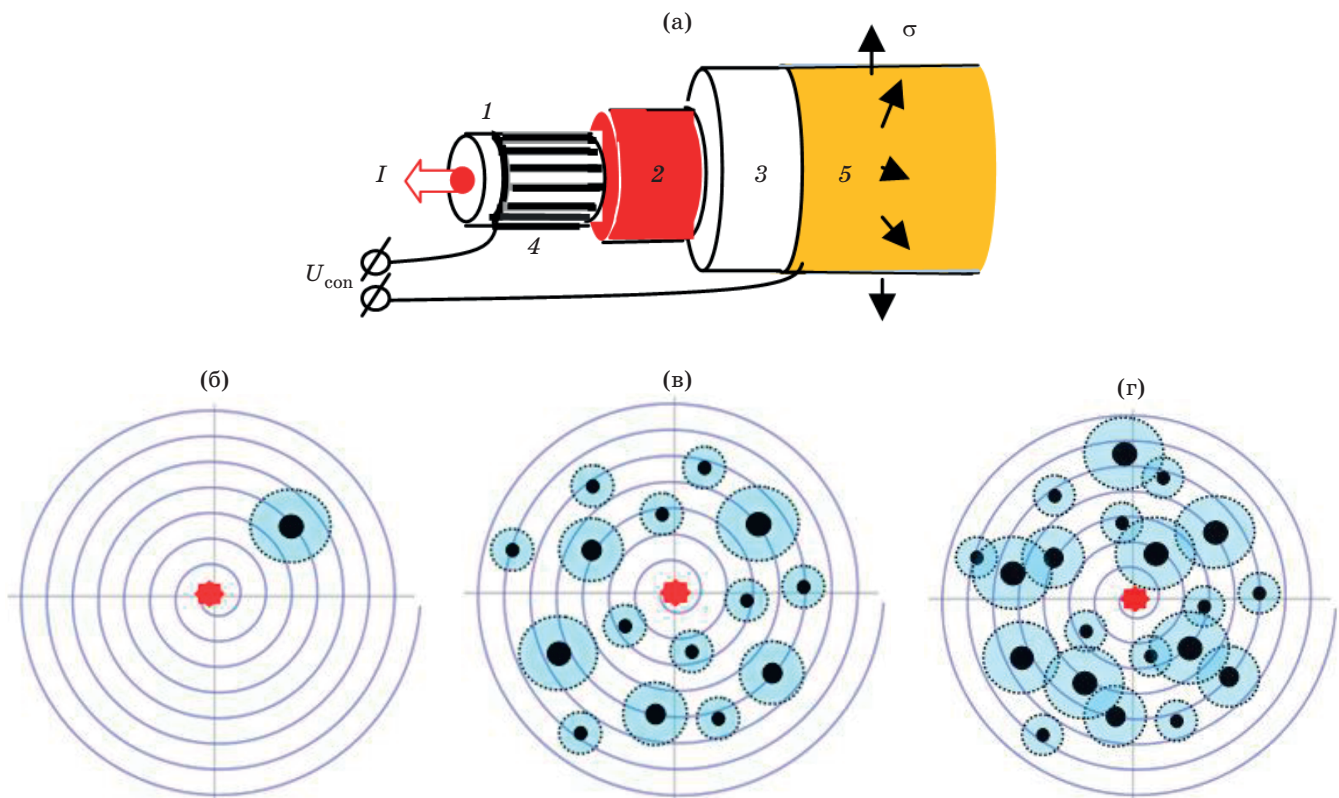
люминесцентным (PEL) датчиком [17, 18] для диагностирования распределённых внешних воздействий, в частности, многочастичного низкоскоростного «удара» — одновременного вдавливания в индикаторное покрытие множества жёстких шаровых частиц в квазистатическом приближении.

## 1. ИНДИКАТОРНОЕ ПОЛИМЕРНОЕ ПОКРЫТИЕ

Индикаторное полимерное PEL-покрытие — это слой полимера постоянной толщины со встроенным в него оптоволоконным PEL-датчиком (рис. 1а), расположенным в виде спирали Архимеда в плоскости покрытия (рис. 1б–1г), продольная ось оптоволоконна и, в целом, PEL-датчика описывается известной функцией  $\rho = a\varphi$  в полярной системе координат  $\rho, \varphi$ , где  $a$  — константа. Внутри покрытия расположение поперечных сечений датчика определяем значениями криволинейной координаты  $z$  — длиной участка спирали (продольной оси датчика) от центра спирали ( $\rho = 0$ ) до центра рассматриваемого сечения датчика, где область значений  $z \in (0, l)$ , длина спирали датчика

$$l = \sum_{s=1}^n l_s = \int_0^{2\pi n} \rho d\varphi = \Delta_\rho \pi n^2$$

вычисляется через значение «шага»  $\Delta_\rho$  — расстояние между витками спирали,  $n$  — полное число витков спирали в индикаторном покрытии,  $l_s = \pi \Delta_\rho (2s - 1)$  — длина  $s$ -го витка спирали, номер витка  $s = 1, \dots, n$ . Используем локальные продольные координаты  $\xi$  для множества активированных (деформационным полем покрытия) «дуг» датчика, расположенных в круговой деформационной «зоне возмущения» покрытия как результата внешнего воздействия (вдавливания) жёсткой шаровой частицы. Внутри каждой «зоны возмущения» значение  $\xi = 0$  имеем в центрах каждой из дуг, при этом все центры дуг расположены на радиальной оси  $\rho$ , проходящей через центр зоны возмущения. Относительное расположение дуг в «зоне возмущения» описываем с использованием локальной координаты  $\zeta$ , для которой  $\zeta = 0$  в центре зоны, направление  $\zeta$  — вдоль координатной линии  $\rho$ . Спиральная форма размещения опто-



**Рис. 1.** Оптоволоконный РЕЛ-датчик (а) внутри индикаторного покрытия при одиночном (б) и множественном (в, г) вдавливаниях жёстких шаровых частиц с пятном контакта (чёрный круг) в центре «зоны возмущения» (голубой круг), фотодетектор — в центре спирали (красная точка).

волоконного РЕЛ-датчика в индикаторном покрытии позволяет значительно увеличить область мониторинга протяжённых двумерных поверхностей одним датчиком. Фотодетектор установлен в центре спирали датчика для регистрации интенсивностей  $I$  оптических сигналов на выходе из оптоволоконна датчика.

Интегральная интенсивность  $I$  светового потока на выходе из оптоволоконна РЕЛ-датчика (рис. 1а) образована суммированием интенсивностей светотдач различных локальных (по длине) участков ЕЛ-слоя датчика. Локальные световые потоки (от люминесцирующих участков ЕЛ-слоя) проникают внутрь оптоволоконна через его боковую цилиндрическую поверхность. Светотдача на локальных участках ЕЛ-слоя происходит от действия на него электрического напряжения

$$U_{\text{lum}} = a_1 U_{\text{con}} + a_2 \sigma \quad (1)$$

при выполнении условия  $U_{\text{lum}} > U_{\text{min}}$ , где  $a_{1,2}$  — управляющий и информативный пере-

даточные коэффициенты РЕЛ-датчика,  $U_{\text{min}}$  — пороговое значение электрического напряжения для начала светотдачи,  $U_{\text{con}}$  — управляющее электрическое напряжение на электродах датчика,  $\sigma$  — напряжение (давление) действующее на оптоволоконный РЕЛ-датчик (рис. 1а). При вдавливаниях в поверхность покрытия одной (рис. 1б) или группы (рис. 1в, 1г) жёстких шаровых частиц моделирование деформационных полей в «зонах возмущения» индикаторного покрытия (рис. 1б – 1г) осуществлено с использованием известного фундаментального решения о вдавливании абсолютно жёсткого шара в упругое полупространство [19]. При этом внутри областей пересечений соседних «зон возмущений» (рис. 1г) использован принцип суперпозиции решений. Для случая вдавливания в индикаторное покрытие одиночной жёсткой шаровой частицы (рис. 1б) некоторой силой  $F_0$  функция напряжений

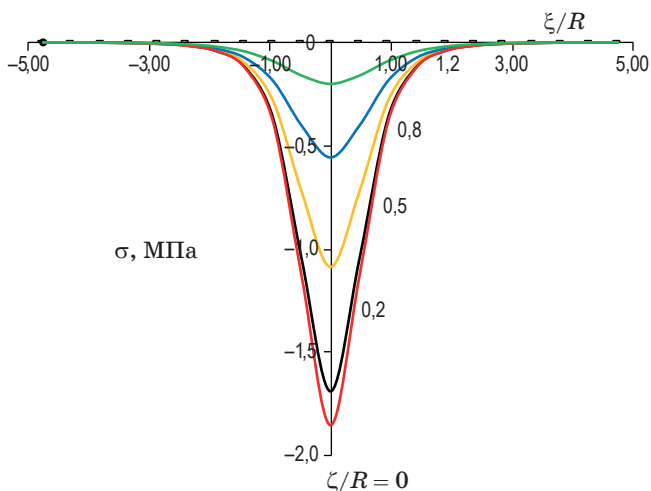
$$\sigma_0(z) = \begin{cases} \sigma_{0(m)}(z - z_{0(m)}), & z \in (z_{(m)\text{min}}; z_{(m)\text{max}}) \\ 0, & z \notin (z_{(m)\text{min}}; z_{(m)\text{max}}) \end{cases} \quad (2)$$

имеет вид последовательности импульсов  $\sigma_{0(m)}(\xi)$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) в локальной системе координат  $\xi \equiv z - z_{0(m)} \in (\xi_{\min}, \xi_{\max})$  с граничными значениями  $\xi_{\max}, \xi_{\min}$ , равными  $\pm R_0$ , где  $R_0$  — радиус «зоны возмущения», граничные значения продольной координаты  $z_{(m)\min} = z_{0(m)} - R_0, z_{(m)\max} = z_{0(m)} + R_0$  с началом ( $z = 0$ ) в центре спирали. Начало ( $\xi = 0$ ) локальной системы координат расположено в центре «дуги» с координатой  $z_{0(m)}$ . Координата  $z_{0(m)}$  и средний радиус «дуги»  $\rho_{0(m)}$  вычисляются

$$z_{0(m)} = \sum_{s=1}^{s_0+m} l_s,$$

$$\rho_{0(m)} = (s_0 + m)\Delta_\rho = \rho_0 + m\Delta_\rho \quad (3)$$

через известные величины:  $l_s$  — длину  $s$ -го витка спирали,  $\Delta_\rho$  — расстояние между витками спирали,  $s_0$  — номер витка спирали, на котором расположена «центральная дуга» ( $m = 0$ ), радиус  $\rho_0 \equiv \rho_{0(0)} = s_0\Delta_\rho$  и координата центра  $z_0 \equiv z_{0(0)}$  «центральной дуги», при этом  $z_0$  — центр «зоны возмущения» от действия силы  $F_0$ . Распределение напряжения  $\sigma$  по различным дугам витков спирали оптоволоконного РЕЛ-датчика дано на рис. 2 для случая вдавливания в покрытие одиночной жёсткой шаровой частицы радиусом  $R = 5$  мм силой 1 Н при модуле Юнга  $E = 4$  МПа и коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,45$  материала (селиконовая резина) покрытия.



**Рис. 2.** Напряжение  $\sigma$  по различным дугам спирали РЕЛ-датчика в «зоне возмущения»,  $\zeta, \xi$  — локальные координаты.

## 2. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВЕННОГО «УДАРА»

Рассмотрим математические модели диагностирования множественного «удара» — одновременного вдавливания в индикаторное покрытие множества жёстких шаровых частиц различными (нормальными к поверхности покрытия) силами  $F_1, F_2, F_3, \dots$  с пересечением «зон возмущений» (рис. 1г) для случая расположения частиц вдоль спирали (оси) встроеного в покрытие оптоволоконного РЕЛ-датчика длиной  $l$ . Предполагаем инвариантность деформационных полей возмущений в соответствующих  $m$ -ых «дугах» РЕЛ-датчика ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) для различных «зон возмущений», т.е. без учёта изменений радиусов и кривизн соответствующих  $m$ -ых «дуг» датчика в разноудалённых от центра спирали «зонах возмущений» и, как следствие, без учёта изменений расстояний между соседними  $k$ -м и  $(k + 1)$ -м импульсами (рис. 4) для различных значений линейной координаты  $z'$  центра «зоны возмущения».

Информативную функцию распределения результирующих напряжений (давлений)  $\sigma^*(z)$ , обусловленную множественным «ударом», вдоль спирали РЕЛ-датчика найдём

$$I(U_{\text{con}}, t) = I_{\text{lum}}(U) \Big|_{U=a_1 U_{\text{con}} + a_2 \sigma^*(z)} \Big|_{z=ct} \quad (4)$$

через измеряемую на выходе из оптоволоконна функцию интенсивности света  $I(U_{\text{con}}, t)$  в различные моменты времени  $t$  по известной функции свечения  $I_{\text{lum}}(U)$  (4), где координата  $z \in (0, l)$ . Выбором значения управляющего электрического напряжения  $U_{\text{con}}$  достигается расположение значения электрического напряжения

$$U_{\text{lum}} = a_1 U_{\text{con}} + a_2 \sigma^*(z) \Big|_{z=ct}$$

на ЕЛ-слое датчика (3) в диапазоне  $(U_{\min}, U_{\max})$  ненасыщенного свечения (рис. 3).

На основе принципа суперпозиции напряжений  $\sigma$  в областях пересечений различных «зон возмущений» множественного «удара» функцию напряжения  $\sigma^*(z)$  выразим в виде интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода

$$\sigma^*(z) = \frac{1}{F_0} \int_0^l \sigma_0(z - \Delta z') q(z') dz', \quad \Delta z' = z' - z_0 \quad (5)$$



через искомую функцию  $q(z)$  плотности распределения сил, действующих, например, на элементарные (с малым радиусом  $R \rightarrow 0$ ) однотипные жёсткие шаровые частицы по длине спирали датчика. Здесь  $\sigma_0(z)$  — известная функция напряжений (2) для одиночного «удара» — вдавливания в точке  $z_0$  поверхности покрытия одиночной частицы силой  $F_0$  с радиусом «зоны возмущения»  $R_0$  с учётом величины радиуса элементарной «зоны возмущения»  $r_0 = (R_0/F_0)dF$  от действия элементарной силы  $dF = q(z)dz$ .

Для случая вдавливания в индикаторное покрытие дискретной группы из  $n_l$  шаровых частиц силами  $F_k$  с линейными координатами  $z_k$  центров пятен контактов искомая функция плотности распределения сил  $q(z)$  вдоль спирали датчика в (5) имеет вид

$$q(z) = \sum_{k=1}^{n_l} F_k \delta(z - z_k), \quad (6)$$

где  $z_k$ ,  $F_k$ ,  $n_l$  — искомые величины ( $k = 1, \dots, n_l$ ),  $\Delta(z)$  — дельта-функция Дирака и, в результате, от решения интегрального уравнения (5) перейдем к решению уравнения

$$\sigma_*(z) = \frac{1}{F_0} \sum_{k=1}^{n_l} F_k \sigma_0(z - \Delta z_k), \quad \Delta z_k = z_k - z_0, \quad (7)$$

относительно искомым величин  $z_k$ ,  $F_k$ ,  $n_l$  с учётом значений радиусов  $r_{0(k)} = (R_0/F_0)F_k$  для полидисперсных «зон возмущений» (рис. 1в, 1г).

Для случая, когда полидисперсные «зоны возмущений» не пересекаются между собой (рис. 1в), шаг спирали  $\Delta_p/R \rightarrow 0$ , тогда «спектр давления»  $f_\sigma(\zeta)$  по длине  $l$  оптоволоконного РЕЛ-датчика находим [17, 18] из решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода

$$I(U_{\text{con}}) = \int_{-\infty}^{\infty} K_1(U_{\text{con}}, \zeta) f_\sigma(\zeta) d\zeta \quad (8)$$

с ядром Фредгольма

$$K_1(U_{\text{con}}, \zeta) = I_0(a_1 U_{\text{con}} + a_2 \zeta)$$

по результатам измерения интегральной (по времени) интенсивности  $I(U_{\text{con}})$  светового потока на выходе из оптоволокна датчика для различных задаваемых значений управля-

ющего электрического напряжения  $U_{\text{con}}$  на электродах датчика. Далее, искомый «спектр сил»  $f_p(F)$  находим как решение другого интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода

$$f_\sigma(\zeta) = \int_{-\infty}^{\infty} K_2(\zeta, F) f_p(F) dF \quad (9)$$

с ядром

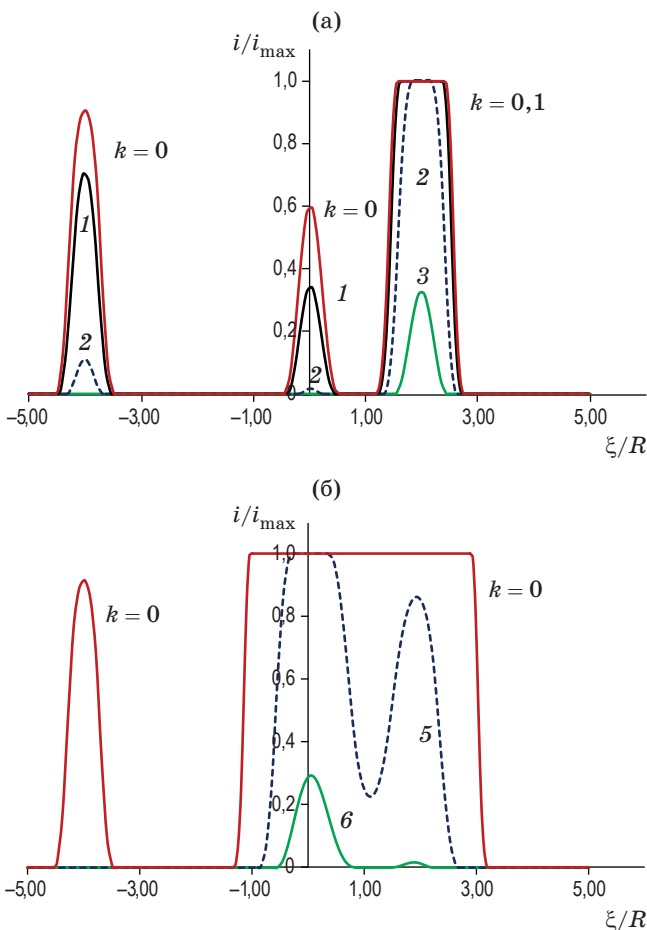
$$K_2(\zeta, F) = \frac{2r(\zeta, F)}{r_0^2(F)} \left| \frac{\partial \zeta}{\partial r} \right|_{r=r(\zeta, F)}^{-1},$$

где  $\zeta = \zeta(F, r)$  — известная зависимость напряжения  $\zeta$  в «зоне возмущений» от величины силы  $F$  и радиальной координаты  $r$  (рис. 2) [19] с учётом, что монотонность функции  $\zeta = \zeta(F, r)$  по координате  $r$  позволяет однозначно выразить радиус  $r = r(\zeta, F)$  через величины  $\zeta$ ,  $F$ . Здесь  $r_0 = r_0(F) \equiv r(\zeta_0, F)$  — радиус «зоны возмущения», на границе которой при  $r = r_0(F)$  имеем некоторое пренебрежимо малое (заданное) значение напряжения  $\zeta_0 \approx 0$ .

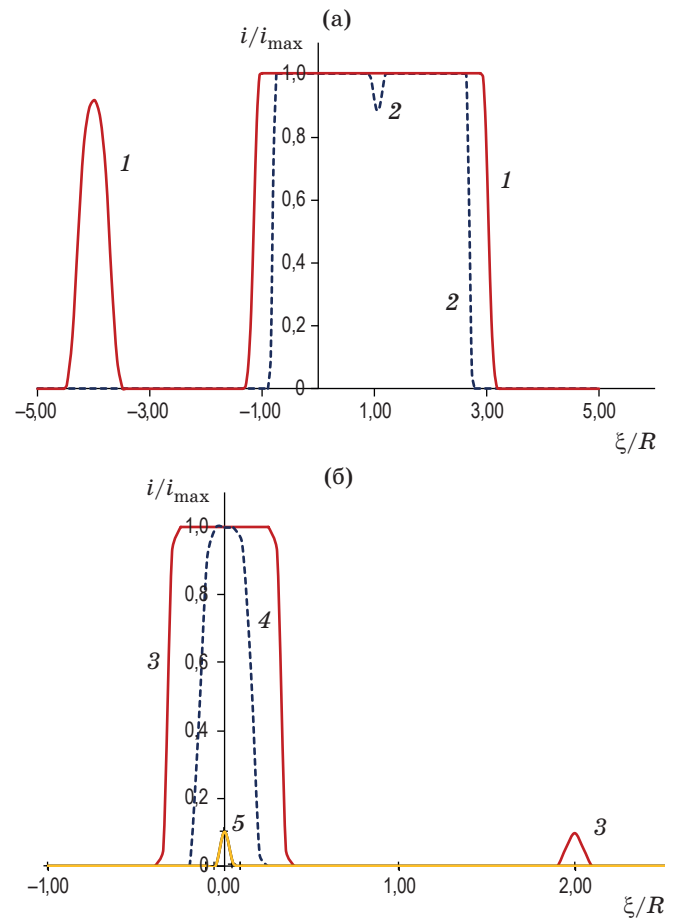
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для численного моделирования используем «S-образную» зависимость  $I_{\text{lum}}(U)$ , для которой начало свечения имеем при  $U_{\text{lum}} = U_{\text{min}}$ , насыщенное свечение с интенсивностью  $I_{\text{lum}} = I_{\text{max}}$  при  $U_{\text{lum}} > U_{\text{max}}$ , например, со значениями  $U_{\text{min}} = 3$  В,  $U_{\text{max}} = 6$  В. Результаты вычислений нормированных (относительных) значений погонной (плотности) распределения интенсивности  $i/i_{\text{max}}$  светоотдачи ЕЛ-слоя датчика на  $k$ -х «дугах» различных витков спирали датчика в тройной «зоне возмущения» индикаторного покрытия даны на рис. 3. Расположение  $k$ -х «дуг» по радиальной координате задано через отклонения  $\Delta r_k = k\Delta_p$  от «центральной дуги», над которой расположены центры всех трёх «зон возмущений», где шаг (расстояние между витками) спирали  $\Delta_p = 0,2R$ , номер витка  $k = 0, 1, 2, \dots$ , значение  $k = 0$  соответствует витку со средним радиусом 0,2 м. Результаты численного моделирования на рис. 3 получены при различных силах вдавливания  $F_{1,2,3}$  трёх жёстких шаровых частиц:  $F_1 = 0,1$  Н,  $F_2 = 0,2$  Н,  $F_3 = 0,12$  Н без пересечения «зон возмущений» (рис. 3а),  $F_1 = 1$  Н,  $F_2 = 0,2$  Н,  $F_3 = 1,2$  Н с пересечением «зон

возмущений» (рис. 3б), относительные взаимные расположения центров трёх «зон возмущений»  $\Delta_{31} \equiv z_3 - z_1 = -4R$ ,  $\Delta_{21} \equiv z_2 - z_1 = 2R$ , радиус шаровых частиц  $R = 5$  мм, управляющее электрическое напряжение  $U_{\text{con}} = 0$  В. Управляющее электрическое напряжение  $U_{\text{con}}$  позволяет изменять, в частности, уменьшать радиус «зоны люминесценции» (внутри «зоны возмущения») индикаторного покрытия — области, в которой происходит светоотдача EL-слоя PЕL-датчика (рис. 4). В результате установки на управляющих электродах датчика соответствующего значения электрического напряжения  $U_{\text{con}}$  можно получить для каждой «дуги» датчика непересечение «зон люминесценции» от различных частиц (с силами  $F_k$ ,  $k = 1, \dots, n_l$ ) даже для случаев пересечения их «зон возмущений», что упроща-



**Рис. 3.** Интенсивности  $i/i_{\text{max}}$  светоотдачи EL-слоя датчика на  $k$ -х «дугах» различных витков спирали датчика для случаев без пересечения (а) и с пересечением (б) «зон возмущений» от вдавливания силами  $F_{1,2,3}$  трёх шаровых частиц.



**Рис. 4.** Интенсивности  $i/i_{\text{max}}$  светоотдачи EL-слоя датчика на «центральной» ( $m = 0$ ) «дуге» спирали датчика от вдавливания силами  $F_{1,2,3}$  трёх шаровых частиц при значениях управляющего электрического напряжения  $U_{\text{упр}} = 0$  В (1),  $-2$  В (2),  $-8$  В (3),  $-10$  В (4),  $-11$  В (5).

ет диагностику и локацию  $n_l$  «ударов» по индикаторному покрытию. Здесь индикаторное покрытие функционирует как «фильтр ударов», т.е. индикаторное покрытие диагностирует лишь «большие удары» из установленного диапазона значений  $P > P_{\text{min}}$  и «отфильтровывает» (не учитывает) малые «паразитные удары» ( $P < P_{\text{min}}$ ) ниже этого диапазона значений. Величина  $P_{\text{min}} = P(\sigma_{0\text{min}})$ , где значение  $\sigma_{0\text{min}} = (U_{\text{min}} - a_1 U_{\text{con}})/a_2$  рассчитывается через известные параметры датчика  $U_{\text{min}}$ ,  $a_{1,2}$  и установленное значение управляющего электрического напряжения  $U_{\text{con}}$ , функция  $P(\sigma_0)$  — обратная известной функции  $\sigma_0 = \sigma_0(P)$  в виде однозначной зависимости максимального значения напряжения (давления) в центре «зоны возмущения»  $\sigma_0$  от действия силы  $P$  (рис. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен множественный «удар» — одно-временное вдавливание в индикаторное покрытие со встроенным оптоволоконным PEL-датчиком группы жёстких шаровых частиц различными по величине силами. Выявлено, что для общего случая с пересечением полидисперсных «зон возмущений» задача нахождения функции  $q(z)$  плотности распределения сил сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода (5). Для частного случая с непересечением «зон возмущений» задача нахождения «спектра сил»  $f_p(F)$  сводится к последовательному решению двух интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода (8), (9) по результатам измерения интегральной интенсивности  $I(U_{\text{con}})$  светового потока на выходе из оптоволоконного датчика. Исследована возможность регулирования рабочего диапазона измеряемых значений «ударов» жёстких шаровых частиц по поверхности индикаторного полимерного покрытия посредством изменения значения управляющего электрического напряжения  $U_{\text{con}}$  на электродах PEL-датчика. Выявлено, что в результате такого регулирования изменяется (уменьшается или увеличивается) радиус «зоны люминесценции» — области, в которой происходит светоотдача EL-слоя PEL-датчика внутри «зоны возмущения» индикаторного покрытия и, как следствие, индикаторное покрытие функционирует как «фильтр ударов», диагностирующая

лишь «большие удары» из установленного диапазона значений и «отфильтровывая» (не учитывая) малые «паразитные удары» ниже этого диапазона значений. Представлены результаты численного моделирования распределений интенсивности  $i/i_{\text{max}}$  светоотдачи EL-слоя датчика на различных «дугах» витков спирали при множественном (тройном) «ударе» — вдавливаниях в индикаторное покрытие трёх жёстких шаровых частиц без пересечения (рис. 3а) и с пересечением (рис. 3б, рис. 4) их деформационных «зон возмущений» внутри покрытия.

Уточнение математической модели индикаторного покрытия (рис. 1) может быть осуществлено численными методами механики композитов через учёт динамических особенностей внешнего воздействия и уточнённый учёт структурной неоднородности системы «покрытие/датчик», например, с использованием пакета конечно-элементного анализа ANSYS [20]. В качестве протяжённого чувствительного элемента (вместо оптоволоконного PEL-датчика) в индикаторном покрытии может быть использован оптоволоконный датчик с распределённой брэгговской решёткой [21, 22].

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2020-0026).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Wang X., Sun F., Yin G. et al. Tactile-sensing based on flexible PVDF nanofibers via electrospinning: A review // *Sensors*. 2018. № 2. P. 1–16.
2. Lu K., Huang W., Guo J. et al. Ultra-sensitive strain sensor based on flexible poly(vinylidene fluoride) piezoelectric film // *Nanoscale Res Lett*. 2018. № 1. P. 1–6.
3. Koiva R., Zenker M., Schurmann C. et al. A highly sensitive 3D-shaped tactile sensor // *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*; Wollongong, Australia, 9–12 July 2013. P. 1084–1089.
4. Yousef H., Boukallel M., Althoefer K. Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics — A review // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011. V. 167. P. 171–187.
5. Liang G., Wang Y., Mei D. et al. Flexible capacitive tactile sensor array with truncated pyramids as dielectric layer for three-axis force measurement // *J. Microelectromech. Syst.* 2015. V. 24. P. 1510–1519.
6. Фегенбаум Ю.М., Дубинский С.В., Божевалов Д.Г. и др. Обеспечение прочности композитных авиационных конструкций с учетом случайных эксплуатационных ударных воздействий. М.: Техносфера, 2018, 506 с.
7. Liang G., Wang Y., Mei D. et al. Flexible capacitive tactile sensor array with truncated pyramids as dielectric layer for three-axis force measurement // *J. Microelectromech. Syst.* 2015. V. 24. P. 1510–1519.
8. Ramadan K.S.E., Sameoto D., Evoy S. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers // *Smart. Mater. Struct.* 2014. V. 23. P. 033001.

9. *Seminara L., Pinna L., Valle M. et al.* Piezoelectric polymer transducer arrays for flexible tactile sensors // *IEEE Sens. J.* 2013. V. 13. P. 4022–4029.
10. *Hamdi O., Mighri F., Rodrigue D.* Piezoelectric cellular polymer films: Fabrication, properties and applications (Review) // *AIMS Materials Science.* 2018. № 5. P. 845–869.
11. *Krauya U.E., Yansons Y.L.* Mechanoluminescence of composite materials: Methods, equipment and results of researches. Riga: Zinatne, 1990. 152 p.
12. *Jia Y., Tian X., Wu Z. et al.* Novel mechano-luminescent sensors based on piezoelectric/electroluminescent composites // *Sensors.* 2011. № 4. P. 3962–3969.
13. *Sundaresan M.J., Ghoshal A., Schulz M.J.* Sensor array system // Patent US 6399939 B1. 2002.
14. *Ветров А.А., Сергушичев А.Н.* Гибридный вибродатчик с преобразованием пьезоэлектрического сигнала в модуляцию оптического излучения и передачей его по оптоволокну // *Оптический журнал.* 2019. № 12. P. 53–58.
15. *Агафонова Д.С., Сидоров А.И.* Влияние геометрических факторов на эффективность регистрации электрической искры волоконным датчиком с люминесцентной оболочкой // *Оптический журнал.* 2020. № 2. P. 76–81.
16. *Паньков А.А.* Сенсорная система // Патент РФ № 2698958. 2019.
17. *Паньков А.А.* Волоконно-оптический датчик давления // Патент РФ № 2630537. 2017.
18. *Pan'kov A.A.* Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields // *Sensors and Actuators A: Physical.* 2019. V. 288. P. 171–176.
19. *Белоус П.А.* Осесимметричные задачи теории упругости. Одесса: ОГПУ, 2000. 183 с.
20. *Паньков А.А., Писарев П.В.* Численное моделирование электроупругих полей в поверхностном пьезоэлектролюминесцентном оптоволоконном датчике для диагностики деформирования композитных пластин // *Вестник ПНИПУ. Механика.* 2020. № 2. С. 64–77. [Перевод: *Pan'kov A.A., Pisarev P.V.* Numerical modeling of electroelastic fields in the surface piezoelectroluminescent optical fibersensor to diagnose deformation of composite plates. *PNRPU Mechanics Bulletin.* 2020. № 2. P. 64–77.]
21. *Jian Z.* Распределённая система датчиков вибраций, использующая сигналы, отраженные слабыми волоконными брэгговскими решетками // *Оптический журнал.* 2018. № 7. С. 76–83.
22. *Паньков А.А.* Криволинейный оптоволоконный датчик деформаций с распределенной брэгговской решеткой в структуре полимерного композита // *Оптический журнал.* 2020. № 8. С. 3–11.