

ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР / ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ /
TECHNICAL SCIENCES

DOI 10.54596/2958-0048-2024-4-158-167

ӘОЖ 620.179.18

ҒТАМА 27.35.33

**ДЕФОРМАЦИЯ КЕЗІНДЕГІ ОПТИКАЛЫҚ ТАЛШЫҚТАҒЫ ОПТИКАЛЫҚ-
МЕХАНИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІҢ ФИЗИКА-МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ**

Аубакирова Б.Б.^{1*}, Мехтиев А.Д.², Алькина А.Д.², Аймагамбетова Р.Ж.³

^{1*}*«Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КеАҚ
Петропавл, Қазақстан*

²*Қарағанды техникалық Әбілқас Сағынов атындағы университеті,
Қарағанды, Қазақстан*

³*Қазақстан Республикасы Сауда және интеграция министрлігі Техникалық реттеу
және метрология комитетінің Қазақстан стандарттау және метрология
институты, Астана, Қазақстан*

**Хат-хабар үшін автор: aubakirova_68@mail.ru*

Аңдатпа

Бұл мақалада бірегей және техникалық тұрғыдан күрделі ғимараттар мен құрылыстардың салынуы, қауіпсіздікке және техникалық-экономикалық тәуекелдерге қойылатын талаптардың жоғарылауымен байланысты болғандықтан, бұл объектілерге ғылыми-техникалық қолдау көрсету қажет екені талқыланады.

Негізі геометриялық және толқындық оптиканың, физика саласының белгілі заңдары, сондай-ақ жарық толқынының оптикалық талшықпен өзара әрекеттесуіне байланысты оптикалық-электрлік процестердің феноменологиялық теориясы болып табылады.

Кілт сөздер: физика-математикалық модельдің қасиеттері, оптикалық талшық(ОТ), оптикалық талшықтың сынуы, Гук заңы.

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ ПРИ ЕГО ДЕФОРМАЦИИ**

Аубакирова Б.Б.^{1*}, Мехтиев А.Д.², Алькина А.Д.², Аймагамбетова Р.Ж.³

^{1*}*НАО «Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева»
Петропавловск, Казахстан*

²*Қарағандың техникалық университеті Абылқаса Сағинова
Қарағанда, Казахстан*

³*Казахстанский институт стандартизации и метрологии Комитета технического
регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции РК
Астана, Казахстан*

**Автор для корреспонденции: aubakirova_68@mail.ru*

Аннотация

Данная статья посвящена строительству уникальных и технически сложных зданий и сооружений, что связано с повышенными требованиями по словам к безопасности и технико-экономическими рисками, требующими научно-технического сопровождения этих объектов.

Основой являются известные законы геометрической и волновой оптики, а также феноменологическая теория по словам ученого оптико-электрических процессов, связанных со взаимодействием световой волны с оптическим волокном.

Ключевые слова: свойств физико-математическая модель, оптическое волокно (ОВ), коэффициент преломления, деформация.

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF OPTICAL-MECHANICAL PROCESSES IN AN OPTICAL FIBER DURING ITS DEFORMATION

Aubakirova B.B.^{1*}, Mekhtiyev A.D.², Alkina A.D.², Aimagambetova R.Zh.³

^{1*}*Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC
Petropavlovsk, Kazakhstan*

²*Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan*

³*Kazakhstan Institute of Standardization and Metrology of the Committee for Technical
Regulation and Metrology of the Ministry of Trade and Integration of the Republic
of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan*

**Corresponding author: aubakirova_68@mail.ru*

Abstract

This article is devoted to the construction of unique and technically complex buildings and structures, which is associated with increased requirements in the words of for safety and technical and economic risks that require scientific and technical support for these objects.

The basis is the well-known laws of geometric and wave optics, as well as the phenomenological theory in the words of the scientist of optical-electrical processes associated with the interaction of a light wave with an optical fiber.

Keywords: properties of the physical and mathematical model, optical fiber (OF), refraction of OF, Hooke's law.

Введение

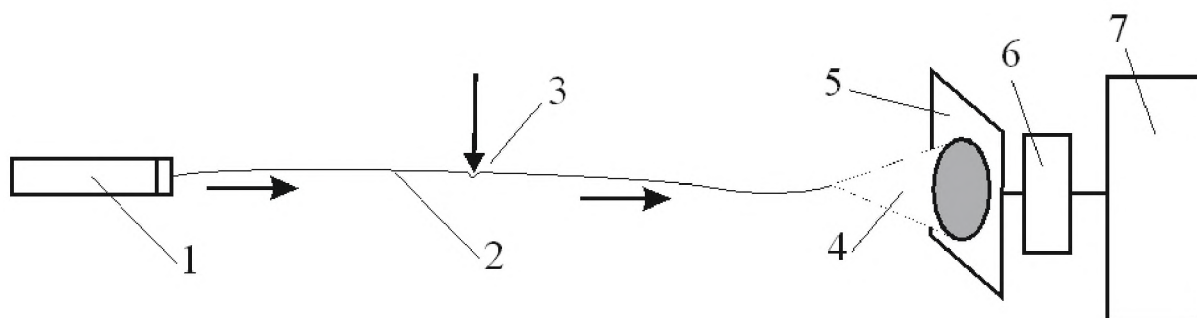
Бақылау-өлшеу құрылғылары мен аспаптары (датчиктер, КОМПЬЮТЕРГЕ арналған бағдарламалық-аппараттық қамтамасыз ету элементтері, датчиктер және т.б.) және соңғы 10-15 жылда талшықты-оптикалық материалдарға (ОМ) негізделген автоматтандырылған жылдам әрекет ететін функционалдық элементтер мен схемалардың көмегімен технологиялық мониторинг жүйелері қазіргі заманғы өнеркәсіптің бірқатар салалары үшін айтарлықтай қолданбалы ғылыми және техникалық қызығушылық тудырады (лазерлік техника; микроэлектроника және радиоэлектроника; тау-кен технологиялары және металлургия; бұзбайтын бақылау технологиялары және материалдардың кедергісі; машина жасау, әуе құрылысы және зымыран құрылысы және т.б.), ең алдымен, ұзақ ауқымды объектілердің (платиналар, көпірлер, үйінділер, тау-кен кен орындарының) техникалық жай-күйін (деформациялар мен механикалық кернеулер параметрлерін) бақылау кезінде жоғары дәлдіктегі электрондық өлшеу нәтижелерін (көбінесе нақты уақыт режимінде және қашықтан қол жеткізумен) сапалы ұйымдастыру тұрғысынан мансап және т.б.) [1]. Осындай ғалымдардың дәріптері бойынша (Семенов А.С.) [3] Талшықты-оптикалық бақылау-өлшеу жүйелерінің артықшылықтары бұрыннан белгілі: оларға электромагниттік кедергілер (Шу) әсер етпейді; олар жоғары электрофизикалық (сызықтық емес релаксациялық поляризация және өткізгіштік), оптикалық (сызықтық емес электро-оптикалық құбылыстар) және метрологиялық сипаттамаларға ие; үлестірілген және квази-үлестірілген сезімталдыққа ие; жарылғыш ортада жұмыс істей алады; өлшеу арналары айтарлықтай ұзындыққа ие, талшықты-

оптикалық өткізгіштердің құны мысқа қарағанда төмен; жыл сайын оптикалық талшықтың құны төмендейді және оның қасиеттері жақсарады.

Ашық әдіспен мәрмәр өндіру қауіпсіздігін арттыру саласында айтарлықтай елеулі ғылыми жұмыс жүргізілді [6]. Талшықты-оптикалық датчиктер әртүрлі салаларда, атап айтқанда деформация мен механикалық кернеулерді өлшеу үшін кеңінен қолданылады [7]. Бұл мақалада оны жасау үшін белгілі теориялық негіздер қолданылады оптикалық талшықтағы оптикалық-механикалық процестердің физика-математикалық моделі оның деформациясы кезінде [8, 9]. Датчиктердің әртүрлі түрлерін құрудың теориялық негіздері жеткілікті [10, 11], бірақ темірбетон сәулесінің ішінде орналасқан оптикалық талшықтың деформациясын бақылаудың шешілмеген мәселелері бар. Әртүрлі физикалық параметрлерді өлшеу үшін оптикалық талшықты қарастыратын бірқатар ғылыми жұмыстар бар, сонымен қатар зерттеудің теориялық бөлігі [12, 13] ұсынылған, бірақ оның деформациясы кезінде оптикалық талшық арқылы өтетін оптикалық толқынның қасиеттерінің өзгеруі толық қарастырылмаған. Мысалы, авторлар оптикалық талшық температурасының өзгеруін есепке алмады, бұл өлшеу дәлдігін төмендететін немесе бақылау жүйесін бұзатын кедергілерді тудырады. Ұсынылған схема үшін маңызды мәселе-бір режимді талшық температураның әсеріне өте сезімтал. Қоршаған орта температурасының $0,5^{\circ}\text{C}$ өзгеруі жарық толқынының ОВ ішінде таралу фазасының өзгеруіне әкеледі, нәтижесінде кедергілер пайда болады және алынған өлшеу деректері бұрмаланады. [14, 15] мақалаларында оптикалық талшықтың деформациясы кезінде талшықты-оптикалық датчиктердің жұмысының теориялық негізі көрсетілген. Бұл мақалада оптикалық талшықтағы оптикалық-механикалық процестердің физика-математикалық моделін деформациялау кезінде, оптикалық талшық темірбетон сәулесінің ішінде болған кезде дамытудың теориялық негізін дамыту ұсынылған. Оптикалық-механикалық процестердің физика-математикалық моделі монолитті темірбетон фундаменттерінің техникалық жағдайын бақылау үшін құрылыс саласында қолдануға болатын талшықты-оптикалық датчиктерді одан әрі дамыту үшін қажет.

Зерттеу материалдары мен әдістері

1-суретте сенсор ретінде пайдалануға болатын оптикалық талшықтың жұмысының мәнін түсіндіретін жеңілдетілген құрылымдық диаграмма көрсетілген. Егер оптикалық талшық монолитті темірбетон іргетастарының ішіне орналастырылса, онда оның деформациясын бақылауға болады. Жұмыстың мәнін осылай түсіндіруге болады, импульстік режимде жұмыс істейтін когерентті жартылай өткізгіш лазер 1 сәулелену көзі ретінде қолданылады. Сезімтал сенсор 2 ретінде $9/125$ мкм өзегі мен қабығының өлшемдері бар бір режимді оптикалық талшық қолданылады. Механикалық әсер ету орнында 3 микро иілу пайда болады, ал ОВ бойымен таралатын жарық толқынының оптикалық қуатының жоғалуы артады. Талшықтан шыққан кезде фотосезімтал теледидар матрицасының сезімтал бетіне түсетін 4 сәуле пайда болады, оның бетінде жарық дақтары пайда болады. Әрі қарай, жарық толқындары электр сигналына айналады және 7 дербес компьютерге қосылған 6 сигналды өңдеу құрылғысына түседі. Оптикалық талшыққа механикалық әсер ету кезінде фотоэластикалық әсер пайда болады және қабық пен өзек арасындағы сыну коэффициенті өзгереді. Бұл жарық қасиеттерінің өзгеруіне және қосымша шығындардың өсуіне әкеледі, атап айтқанда жарық толқыны режимінің фазасы және оның қарқындылығы. Жарық нүктесінің барлық өзгерістері теледидар матрицасымен бекітіліп, түрлендіргіш арқылы сигналды өңдеу құрылғысына беріледі.



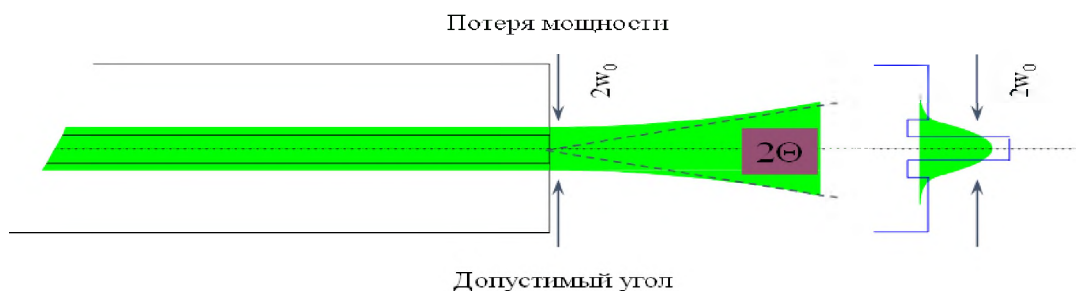
Сурет 1. Жеңілдетілген құрылымдық схема [1]

Маңызды мәселе-кездейсоқ тербелістерді анықтауға, сондай-ақ Шу жоғарылаған кезде бастапқы "нөл" параметрлерін динамикалық түрде өзгертуге мүмкіндік беретін температуралық кедергілер мен шуды бақылаудың қолданылатын әдісі. Оптикалық сәуленің ОТ-тан шығу профилін қарастыру қажет (сурет 2). Жарық көзінен сәуленің енуіне арналған сандық апертураны өрнек арқылы көрсетуге болады:

$$NA = \sin Q = (n_2^2 - n_1^2)^{0.5} = 1/pW_0.$$

Мына мәнді қабылдаймыз $NA=0,17$ и $Q=9,8^\circ$.

ОТ қабығы тығыздығы төмен шыныдан жасалғандықтан және оның өзегі тығыздығы жоғары шыныдан жасалғандықтан, сыну көрсеткіштері $n_1 < n_2$, а шарттарына сәйкес келуі керек, ал түсу және сыну бұрыштары $\alpha_{in} = \alpha_{out}$ тең болады. Бұл жағдайда сыну көрсеткіштері $n_1 = 1,4570$ және $n_2 = 1,4625$. ОВ жарық сәулесінің толық ішкі шағылысуымен жұмыс істейді, ол екі ортаның шекарасынан шықпай-ақ оның өзегіне таралады.



Сурет 2. ОТ шығысындағы жарық нүктесінің сатылы профилі және сәулелену көзінің спектрлік сипаттамасы [2].

Гаусстың таралу заңына бағынатын профиль қалыптасты. Теледидар матрицасының бетіне түсетін жарық нүктесінің өзінде өте көп шу бар, сондықтан бір режимді талшыққа ауысу айтарлықтай қиындықтарды тудырады. Көлденең Деформацияланатын сәуленің осі бойында орналасқан α_0 бұрышы болған жағдайда, толқынның электромагниттік өрісі қуатының көлемдік тығыздығын бөлу, ол жарық толқыны деформацияға ұшыраған ОТ соңында орнатылған фото қабылдағыштың бетіне түскенде пайда болады, бұл жағдайда талшық арқылы берілетін оптикалық қуаттың жоғалуы болады, өйткені микро иілу пайда болады және қосымша иілу пайда болады шығындар.

Бұл мақалада оптикалық талшықтағы оптикалық процестердің физика-математикалық моделінің сызықтық емес қасиеттерінің теориялық негіздемесі ұсынылады. Біздің отандық ғалымдардың да (Мехтиев А.Д., Юрченко А.В.) теориялық ұсыныстары бар [3]. Бұл процестер толқын параметрлерінің (қарқындылығы, толқын жиілігі және т.б.) және температураның кең ауқымындағы барлық деформацияларды ескере отырып, жарық толқынының оптикалық талшық өзегінде таралуымен байланысты. Теориялық негіздер геометриялық және толқындық оптиканың белгілі заңдарына, сондай-ақ жарық толқынының оптикалық талшықпен өзара әрекеттесуіне байланысты оптикалық-электрлік процестердің феноменологиялық теориясына сүйенеді. Ұсынылған теориялық пайымдаулар үздіксіз ортаның электродинамикасы мен жарықтың классикалық толқындық теориясының заңдары шеңберінде қарастырылады.

Вакуумда (ауада) таралатын жарық толқынының электромагниттік өрісі келесідей өрнектелетіні белгілі

$$k_0 = \frac{\omega}{c}, k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \omega = (\vec{k}_0 \vec{c}) \equiv k_0 c.$$

Бұл өрнектер жалпыланған классикалық Даламбер толқындық теңдеуінің көмегімен шешіледі:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{u} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = 0 \text{ түрінде } \vec{u}_g = \vec{u}_{0g} \cdot \exp(i\omega t - (\vec{k}_0 \vec{r})).$$

$$k = \omega / v, k = 2\pi/\lambda, \omega = (k v v v) \equiv, \text{ or}$$

ОТ-тың толқындық параметрлердің мәндерінде $k = \frac{\omega}{v}, k = \frac{2\pi}{\lambda}, \omega = (\vec{k} \vec{v}) \equiv kv$, ОТ-тың сыну көрсеткішімен

$$n = \frac{c}{v} = \frac{k}{k_0} \geq 1, n = \sqrt{\epsilon \mu}, c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Даламбер толқындық теңдеуі төменде келтірілген:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{u} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = 0, \text{ осылайша } \vec{u} = \vec{u}_0 \cdot \exp(i\omega t - (\vec{k} \vec{r})),$$

$$\text{где } \frac{1}{v} = \frac{k}{k_0 c} = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}, v = \frac{k_0 c}{k} = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon \mu}.$$

Оптикалық диапазонның электромагниттік толқынының фазасы, ол белгілі бір бұрышпен түседі θ оның соңынан бастап ОТ бетіне келесі тәуелділікпен орнатылады $\phi_0 = (\vec{k}_0 \vec{r}) = \frac{\omega}{c^2} (\vec{c} \vec{r})$, ал толқындардың сынуы ОТ ішінде жазылады

$$\phi = (\vec{k} \vec{r}) = \frac{\omega}{v^2} (\vec{v} \vec{r}).$$

Бұл толқындардың фазалық айырмашылығы пайда болады.

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c^2} (n \cos \psi - 1) (\vec{c} \vec{r}).$$

Сынған толқынның ОТ бетіне түсетін бастапқы бағыттан ауытқу бұрышы

$$\psi = \theta - \gamma.$$

Өрнекті қолдану $\cos \psi = \frac{\cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} + \sin^2 \theta}{n}$, соңғы теңдеуді шығарайық

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c} (\cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} + \sin^2 \theta - 1) (\vec{\tau}_0 \vec{r}). \quad (1)$$

(1) бірлік векторының бағыты $\vec{\tau}_0$ жылдамдық векторының бағыты бойынша $\vec{c}$ және сәйкесінше толқындық вектордың бағыты бойынша таңдалады $k_0 = \frac{\omega}{c}$ қашан талшық бетіне түсетін толқындар $\vec{c} = c \vec{\tau}_0$ және теңдік орындалады

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c} (n \cos \psi - 1) (\vec{\tau}_0 \vec{r}),$$

сәйкестік қай жерде қолданылады $\cos \psi = \frac{\cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} + \sin^2 \theta}{n}$.

Сынған және түскен сәулелердің айырмашылығын анықтайық:

$$\delta x = dtg \gamma = \frac{d \sin \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}},$$

бұда d – талшықты-оптикалық үлгінің қалыңдығы (диаметрі) (талшықты-оптикалық желі кабелінің фрагменті).

Содан кейін түскен және сынған толқын арасындағы фазалық айырмашылық келесідей болады

$$\phi - \phi_0 = \frac{\omega}{c} \frac{d \sin \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}. \quad (2)$$

(1), (2) өрнектер мен қабылданған белгілердің тіркесімінде $u = \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}$ біз ОТ-тың сыну көрсеткішін есептеуге мүмкіндік беретін теңдеу жасаймыз

$$u^2 - u \cos \theta - \frac{d \operatorname{tg} \theta}{(\vec{r}_0 \vec{r})} = 0,$$

$$u_{1,2} = \frac{\cos \theta \mp \sqrt{\cos^2 \theta + \frac{4 d \operatorname{tg} \theta}{r \cos \alpha}}}{2}. \quad (3)$$

(3) теңдеудің нақты түбірлерінің алынған сандық мәндерін және n ақырлы мәнін талдау нәтижесіне байланысты $u_{1,2}$ мәндерінің біреуі ғана анықталады.

Оптикалық диапазонның электромагниттік толқынының ОТ-пен өзара әрекеттесу процестерін қарастырыңыз

$$\vec{u} = \vec{u}_0 \cdot \exp(i\omega t - (\vec{k} \vec{r})) = \vec{u}_\omega(t) \vec{u}_{\vec{k}}(\vec{r}).$$

ОВ диэлектрик ретінде жіктелуі мүмкін

$$\vec{\nabla}^2 \vec{u}_{\vec{k}} + \vec{k}^2 \vec{u}_{\vec{k}} = 0.$$

Өлшемсіз айнымалыға көшейік $\xi = \frac{\vec{r}}{a}$,

$$\frac{\partial^2 \vec{u}_{\vec{k}}}{\partial \xi^2} + (\vec{k} a)^2 \vec{u}_{\vec{k}} = 0.$$

Пайда болған оптикалық әсерлер кеңістіктік аймақта, өлшемдері бойынша а торының тұрақтысымен, оптикалық спектрдің толқын ұзындығының кең диапазонында жүреді деген шарт қабылдануы керек. Оптикалық диапазонды ескере отырып

$$(\vec{k} a) \approx \frac{2\pi a}{\lambda} \ll 1 \text{ және сәйкесінше } (\vec{k} \vec{r}) = \frac{2\pi(\vec{r} \vec{r})}{\lambda v} = \frac{2\pi r}{\lambda} \cos \alpha \ll 1,$$

жарық толқынының электрлік және магниттік компонентін білдірейік

$$\vec{E} \cong \vec{E}_0 \cdot \exp(i\omega t),$$

$$\vec{H} \cong \vec{H}_0 \cdot \exp(i\omega t).$$

Электр өрісіне байланысты тоысу тогының тығыздығын келесі өрнек арқылы көрсетуге болады:

$$\vec{j}(t) = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E} \left(t \frac{\partial \vec{P}_{rp}(t)}{\partial t} \right),$$

мұндағы ε_∞ – талшықты материалдың күрделі диэлектрлік өткізгіштігінің (КДП) индукциялық (жоғары жиілікті) компоненті.

Біз талшықтағы электромагниттік толқынның электр өрісі қуатының көлемдік тығыздығын келесі ақпаратты қолдана отырып есептейміз [1-11], және өрнек құрастырайық:

$$P_{\partial vt} = \langle \operatorname{Re}(\vec{E}(t) \times \operatorname{Im}(\vec{j}(t))) \rangle \approx \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}_0^2. \quad (4)$$

Магниттік емес ОТ материалында таралатын оптикалық диапазондағы толқынның магнит өрісі қуатының көлемдік тығыздығын шамамен теңдіктерді қолдана отырып анықтаймыз

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cdot \exp(i\omega t - \vec{k}\vec{r}) \approx \vec{H}_0 \cdot \exp(i\omega t), \vec{B}(\vec{r}_0).$$

Теңдеудің соңғы түрі, келесі:

$$P_{mvt} = \left\langle \operatorname{Re}[\vec{H}(t)] \operatorname{Im} \left[\frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t} \right] \right\rangle \approx \frac{1}{2} \omega \mu_0 \vec{H}_0^2. \quad (5)$$

Сәйкестікті ескере отырып біз оптикалық толқынның электромагниттік өрісі қуатының көлемдік тығыздығын орнатамыз

$$\mu_0 \vec{H}_0^2 = \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}_0^2, \text{ осы көріністе } P_{vt} = P_{\partial vt} + P_{mvt} \approx \omega \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \vec{E}_0^2.$$

Электромагниттік толқынның қарқындылығын қарастырыңыз

$$I = \left\langle \operatorname{Re}[\vec{E}(t)] \operatorname{Im}[\vec{H}(t)] \right\rangle \approx \frac{1}{2} |\vec{E}_0| |\vec{H}_0| \text{ түрінде } I \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty}{\mu_0}} \vec{E}_0^2.$$

Толқынның электромагниттік өрісі қуатының көлемдік тығыздығының таралуы толқын векторы мен фотодетектордың бетіне қалыпты арасындағы α_0 , бұрышын ескере отырып алынды, өйткені жарық нүктесінің қарқындылығының барлық өзгерістерін бақылайтын фотоқабылдағыш орнатылады. Жарық дақтарын белгілі деп жіктеуге болады Пуассон дақтары [14] (Юрченко А.В.) қарасақ болады. ОТ-қа механикалық әсер ету кезінде дақтың параметрлері өзгереді және ең алдымен қарқындылығы өзгереді.

(3) өрнегінің көмегімен орындалады. ζ_0 иондық-молекулалық химиялық байланыстардағы босаңсытқыштарды белсендірудің көптеген әртүрлі сипаттамалық молекулалық параметрлерін білдіретін параметр: тепе-теңдік жағдайына жақын иондардың меншікті тербелістерінің жиілігі (кристалдық тор түйіндерінде локализацияланған); иондар үшін ықтимал тосқауылдың ені және т.б.) және құрылым параметрлері (талшықты-оптикалық үлгінің физика-химиялық қасиеттері мен түріне және кристалдық құрылымының геометриясына байланысты).

α_0 бұрыштары бойынша орташалауды жасайық

$$\langle P_{vt}(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) \rangle = \frac{\omega}{c\pi} \int_0^\pi I(\alpha_0) n_\infty(\zeta_0; \omega; T; d; \theta; \alpha_0) d\alpha_0. \quad (7)$$

Біз деформациялардың өлшемсіз шағын параметрлері бойынша толқулар теориясының нөлдік жуықтауын колданамыз $\frac{\delta d}{d}, \frac{\delta(\vec{r}_0 \vec{r})}{(\vec{r}_0 \vec{r})_0} = \frac{(\delta \alpha)^2}{2}$ өрнекте (2)

Бұл фотодетектордың бетіне түсетін және талданатын толқынның электромагниттік өрісі қуатының өлшенетін көлемдік тығыздығының мәнін теориялық есептеуге мүмкіндік береді.

Оптикалық сигналдың таралу жағдайларының оның қуатына әсерін қарастырыңыз.

$$I(\alpha_0) = I_0(r) \times \left(\frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2. \quad (8)$$

ОВ көлденең монолитті темірбетон Арқалықта нақтыланған жүктемелермен болған кезде ерекше жағдайды қарастырыңыз, ал әсер сәуленің ортасында жүзеге асырылды. Гук заңын ескере отырып, көлденең монолитті темірбетон сәулесінде серпімді емес деформация процесін математикалық модельдеуді, төртінші дәрежелі мүшеге дейін есептеу дәлдігін орындайық. Кернеулі деформацияланған сәуле денесінің потенциалдық энергиясынмещысулар бойынша ыдыратамыз $U(x) \approx \frac{kx^2}{2} + \frac{\beta x^4}{4}$.

$$\beta = \frac{k\beta_V}{l^2}, k = \frac{ES}{l}, \beta = \frac{ES\beta_V}{l^3} = \frac{k\beta_V}{l^2},$$

мұндағы E — материаладың Юнга модуль.

Салыстырмалы көлемдік кеңею коэффициенті $\beta_V = \mu \varepsilon_{||}^2$,

мұндағы $\varepsilon_{||} = \frac{\Delta l}{l}$ — салыстырмалы бойлық ұзарту (немесе қысу),

$\mu = \frac{\beta_V}{\varepsilon_{||}^2}$ – параметрді ескере отырып есептелетін Пуассон коэффициенті

$$\beta_V = \frac{\Delta V}{V}.$$

Қабылдау $\beta_V = \frac{\Delta S \Delta l}{Sl} = \varepsilon_{\perp} \varepsilon_{||}$, где $\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta S}{S}$ – салыстырмалы көлденең кеңею (ұзарту немесе қысу), аламыз $\mu = \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{||}}$.

Өрнек негізінде $\varepsilon_{||} = \frac{\Delta l}{l}$, $\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta S}{S}$ жазамыз $\mu = \frac{l \Delta S}{S \Delta l}$, оптикалық талшықтың көлденең қимасы дөңгелек.

Гук заңынан кішігірім ауытқу аймағында $\beta l^2 = k \beta_V \ll k \varepsilon_{||}^2$, немесе $\beta_V \ll \varepsilon_{||}^2$, с ескере отырып, $\beta_V = \varepsilon_{\perp} \varepsilon_{||}$, бізде $\varepsilon_{\perp} \ll \varepsilon_{||}$, $\frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{||}} \ll 1$, ге тең бұл $\mu \ll 1$, жуықтауына өтуге мүмкіндік береді және осы негізде $U(x) \approx \frac{k x_{||}^2}{2}$, шекті орын ауыстыру шартынан $mg \Delta l = \frac{k(\Delta l)^2}{2}$ біз абсолютті бойлық ұзартуды аламыз (немесе қысу)

$$\Delta l = \frac{2mg}{k} = \frac{2mgl}{ES}, \quad (9)$$

мұнда $S = \pi r_1^2$ – массасы m деформацияланбаған сәуленің көлденең қимасының ауданы. Математикалық өрнектерді қолдана отырып, біз аламыз

$$\mu = ES \frac{\left| \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right|}{2mg} = \frac{E \pi r_1^2 \left| \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1 \right|}{2mg}. \quad (10)$$

Пуассон коэффициенті (12) әр түрлі болуы мүмкін бойлық кеңею жағдайлары үшін $r_2 > r_1$,

$$r_2 = r_1 \sqrt{1 + \frac{2mg\mu}{E \pi r_1^2}} \quad (11)$$

немесе қысу $r_2 < r_1$, егерде

$$r_2 = r_1 \sqrt{1 - \frac{2mg\mu}{E \pi r_1^2}}. \quad (12)$$

Абсолютті және салыстырмалы көлденең ұзарту мен қысудың соңғы өрнегі келесі жалпыланған формула болады

$$r_2 - r_1 = r_1 \left(\sqrt{1 + \frac{2mg\mu}{E \pi r_1^2}} - 1 \right), \quad \frac{r_2 - r_1}{r_1} = \sqrt{1 + \frac{2mg\mu}{E \pi r_1^2}} - 1, \quad (13)$$

$$r_2 - r_1 = r_1 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2mg\mu}{E \pi r_1^2}} \right), \quad \frac{r_2 - r_1}{r_1} = 1 - \sqrt{1 - \frac{2mg\mu}{E \pi r_1^2}} \quad (14)$$

Зерттеу нәтижелері

Гаусстың таралу заңына бағынатын профиль қалыптасты. Теледидар матрицасының бетіне түсетін жарық нүктесінің өзінде өте көп шу бар, сондықтан бір режимді талшыққа ауысу айтарлықтай қиындықтарды тудырады.

Сәуленің деформациясын қуаттың жоғалуы арқылы басқаруға болады. Нақтыланған жүктемелері бар көлденең немесе тік монолитті темірбетон сәулесінің денесіне орналастырылған лазерлік сәулелену көзінен пайда болған оптикалық толқынның параметрлерін басқаруға арналған соңғы өрнектерді екі өрнек арқылы ұсынуға болады.

Арқалық пен оптикалық талшықта деформациясы болмаған кезде

$$P_{Vt}(\zeta_0^{(0)}; \omega; T; l_1; r_1; \theta; \alpha_0) = 2 \frac{\omega I_0(r)}{c \pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_\infty(\zeta_0^{(0)}; \omega; T; l_1; r_1; \theta; \alpha_0) d\alpha_0. \quad (15)$$

Арқалық пен оптикалық талшықта деформациясы болған кезде

$$P_{vt}(\zeta_0^{(1)}; \omega; T; l_2; r_2; \theta; \alpha_0) = 2 \frac{\omega l_0(r)}{c\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} \right)^2 n_\infty(\zeta_0^{(1)}; \omega; T; l_2; r_2; \theta; \alpha_0) d\alpha_0. \quad (16)$$

Қорытындылар

Сыртқы жарық сигналын визуалды сигналға айналдыру процестерінің физика-математикалық моделі жасалды, бұл кванттық толқындық оптика әдістерін қолдана отырып, монолитті темірбетон конструкцияларында және сыртқы жүктемелердің әсерінен кеңейтілген объектілерде әртүрлі ақаулардың пайда болу процесін түсіндіруге мүмкіндік береді. Алынған өрнектер жарықтың сыну көрсеткіштерінің темірбетон конструкциясының жүктемесіне тәуелділігін талдау арқылы деформацияланған темірбетон конструкциясындағы жарық сигналының қарқындылығының шамасына байланысты құрылымға жүктемені есептеуге мүмкіндік береді.

Литература:

1. Ликумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Монография. - СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007. - 110 с.
2. Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т., Петров Ю.С., Колчинский В.А. Волоконно-оптические интерферометрические приемники слабых сейсмосигналов. Вестник: ДВО РАН. 2016. № 4, с.56-59
3. Семенов А.С., Волоконно-оптические датчики. Три десятилетия развития (Ю.Н. Кульчин. “Распределенные волоконно-оптические измерительные системы” (М.: Физматлит, 2001)), Квантовая электроника, 2002, том 32, номер 8, 751
4. A.D. Mekhtiyev, M.Yu. Narkevich, Y.G. Neshina, A.K. Kozhas, R.Zh. Aimagambetova, B.B. Aubakirova, Y.Zh. Sarsikayev. Fiber optics based system of monitoring load-bearing building structures. Magazine of Civil Engineering. 2023. 123(7). Article No. 12301. DOI: 10.34910/MCE.123.1.
5. A. Mekhtiyev, Ye. Neshina, A. Kozhas, B. Aubakirova, R. Aimagambetova, Sh. Toleubayeva, A. Tleubayeva. Monitoring reinforced concrete building structure technical conditions based on the use of quasi-distributed Fiber-optic sensors. International Journal of GEOMATE, Sept. 2022, Vol.23, Issue 97, pp.154-162.
6. Yugay V., Mekhtiyev A., Neshina Y. Aubakirova B., Aimagambetova R., Kozhas A., Alkina A., Musagazhinov M., Kovtun A. Design of an information-measuring system for monitoring deformation and displacement of rock massif layers based on fiber-optic. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 6 (5 (114)), 2021. Pp. 12–27. (Scopus 48) doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.244897>

References:

1. Liokumovich L.B. Fiber-optic interferometric measurements. Monograph. - SPb.: Publishing house of the Polytechnic University, 2007. - 110 p.
2. Kulchin Yu.N., Kamenev O.T., Petrov Yu.S., Kolchinsky V.A. Fiber-optic interferometric receivers of weak seismic signals. Bulletin: Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. 2016. No. 4, pp. 56-59.
3. Semenov A.S., Fiber-optic sensors. Three decades of development (Yu.N. Kulchin. “Distributed fiber-optic measuring systems” (Moscow: Fizmatlit, 2001)), Quantum Electronics, 2002, Vol. 32, No. 8, 751.
4. A.D. Mekhtiyev, M.Yu. Narkevich, Y.G. Neshina, A.K. Kozhas, R.Zh. Aimagambetova, B.B. Aubakirova, Y.Zh. Sarsikayev. Fiber optics based system of monitoring load-bearing building structures. Magazine of Civil Engineering. 2023. 123(7). Article No. 12301. DOI: 10.34910/MCE.123.1.
5. A. Mekhtiyev, Ye. Neshina, A. Kozhas, B. Aubakirova, R. Aimagambetova, Sh. Toleubayeva, A. Tleubayeva. Monitoring reinforced concrete building structure technical conditions based on the use of quasi-distributed Fiber-optic sensors. International Journal of GEOMATE, Sept. 2022, Vol.23, Issue 97, pp.154-162.
6. Yugay V., Mekhtiyev A., Neshina Y. Aubakirova B., Aimagambetova R., Kozhas A., Alkina A., Musagazhinov M., Kovtun A. Design of an information-measuring system for monitoring deformation and

displacement of rock massif layers based on fiber-optic. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 6 (5 (114)), 2021. Pp. 12–27. (Scopus 48) doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.244897>

Information about the authors:

Aubakirova B.B. – corresponding author, senior lecturer, «Building and design» chair, master, academician of the international academy of informatization, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan; email: aubakirova_68@mail.ru;

Mekhtiyev A.D. – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan; email: barton.kz@mail.ru;

Alkina A.D. – candidate of Technical Sciences, PhD, Energy Systems Department, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan; email: alika_1308@mail.ru;

Aimagambetova R.Zh. – candidate of Technical Sciences, Kazakhstan Institute of Standardization and Metrology of the Committee for Technical Regulation and Metrology of the Ministry of Trade and Integration of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan; email: rauwan2012@mail.ru.