

УДК 622.831:620.171.5

Янина Татьяна Ивановна, доцент, канд. тех. наук  
Гумённый Антон Сергеевич, ст. преп., канд. тех. наук  
(КузГТУ, г. Кемерово)

Yanina Tatyana, associate professor, Cand.Tech.Sci.  
Gumyonny Anton Sergeyeovich, Art. преп., Cand.Tech.Sci.  
(KuzSTU, Kemerovo)

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ СПЛОШНОГО ФОТОУПРУГОГО ДАТЧИКА В УСЛОВИЯХ ПОЛНОГО СЦЕПЛЕНИЯ СО СТЕНКАМИ СКВАЖИНЫ**

### **SOLID PHOTOELASTIC SENSOR PHYSICAL FOUNDATIONS IN CASE OF FULL ADHESION TO THE BOREHOLE SIDES**

#### Аннотация

Рассмотрены физические особенности работы сплошного фотоупругого датчика в условиях полного сцепления со стенками скважины, когда датчик жестко связан со стенками скважины с помощью клея. Проведен лабораторный эксперимент, сделаны выводы о целесообразности жесткого закрепления сплошного фотоупругого датчика в скважине при подземной добыче полезных ископаемых для обеспечения непрерывного контроля напряженного состояния массива горных пород.

#### Abstract

The physical features of the solid in the photoelastic sensor full coupling conditions with the borehole sides when the sensor is rigidly connected with the sides of the borehole with an adhesive. The laboratory experiment, conclusions about the appropriateness of fixing the hard solid photoelastic sensor in the borehole in underground mining operations to ensure continuous monitoring of the stress state of the rock mass.

Доля подземной разработки в общем объеме добычи каменных углей с ростом глубины горных работ в среднесрочной перспективе остается значительной. В связи с этим непрерывный контроль за изменением напряжённого состояния массива горных пород [1], разработка аппаратуры на современных элементах и методик её применения при решении задач управления состоянием массива, разработки прогрессивных паспортов крепления, прогноза динамических проявлений горного давления и др. является актуальной задачей.

В результате проведенных исследований установлено [2], что работа сплошного фотоупругого датчика существенно зависит от условий его

взаимодействия со стенками скважины, в которой он установлен. Наиболее интересными условиями с практической точки зрения являются полное проскальзывание и полное сцепление. В данной статье рассматривается условие взаимодействия сплошного фотоупругого датчика со стенками скважины в условиях полного сцепления.

Условие взаимодействия сплошного фотоупругого датчика со стенками скважины «полное сцепление» в теории предполагает установку датчика в скважину с помощью клея, на практике для этого используется эпоксидные смолы. Полное проскальзывание характеризуется следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned}u_{r1} &= u_r, \\ \sigma_{r1} &= \sigma_r, \\ \tau_{r\theta 1} &= \tau_{r\theta}, \\ v_{\theta 1} &= v_{\theta},\end{aligned}\tag{1}$$

где  $u_{r1}$  – радиальное смещение точек контура сплошного фотоупругого датчика,  $u_r$  – радиальное смещение точек контура скважины,  $\sigma_{r1}$  – радиальные напряжения в сплошном фотоупругом датчике,  $\sigma_r$  – радиальные напряжения в материале скважины,  $\tau_{r\theta 1}$  – касательные напряжения в сплошном фотоупругом датчике,  $\tau_{r\theta}$  – касательные напряжения в материале скважины,  $v_{\theta 1}$  – касательные смещения точек контура сплошного фотоупругого датчика,  $v_{\theta}$  – касательные смещения точек контура скважины.

Используя граничные условия (1) для случая полного сцепления были получены выражения, позволяющие определять главные напряжения:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{a_1}{2}(p+q) + \frac{b_1(p-q)}{4} \\ \sigma_2 &= \frac{a_1}{2}(p+q) - \frac{b_1(p-q)}{4},\end{aligned}\tag{2}$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – главные напряжения,  $p, q$  – равномерно распределенная нагрузка во взаимно перпендикулярных плоскостях,  $a_1, b_1$  – коэффициенты зависящие от упругих постоянных материала датчика и породы.

Для случая плоского напряженного состояния условиях полного сцепления коэффициенты  $a_1, b_1$  определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}a_1 &= \frac{2E_1}{(E_1(1+\nu) + E(1-\nu_1))} \\ b_1 &= \frac{8E_1}{(E_1(3-\nu) + E(1+\nu_1))},\end{aligned}\tag{3}$$

где  $E_1, E$  – модуль упругости материала фотоупругого датчика и породы соответственно,  $\nu_1, \nu$  – коэффициент Пуассона материала фотоупругого датчика и породы соответственно.

Используя (3) и известное выражение для определения разности хода оптических лучей в сплошном фотоупругом датчике:

$$\Delta = (\sigma_1 - \sigma_2)Cd \quad (4)$$

где  $C$  - оптическая постоянная материала сплошного фотоупругого датчика по напряжениям,  $d$  – толщина сплошного фотоупругого датчика.

Получаем выражение для определения разности хода оптических лучей в сплошном фотоупругом датчике в условиях взаимодействия датчика со стенками скважины полное проскальзывание:

$$\Delta = Cdb_1 \frac{(p - q)}{2} \quad (5)$$

Образование интерференционной картины в датчике можно представить, как отражение лучей от передней и задней стенки датчика (рис.1).

В соответствии с рис.1 отраженные от передней и задней поверхности стеклянного датчика световые лучи интерферируют между собой.

Выражение для расчета разности хода лучей имеет вид:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \mp \lambda / 2, \quad (6)$$

где  $n = n_0 + n'$  – показатель преломления датчика,  $n'$  – изменение показателя преломления, обусловленное изменением нагрузки;  $\lambda/2$  – изменение разности хода при отражении луча  $SO$  от оптически более плотной среды.

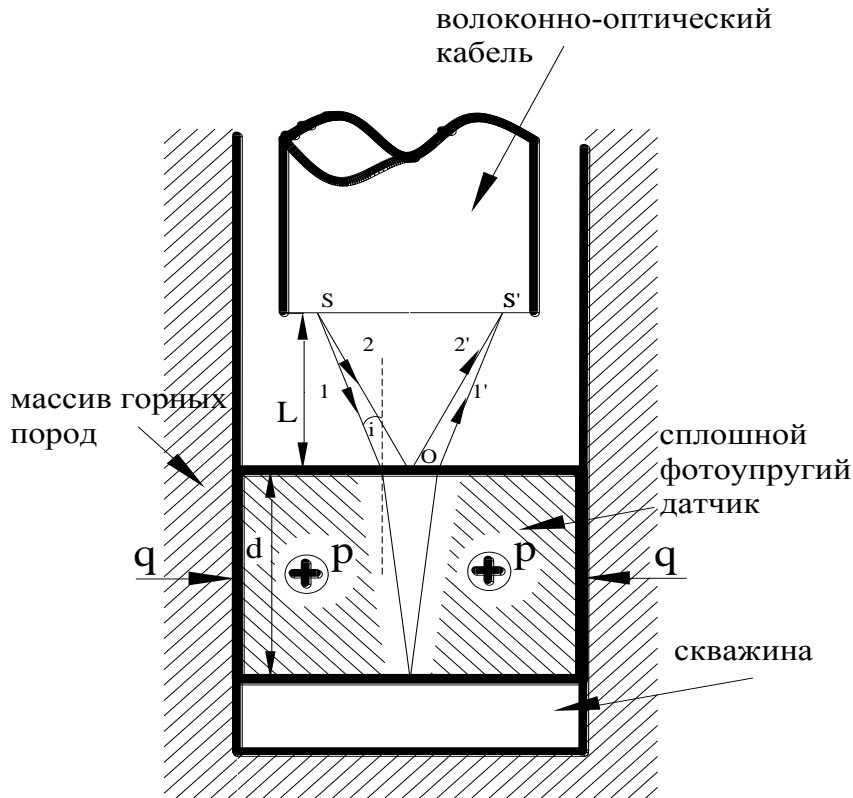


Рис.1. Схема к расчету оптической разности хода при прохождении луча через сплошной фотоупругий датчик  
Для темного интерференционного кольца разность хода лучей равна:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

где  $m$  – порядковый номер интерференционного кольца.

С учетом того, что для волоконно-оптического кабеля имеем малые углы падения луча на датчик  $\sin(i) \approx \text{tg}(i) = r/2L$ , поэтому приравниваем выражения 6 и 7, получаем:

$$2d \sqrt{n^2 - \frac{r^2}{4L^2}} + \frac{\lambda}{2} = m\lambda + \frac{\lambda}{2}, \quad (8)$$

где  $L$  – расстояние от источника сигнала до датчика,  $r$  – радиус интерференционного кольца.

Упростив выражение (8) и выразив радиус, получим зависимость радиуса определенного интерференционного кольца  $m$  от ряда констант и показателя преломления:

$$r_m = \sqrt{4n^2 L^2 - \frac{m^2 \lambda^2 L^2}{d^2}}. \quad (9)$$

Определим зависимость изменением показателя преломления от разности приложенных к датчику нагрузок ( $p - q$ ).

Для центральных интерференционных колец с максимальной интенсивностью, учитывая, что в выражении (6)  $\sin(i)$  несоизмеримо мал по сравнению с  $n$ , так же несущественно значение  $\lambda/2$ , получаем:

$$\Delta = 2dn \cdot c \quad (10)$$

Связь между механическими напряжениями и параметрами интерференционной картины, полученной с помощью фотоупругого датчика, описывается соотношением (10). Из (5) и (10) получим:

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta = 2dn_0 + 2dn' = 2dn_0 + Cdb_1 \frac{(p - q)}{2} \quad (11)$$

где  $\Delta$  - общая оптическая разность хода лучей,  $\Delta_0$  - оптическая разность хода лучей без нагрузки на датчик,  $\Delta'$  - оптическая разность хода лучей, обусловленная изменением нагрузки.

Для получения зависимости полного показателя преломления от равномерно распределенной нагрузки, приложенной к сплошному фотоупругому датчику, выразим приращение показателя преломления из (11) и прибавим начальный показатель преломления  $n_0$ :

$$n = n_0 + \frac{Cb_1}{4}(p - q). \quad (12)$$

Подставляя (12) в формулу, определяющую зависимость радиуса интерференционного кольца от показателя преломления (9), получим:

$$r_m = \sqrt{4 \left( n_0 + \frac{Cb_1}{4}(p - q) \right)^2 L^2 - \frac{m^2 \lambda^2 L^2}{d^2}}. \quad (13)$$

Выражение (13) однозначно определяет зависимость радиуса определенного интерференционного кольца от приложенной нагрузки, это значит, что интерференционная картина будет меняться в зависимости от механических напряжений, приложенный к датчику, что делает возможным использование сплошных фотоупругих датчиков в системах непрерывного контроля напряженного состояния массива горных пород.

Из формулы (13) выразим зависимость распределенной нагрузки  $p-q$ :

$$(p - q) = \frac{1}{Cb_1} \left( \sqrt{\frac{r_m^2 d^2 + m^2 \lambda^2 L^2}{4d^2 L^2}} - n_0 \right). \quad (14)$$

Выражение (14) позволяет определять равномерно распределенную нагрузку на сплошной фотоупругий датчик в зависимости от радиуса  $m$ -го интерференционного кольца.

### Лабораторная установка

Для проведения эксперимента была использована лабораторная установка, позволяющая смоделировать плоское напряженное состояние образца горной породы (рис.2). Лабораторная установка состоит из электромеханического пресса КСИМ-40, управляемого с помощью ПК, гелий-неонового лазера, экрана для наблюдений интерференционной картины в отраженном свете, оптической оснастки и образца горной породы с установленным в скважине сплошным фотоупругим датчиком.

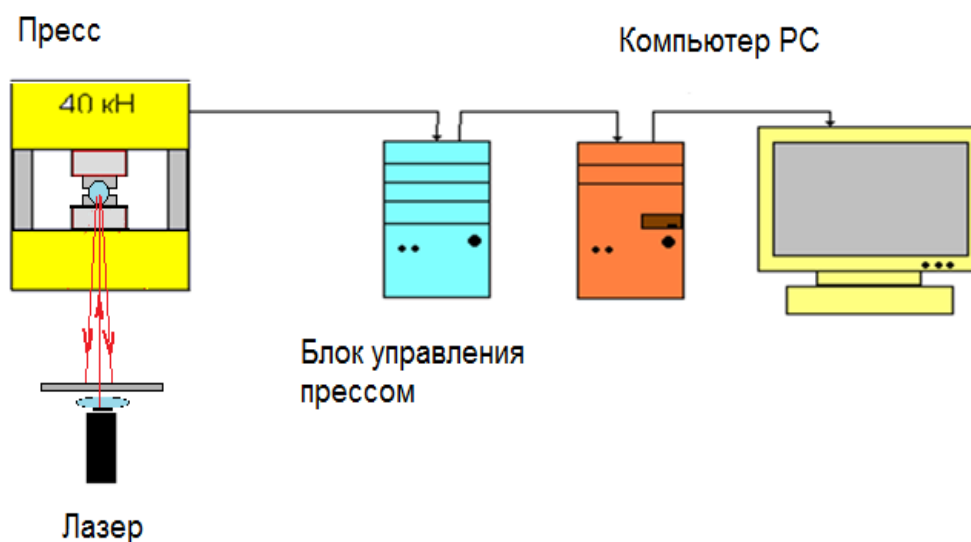


Рис.2. Схема лабораторной установки

В качестве образца горной породы использовались кубы из песчано-цементной смеси (рис.3) с различными размерами. Для установки сплошных фотоупругих датчиков в образцах были сделаны скважины глубиной 120 мм и диаметров 40мм. Затем в скважины были установлены сплошные фотоупругие датчики, зазор между датчиком и стенками скважины был заполнен эпоксидным клеем для соблюдения условия «полное сцепление». Обязательным условием получения качественной интерференционной картины является наличие зеркального слоя на одном (заднем) торце сплошного фотоупругого датчика.



Рис.3. Образцы из песчано-цементной смеси

**Экспериментальная проверка работы сплошного фотоупругого датчика в условиях взаимодействия со стенками скважины «полное сцепление»**

Образцы из песчано-цементной смеси с установленными сплошными фотоупругими датчиками, вклеенными с помощью эпоксидной смолы для соблюдения условия «полного сцепления», располагались между инденторами прессы, оптический сигнал от гелий-неонового лазера направлялся на датчик, отражался от передней и задней стенок, после чего свет образовывал интерференционную картину, которая отображалась на экране. С увеличением нагрузки на образец фиксировалось изменение интерференционной картины с помощью цифровой видеокамеры и визуально.

Важным результатом эксперимента является лабораторное подтверждение теоретического вывода о том, что в условиях взаимодействия сплошного фотоупругого датчика со стенками скважины «полное сцепление», интерференционная картинная, полученная от датчика, имеет вид концентрических овалов (рис.4), радиус которых зависит от главных напряжений, приложенных к сплошному фотоупругому датчику.



Рис.4. Интерференционная картина от сплошного фотоупругого датчика в условиях «полное сцепление»

В ходе эксперимента нагрузка на образец из песчано-цементной смеси изменялась от нуля до 2,5 МПа, при этом фиксировался радиус ближайшего к центру интерференционного кольца. Полученные данные приведены на рис. 5.

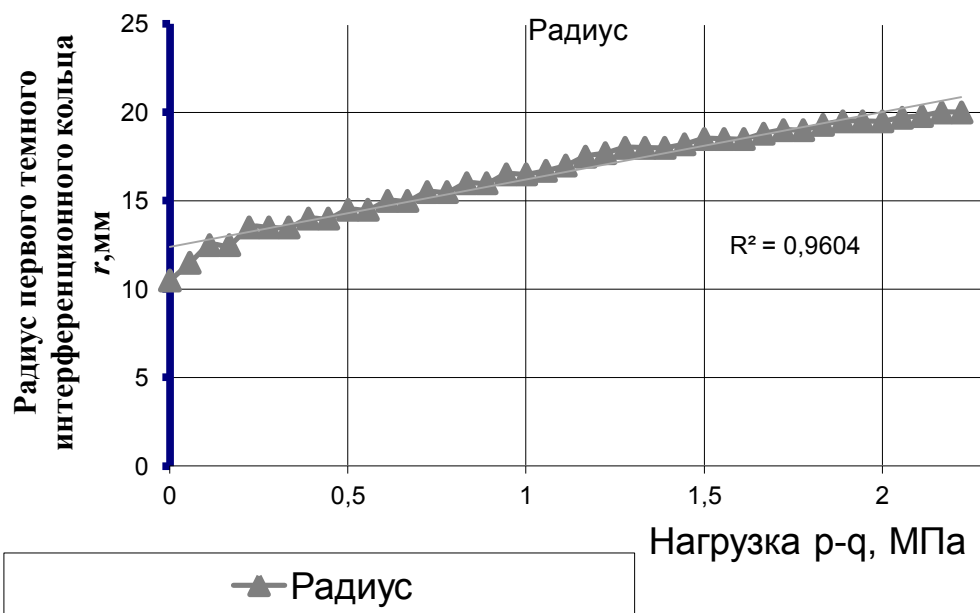


Рис.5. Зависимость радиуса интерференционных колец от нагрузки на фотоупругий датчик в условиях «полное сцепление»

Экспериментальные данные подтверждают теоретический вывод о том, что при условии взаимодействия сплошного фотоупругого датчика со стенками скважины «полное сцепление» интерференционная картина имеет вид концентрических овалов, радиус которых зависит от главных напряжений, приложенных к образцам.

### Выводы



Условие установки сплошного фотоупругого датчика «полное сцепление», позволяет использовать несложный математический аппарат для косвенного расчета нагрузки на основе данных о радиусе интерференционных колец. Кроме этого условие установки сплошного фотоупругого датчика «полное сцепление» позволяет измерять и отрицательные (растягивающие) напряжения, что является очень полезным в условиях разработки пластов со сложными горно-геологическими условиями.

#### **Список литературы**

1. Пат. 2421615 Российская Федерация, МПК Е 21С 39/00. Устройство непрерывного контроля напряженного состояния массива горных пород / Гуменный А. С., Дырдин В. В., Янина Т. И. ; заявитель и патентообладатель Кузбас. гос. техн. ун–т. –№ 2010105501/03 ; заявл. 15.02.2010 ; опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17/2011.
2. Гуменный, А. С. Оценка напряжений в краевых зонах массива горных пород с помощью сплошного фотоупругого датчика / А. С. Гуменный В. В. Дырдин, Т. И. Янина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 11. – С. 103–107.