

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Ыбрайым Баян Марғұланқызы

«Жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктің
құрылымын оңтайландыру»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

6B06201 – Телекоммуникация мамандығы

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

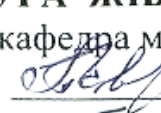
Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

ЭТжҒТ кафедра меңгерушісі

 Е.Таштай
« 30 » 05 2025 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «Жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық
датчиктің құрылымын оңтайландыру»

6B06201 – Телекоммуникация мамандығы

Орындаған:

Пікір беруші

PhD,доцент.м.а

Халықаралық ақпараттық

Технологиялар

университеті  С.Б.Омаров

« 28 » 05 2025 ж.



Б.М.Ыбрайым

Ғылыми жетекші

Аға оқытушы

Техника ғылымдарының
магистрі

 Б.М.Садықова

« 28 » 05 2025 ж.

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыш технологиялар кафедрасы

6B06201 – Телекоммуникация мамандығы

БЕКІТЕМІН

ЭТжҒТ кафедра меңгерушісі

техн.ғыл.кан

Е.Таштай

« 05 » 02 2025ж

**Дипломдық жұмыс орындауға
ТАПСЫРМА**

Білім алушы: Ыбрайым Баян Марғұланқызы

Тақырыбы: Жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктің құрылымын оңтайландыру.

Университет ректорының «29» қаңтар 2025ж. №26-П/Ө бұйрығымен бекітілген Аяқталған жобаны тапсыру мерізімі «30» сәуір.2025ж.

Жұмыстың бастапқы мәліметтері: 1. ГОСТ Р ISO 11551-2015 Оптика және оптикалық құрылғылар. Лазерлер және лазерлік қондырғылар (жүйелер). Оптикалық элементтермен лазерлік сәулеленудің жұтылу коэффициентін өлшеу әдістемесі. 2. Оптикалық аспаптарға арналған телескопиялық жүйелер. Ажыратымдылық шегін анықтаудың көрнекі әдісі ГОСТ 15114-78. 3. ГОСТ Р ISO 13694-2010 мәтіні Оптика және оптикалық құрылғылар. Лазерлер және лазерлік қондырғылар (жүйелер). Лазер сәулесінің қуаттылық (энергия) тығыздығының таралуын өлшеу әдістері.

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) Жоғары температура жағдайларында жұмыс істейтін талшықты-оптикалық датчиктердің негізгі түрлерін және қолдану салаларын зерттеу.

ә) Жоғары температураларға арналған материалдардың қасиеттерін зерттеу және оларды датчикте қолдану мүмкіндігін бағалау

б) Жоғары температураларға арналған датчик құрылымының математикалық моделін әзірлеу.

в)Оңтайландырылған құрылымның сезімталдық, дәлдік және температуралық тұрақтылық тұрғысынан тиімділігін бағалау.

Сызбалық материалдар 15 слайдпен ppt форматында көрсетілген.

Ұсынылатын негізгі әдебиет:

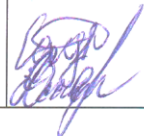
1. Free Space Optical Communication (System Design, Modeling, Characterization and Dealing with Turbulence). cover:10.1515 / 97, year: 2015
2. (<https://ieeexplore.ieee.org/>): "Optical communication network analysis and optimization".Analysis and Optimization of the Network Throughput in IEEE 802.15.13 based Visible Light Communication Networks (978-1-6654-0308-5/21 ©2021 IEEE)
3. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8638446>. Optical Network Performance Analysis through Prediction of Q Factor on Simulated and Validated Dataset, 978-1-5386-7813-8/18/\$31.00 ©2018 IEEE.
4. Optimization Technology of Optical Fiber Communication Network Based on Service Classification. Journal of Physics: Conference Series,MSOTA 2020.doi:10.1088/1742-6596/1746/1/012085.
5. AppliedMathematicalModelling 35(2011)3345–3354.Optimization of passive optical network planning.Topology optimization for hybrid optical/wireless access networks.
6. Z. Dong, F. N. Khan, Q. Sui, K. Zhong, C. Lu and A. P. T. Lau, "Optical Performance Monitoring: A Review of Current and Future Technologies," in Journal of Lightwave Technology, vol. 34, no. 2, pp. 525-543, 15 Jan.15, 2016 is available at <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2480798>.

Дипломдық жұмысты дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерізімі	Ескерту
а) Жоғары температура жағдайларында жұмыс істейтін талшықты-оптикалық датчиктердің негізгі түрлерін және қолдану салаларын зерттеу.	07.02.2025	орындалды
ә) Жоғары температураларға арналған материалдардың қасиеттерін зерттеу және оларды датчикте қолдану мүмкіндігін бағалау	24.03.2025	орындалды
б) Жоғары температураларға арналған датчик құрылымының математикалық моделін әзірлеу.	20.04.2025	орындалды
в) Оңтайландырылған құрылымның сезімталдық, дәлдік және температуралық тұрақтылық тұрғысынан тиімділігін бағалау.	26.04.2025	орындалды

Дипломдық жұмыс бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа қойған

Қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Диплом жұмысының тақырыбын талдау	М.Б.Садықова Техника ғылымдарының магистрі	13.03.25	
Теориялық ақпарат	М.Б.Садықова Техника ғылымдарының магистрі	20.04.2025	
Норма бақылау	PhD доктор, аға оқытушы Досбаев.Ж.М	28.05.25.	

Техника ғылымдарының магистрі  М.Б.Садықова

(қолы)

Тапсырманы орындауға алған білім алушы  Б.М.Ыбрайым
(қолы)

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыс жоғары температура жағдайларында қолдануға арналған талшықты-оптикалық датчиктің құрылымын оңтайландыру мәселесіне арналған. Жұмыста талшықты-оптикалық сенсорлардың физикалық негіздері, жұмыс істеу принциптері, түрлері және оларды жоғары температуралық ортада қолдану ерекшеліктері жан-жақты қарастырылады. MATLAB бағдарламасы арқылы Брэгг торлы (FBG) сенсор негізінде модельдеу жүргізіліп, датчиктің сезімталдығы мен тұрақтылығы бағаланды. Жұмыстың нәтижелері датчик құрылымын жетілдіру мен өнеркәсіптік салаларда қолданудың негізін қалайды.

АННОТАЦИЯ

Данная дипломная работа посвящена оптимизации конструкции волоконно-оптического датчика, предназначенного для эксплуатации в условиях высоких температур. В работе подробно рассмотрены физические основы, принцип действия и типы волоконно-оптических сенсоров, а также особенности их применения в экстремальных температурных условиях. На основе датчиков с Брэгговской решёткой (FBG) проведено математическое моделирование в среде MATLAB. Оценены чувствительность, фазовые сдвиги и устойчивость конструкции. Полученные результаты позволяют предложить эффективные решения для применения таких датчиков в энергетике, металлургии, аэрокосмической и нефтегазовой промышленности.

ABSTRACT

This thesis is dedicated to optimizing the structure of a fiber-optic sensor designed for high-temperature environments. The study examines the physical principles, operational mechanisms, and types of fiber-optic sensors, focusing on their application in extreme thermal conditions. Mathematical modeling was conducted using MATLAB based on Fiber Bragg Grating (FBG) technology to evaluate sensitivity, phase shift, and structural stability. The results provide a foundation for improving sensor design and support the implementation of fiber-optic technologies in industries such as energy, metallurgy, aerospace, and oil & gas.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	8
1 Талшықты-оптикалық датчиктер туралы жалпы мәлімет	13
1.1 Талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс принципі	16
1.2 Температураны өлшеу әдістері	20
1.3 Талшықты-оптикалық сенсорлардың түрлері	23
2 Жоғары температураларға арналған датчиктердің құрылымдық ерекшеліктері	25
2.1 Талшықты-оптикалық датчиктердің математикалық моделін құру	27
2.2 Жоғары температура жағдайындағы талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс істеу принциптері мен мәселелері	27
2.3 Жоғары температуралық талшықты-оптикалық датчиктердің құрылымын оңтайландыру әдістері	30
3 Датчиктің құрылымын оңтайландыру жолдары	36
3.1 Жоғары температура жағдайындағы талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс істеу принциптері	37
3.2 Талшықты-оптикалық сенсорлардың жоғары температураға бейімді конструкцияларын оңтайландыру әдістері	40
3.3 Жоғары температуралық ортада талшықты-оптикалық сенсорлардың тұрақтылығын арттыру тәсілдері	44
3.4 MATLAB және Optisistem арқылы жоғары температуралық сенсордың жұмысын модельдеу	48
Қорытынды	56
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	58

КІРІСПЕ

Ақпараттық-коммуникациялық технологиялардың жедел дамуы мен цифрлық экономиканың барлық салаларға енуі телекоммуникация саласына деген сұранысты күрт арттырды. Атап айтқанда, мемлекеттік мекемелерден бастап, ірі корпорациялар мен шағын бизнеске дейін, әртүрлі деңгейдегі ұйымдар үшін телекоммуникациялық желілер – мәлімет алмасудың, байланыс орнатудың және ақпаратты қауіпсіз тасымалдаудың басты арнасы болып отыр. Мұндай жағдайда желілердің үздіксіз жұмыс істеуі, олардың техникалық жағдайының сенімділігі, ақауларды жедел анықтау мен алдын алу шаралары бірінші орынға шығады.

Осы орайда телекоммуникациялық жүйелерді нақты уақыт режимінде бақылауға мүмкіндік беретін заманауи, интеллектуалды технологиялардың маңызы артуда. Бұл бағытта ерекше назарға іліккен құралдардың бірі – талшықты-оптикалық датчиктер. Талшықты-оптикалық технологиялар бастапқыда тек мәлімет тасымалдау үшін қолданылса, бүгінде оларды бақылау, мониторинг жүргізу және қауіпсіздік мақсатында пайдалану жағы да кеңейіп келеді. Бұл датчиктер ақпаратты тек қана жылдам және сенімді түрде жеткізіп қоймай, сонымен қатар байланыс желілерінің бойында болып жатқан физикалық өзгерістерді мысалы, температура ауытқуы, қысым, діріл, майысу, кернеу дәл анықтап, автоматты түрде сигнал бере алады.

Талшықты-оптикалық сенсорлар – оптикалық талшық бойымен өтетін жарық толқындарының параметрлерін өлшеу арқылы сыртқы күштерді анықтайтын және тіркейтін ақылды құрылғылар. Бұл сенсорлардың жоғары сезімталдығы, алыс қашықтықтарға мониторинг жасау мүмкіндігі және электромагниттік кедергілерге тұрақтылығы оларды басқа әдеттегі сенсорлардан ажыратады. Сонымен қатар, олар күрделі инфрақұрылымдарда – туннельдерде, жер асты байланыс желілерінде, магистральдық оптикалық желілерде, сонымен қатар теңіз түбіндегі байланыс жүйелерінде кеңінен қолданылады.

Қазақстанның телекоммуникация саласы соңғы жылдары айтарлықтай дамып келеді. Ел аумағында оптикалық талшықтар арқылы байланыс желілері тартылып, шалғай елді мекендерге де интернет пен цифрлық қызметтер қолжетімді бола бастады. Бұл үдеріс өзімен бірге жаңа технологияларды ендіру қажеттілігін туындатады. Дәстүрлі түрде қолданыста болған кабельдерді тексеру әдістері енді жеткіліксіз болып барады, себебі олар уақыт пен ресурсты көп талап етеді әрі нақты диагностика бермейді. Осы мәселелерді тиімді шешудің жолы ретінде талшықты-оптикалық датчиктерді енгізу ұсынылады.

Дипломдық жұмыстың басты мақсаты – талшықты-оптикалық датчиктердің телекоммуникациялық инфрақұрылымдардағы жұмысын терең зерттеу, оларды қолданудың тиімділігін дәлелдеу және нақты техникалық шешімдер ұсыну. Бұл мақсатқа жету барысында датчиктердің теориялық негіздері, техникалық сипаттамалары мен жұмыс істеу принциптері егжей-тегжейлі талданады. Сонымен қатар, телекоммуникациялық желілерге ТОД

енгізудің құрылымдық моделі жасалып, олардың көмегімен қандай параметрлерді қадағалауға болатыны нақты көрсетіледі.

Осы мақсатты жүзеге асыру үшін келесі міндеттер қойылады:

- Талшықты-оптикалық датчиктердің физикалық негізін, яғни жарық толқындарының интерференциясы мен сынуы сияқты құбылыстарды зерттеу;
- ТОД-тың құрылымдық түрлерін нүктелік және таралған датчиктерді салыстыра отырып, олардың артықшылықтары мен қолдану салаларын сипаттау;
- Телекоммуникациялық инфрақұрылымның қазіргі жағдайына талдау жасап, оның әлсіз тұстарын анықтау;
- датчиктерді нақты желілік құрылымға енгізудің техникалық сызбасын әзірлеу;

Алынған мәліметтерді өңдеудің алгоритмдерін құру, яғни қандай жағдайлар жүйеде ақау екенін автоматты түрде анықтап, хабар беретіндей ету; жүйенің техникалық және экономикалық жағынан қаншалықты тиімді екенін есептеп, салыстырмалы анализ жасау.

Аталған дипломдық жұмыстың маңыздылығы – ол телекоммуникация саласындағы қауіпсіздік, тиімділік және үнемділік мәселелерін кешенді түрде шешуге бағытталған. Зерттеу нәтижесінде алынған ұсыныстар мен жобалық шешімдер байланыс операторлары, инженерлер, техникалық қызмет көрсету мамандары үшін әдістемелік құрал қызметін атқара алады. Сонымен қатар, бұл жұмыс болашақ ғылыми ізденістерге, яғни "ақылды желілер", деректерді автоматты өңдеу, жасанды интеллект арқылы бақылау жүйелерін енгізу сияқты бағыттарға негіз бола алады.

Бұл дипломдық жұмыстың күтілетін нәтижелерінің бірі - телекоммуникациялық желілерге талшықты-оптикалық сенсорларды енгізудің тиімді моделін құру, оның техникалық параметрлерін көрсету және қолданудың артықшылықтарын дәлелдеу. Нәтижесінде, желілік мониторинг жүйесінің жұмысын жаңғыртуға, техникалық ақауларды дер кезінде анықтап, үлкен апаттардың алдын алуға жол ашылады. Сонымен қатар, ұсынылған жүйе телекоммуникация операторлары үшін экономикалық жағынан тиімді болмақ, себебі ол қызмет көрсету шығындарын қысқартып, желінің жұмысын үнемі бақылауда ұстауға мүмкіндік береді.

1 Талшықты-оптикалық датчиктер туралы жалпы мәлімет

Бүгінгі таңда өнеркәсіп пен ғылым саласында жоғары дәлдікті, электромагниттік кедергілерге тұрақты және күрделі жағдайларда жұмыс істей алатын сенсорлық жүйелерге қажеттілік артуда. Бұл талаптарға жауап ретінде талшықты-оптикалық датчиктер (ТОД) өзінің инновациялық сипаттамаларымен ерекшеленеді. Бұл сенсорлар оптикалық талшық бойымен жарықтың таралу барысындағы параметрлердің (мысалы, интенсивтілік, фаза, толқын ұзындығы) ауытқуын қолдана отырып, температура, қысым, деформация секілді физикалық шамаларды өлшейді [1].

Талшықты-оптикалық сенсорлардың жұмыс істеу принципі толық ішкі шағылу құбылысына негізделген. Оптикалық талшықтың өзегі мен қабығы арасындағы сыну көрсеткішінің айырмашылығы жарық толқынының талшық ішінде ұзақ қашықтықтарға таралуын қамтамасыз етеді [2]. Бұл технологияның басты артықшылықтарына мыналар жатады:

1. Электромагниттік кедергілерге тұрақтылық – ТОД жоғары кернеулі аймақтарда және жарылыс қаупі бар орталарда қауіпсіз жұмыс істейді [4].
2. Өте жоғары дәлдік – Брэгг торлы сенсорлар температураны миллиградус дәлдігімен өлшей алады [9].
3. Көп функциялы болуы – бір талшық арқылы бірнеше параметрді (температура, қысым, діріл) бір уақытта өлшеу мүмкіндігі бар [3].

Талшықты-оптикалық датчиктердің өнімділігін анықтайтын негізгі фактор - материалдардың термиялық тұрақтылығы. Қазіргі уақытта негізгі материалдар ретінде:

- Кварцты талшықтар – 1000°C-қа дейінгі температураларда пайдаланылады, бірақ жоғары температураларда кристалдық тордың деформациясына ұшырайды [6].
- Сапфирлік талшықтар – 1600°C-қа дейінгі шайқалған орталарға төзімді, бірақ өндіру қымбат [6].
- Керамикалық композиттер (мысалы, Al_2O_3 - ZrO_2) – термиялық кеңею коэффициентінің төмендігімен және механикалық беріктігімен ерекшеленеді [5].

Жоғары температуралы орталарда (500–1200°C) ТОД-тердің сенімділігін қамтамасыз ету үшін құрылымдық оңтайландыру қажет. Мысалы, сапфирлік талшықтарды керамикалық қаптамалармен қорғау ыстыққа төзімділікті 30% арттырады [5]. Сонымен қатар, термиялық кернеуді болдырмау үшін гибридік құрылымдар (мысалы, кварц-сапфир интерфейстері) зерттелуде [10].

Жоғары температуралық датчиктердің жұмыс істеуін болжау үшін сандық модельдеу әдістері қолданылады. MATLAB ортасында жылу таралуы мен оптикалық сигналдың төмендеуін анализдеу арқылы материалдардың термиялық әсерлерге реакциясын бағалауға болады [7]. Мысалы, Liu et al. (2019) жылу өткізгіштіктің оптикалық жоғалтуларға әсерін сипаттайтын математикалық модельді ұсынды [7].

Қорыта келгенде, талшықты-оптикалық сенсорлар заманауи техника мен ғылымның әртүрлі салаларында үлкен мүмкіндіктерге ие. Дегенмен, сапфирлік талшықтардың жоғары құны секілді кейбір шектеулерге қарамастан, жаңа композиттік материалдарды әзірлеу және өндірістік технологияларды жетілдіру арқылы бұл қиындықтарды жеңуге болады [12]. Алдағы уақытта талшықты сенсорлардың өлшемдерін кішірейту және жасанды интеллектке негізделген бақылау жүйелеріне біріктіру арқылы олардың қолданылу аясын кеңейтуге болады [11]. Бұл бағыттағы зерттеулер мен әзірлемелер жоғары технологиялық шешімдерді қажет ететін салалардағы инновациялық жетістіктерге жол ашады. [11].

Қазіргі заманғы өнеркәсіп пен ғылымдағы жоғары дәлдікті, электромагниттік кедергілерге төзімділікті және күрделі орталарда жұмыс істеу қабілетін талап ететін сенсорлық жүйелерге өсіп келе жатқан сұранысқа жауап ретінде талшықты-оптикалық датчиктердің (ТОД) пайда болуы мен дамуы қарастырылды. ТОД-тың жарықтың оптикалық талшық арқылы таралуы кезіндегі параметрлердің өзгеруін пайдаланып физикалық шамаларды өлшеу принципі түсіндірілді.

ТОД-тың жұмыс істеуінің негізінде толық ішкі шағылу құбылысы жатқаны, оптикалық талшықтың өзегі мен қабығы арасындағы сыну көрсеткішінің айырмашылығы арқылы жарықтың ұзақ қашықтыққа таралуы қамтамасыз етілетіні баяндалды. Бұл технологияның электромагниттік әсерге төзімділік, жоғары дәлдік (әсіресе Брэгг торлы сенсорларда) және көпфункционалдылық сияқты негізгі артықшылықтары атап өтілді. Бір талшық арқылы бірнеше параметрді бір мезгілде өлшеу мүмкіндігі ТОД-тың әмбебаптығын көрсетеді.

ТОД-тың өнімділігін анықтайтын маңызды фактор ретінде материалдардың термиялық тұрақтылығына ерекше назар аударылды. Қазіргі уақытта қолданылатын негізгі материалдар, атап айтқанда кварцты талшықтар, сапфирлік талшықтар және керамикалық композиттердің (Al_2O_3 - ZrO_2) сипаттамалары мен жоғары температуралық шектеулері талқыланды. Кварцты талшықтардың $1000^{\circ}C$ -қа дейінгі температураларда қолданылуы, бірақ жоғары температуралардағы деформацияға бейімділігі, сапфирлік талшықтардың $1600^{\circ}C$ -қа дейінгі төзімділігімен қатар қымбаттығы және керамикалық композиттердің төмен термиялық кеңею коэффициенті мен жоғары механикалық беріктігі атап өтілді.

Жоғары температуралы орталарда (500 – $1200^{\circ}C$) ТОД-тың сенімділігін арттыру үшін құрылымдық оңтайландыру қажеттілігі көрсетілді. Сапфирлік талшықтарды керамикалық қаптамалармен қорғау арқылы ыстыққа төзімділікті арттыру және термиялық кернеуді болдырмау үшін кварц-сапфир интерфейстері сияқты гибридтік құрылымдарды зерттеу мысалдары келтірілді.

Жоғары температуралық датчиктердің жұмыс істеуін болжау үшін сандық модельдеу әдістерінің маңыздылығы атап өтілді. MATLAB ортасында жылу таралуы мен оптикалық сигналдың төмендеуін талдау арқылы материалдардың термиялық әсерлерге реакциясын бағалау мүмкіндігі көрсетілді. Liu et al. (2019)

ұсынған жылу өткізгіштіктің оптикалық жоғалтуларға әсерін сипаттайтын математикалық модель бұл бағыттағы зерттеулердің маңыздылығын көрсетеді.

Қорытындылай келе, талшықты-оптикалық датчиктер жоғары технологиялық шешімдерді қажет ететін салалар үшін перспективалы бағыт болып табылады. Сапфирлік талшықтардың қымбаттығы сияқты кемшіліктер композиттік материалдар мен жаңа өндірістік технологияларды дамыту арқылы еңсерілуі мүмкін. Болашақта ТОД-тердің өлшемдерін кішірейту, жасанды интеллектке негізделген мониторинг жүйелерімен интеграциялау және экстремалды орталарда жұмыс істеу қабілетін одан әрі жетілдіру күтіледі. Бұл технологияның дамуы ғылым мен техниканың әртүрлі салаларындағы өлшеулердің дәлдігі мен сенімділігін арттыруға зор үлес қосады.



1.1-сурет – Талшықты оптикалық датчик

1.1 Талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс принципі

Талшықты-оптикалық сенсорлар - сыртқы ортаның физикалық шамаларын (температура, қысым, кернеу, діріл және басқалары) өлшеуге арналған қазіргі заманғы және өте дәл құрылғылар. Олардың негізгі жұмыс принципі жарықтың оптикалық талшық арқылы таралуы кезінде пайда болатын өзгерістерді тіркеуге негізделген. Датчик жарық толқынының нақты бір қасиетіне әсер ететін физикалық шаманы өлшейді. Мұндай әсерге байланысты жарықтың интенсивтілігі, фазасы, толқын ұзындығы немесе поляризациясы өзгеріп отырады [1].

Жарық көзінен шыққан сәуле оптикалық талшық арқылы өтіп, сенсорлық элементке жеткенде, ол сыртқы факторлардың әсерінен түрленеді. Түрленген сәуле кейін фотодетектор арқылы қабылданып, арнайы құрылғыда өңделеді. Осылайша, физикалық параметр оптикалық сигнал түріне айналады да, оны сандық түрде бағалауға мүмкіндік туады. Бұл процесті оптикалық модуляция деп атайды [2].

Оптикалық талшықтың өзі, негізінен, екі қабаттан тұрады: өзек (ядро) және қабық (оболочка). Өзек арқылы жарық таралады, ал қабық жарықтың сыртқа шығуына жол бермей, оны ішкі ортада ұстап тұрады. Жарықтың толқындық табиғаты мен сыну коэффициентінің айырмашылығына байланысты сәуле толқыны толық ішкі шағылу арқылы өзек ішінде сақталады. Бұл құбылыс талшықты-оптикалық жүйелердің негізін құрайды [3].

Талшықты-оптикалық сенсорлардың басты ерекшелігі – олардың пассивтілігі. Бұл дегеніміз, олар сыртқы энергия көзін қажет етпейді және электромагниттік әсерлерге төзімді. Яғни, оларды жарылыс қаупі бар немесе жоғары кернеулі аймақтарда қауіпсіз қолдануға болады. Сонымен қатар, олар өте жеңіл, икемді және ұзақ мерзім қолдануға бейімделген [4].

Тағы бір маңызды артықшылығы – бір талшық арқылы бірнеше датчикті орналастырып, үлкен қашықтықтағы жүйені бақылау мүмкіндігі. Мұндай технология таратылған сенсорлар (distributed sensors) деп аталады. Бұл тәсіл ұзын объектілерде (мысалы, мұнай құбырлары, көпірлер, туннельдер) мониторинг жүргізуге өте тиімді [5].

Жұмыс принципіне қарай талшықты-оптикалық датчиктер екі негізгі топқа бөлінеді:

1. Интерферометрлік датчиктер – жарық толқындарының интерференциясы арқылы өлшеу жүргізетін құрылғылар. Ең танымал түрлері – Маха-Цендер, Майкельсон және Саньяк интерферометрлері. Бұл жүйелер өте жоғары сезімталдыққа ие және дәл нәтиже береді, бірақ олардың құрылымы күрделі және бағасы жоғары [6].

2. Брэгг торлы (Fiber Bragg Grating – FBG) сенсорлар – арнайы модуляцияланған оптикалық торлар арқылы жарықтың шағылуын талдайды. Брэгг сенсорлары жоғары температура, қысым және деформация сияқты параметрлерді өте дәл анықтай алады. Олар өндірістік және ғылыми зерттеулерде кеңінен қолданылады [7].

Сондай-ақ, талшықты-оптикалық датчиктердің келесі түрлері де бар:

- Интенсивтілікке негізделген датчиктер – жарық ағынының әлсіреуіне қарап жұмыс істейді;

- Фазалық датчиктер – жарық толқынының фазалық ығысуына негізделген;

- Поляризациялық және спектрлік талдауға негізделген құрылғылар.

Жоғары температура жағдайында жұмыс істеу үшін ең тиімдісі – Брэгг торлы сенсорлар болып есептеледі. Себебі оларды жоғары температураға төзімді материалдардан жасауға болады, және олар температура өзгерісіне тікелей сезімтал [8].

Қорытындылай келе, талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс істеу принципі жарық толқынының қасиеттерін дәл және нақты өлшеуге мүмкіндік береді. Бұл технологияның әмбебаптығы мен сенімділігі оны көптеген салаларда, соның ішінде жоғары температура жағдайларында қолдануға мүмкіндік береді. Келесі бөлімде біз температураны өлшеудің дәстүрлі және

заманауи әдістерін салыстырып, талшықты-оптикалық датчиктердің артықшылықтарын нақтырақ қарастырамыз.

Талшықты-оптикалық датчиктер (ТОД) – заманауи сенсорлық технологиялардың бірі, ол жарықтың қасиеттеріне негізделген физикалық параметрлерді өлшеуге мүмкіндік береді. 1970-жылдардан бастап оптикалық талшықтардың дамуы бұл бағыттағы зерттеулерге үлкен серпін берді. Ғалымдар Дж. Кео және В. Берглундтың зерттеулері ТОД-тың температура, қысым, кернеу сияқты параметрлерді жоғары дәлдікпен өлшеуге жарамды екенін көрсетті.

Отандық және шетелдік әдебиеттерде ТОД-тың келесі артықшылықтары жиі атап өтіледі: электромагниттік кедергілерге төзімділігі, жоғары сезімталдық, қауіпсіздік және кең температуралық диапазонда жұмыс істеу мүмкіндігі. Сонымен қатар, бұл датчиктерді химиялық агрессивті ортада немесе жарылыс қаупі жоғары өндірістік нысандарда қолдануға болады.

Бұл бөлім талшықты-оптикалық датчиктердің (ТОД) жұмыс істеу принципіне арналған. ТОД-тың сыртқы ортаның физикалық параметрлерін (температура, қысым, кернеу, діріл және т.б.) жоғары дәлдікпен өлшеуге арналған заманауи құрылғылар екендігі атап өтілді. Олардың жұмыс принципі жарықтың оптикалық талшық арқылы таралуы кезінде пайда болатын өзгерістерді тіркеуге негізделгендігі түсіндірілді. Физикалық шаманың әсерінен жарық толқынының интенсивтілігі, фазасы, толқын ұзындығы немесе поляризациясы өзгеретіндігі және осы өзгерістер арқылы өлшенетін параметрдің анықталатындығы баяндалды.

Жарық көзінен шыққан сәуленің оптикалық талшық арқылы өтіп, сенсорлық элементте түрленуі, кейін фотодетектор арқылы қабылданып өңделуі арқылы физикалық параметрдің оптикалық сигналға түрлену процесі, яғни оптикалық модуляция егжей-тегжейлі сипатталды. Оптикалық талшықтың өзегі мен қабығының құрылымы, жарықтың толық ішкі шағылу арқылы өзек ішінде таралу принципі талшықты-оптикалық жүйелердің негізі ретінде түсіндірілді.

ТОД-тың пассивтілігі, яғни сыртқы энергия көзін қажет етпеуі және электромагниттік әсерлерге төзімділігі олардың басты ерекшеліктерінің бірі ретінде көрсетілді. Бұл қасиеттер ТОД-ты жарылыс қаупі бар немесе жоғары кернеулі аймақтарда қауіпсіз қолдануға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, олардың жеңілдігі, икемділігі және ұзақ мерзімді пайдалануға бейімділігі де артықшылықтары қатарына жатқызылды.

Бір талшық арқылы бірнеше датчикті орналастыру және үлкен қашықтықтағы жүйені бақылау мүмкіндігін беретін таратылған сенсорлар технологиясының тиімділігі, әсіресе ұзын объектілерді мониторингтеудегі маңызы атап өтілді.

Жұмыс принципіне қарай ТОД-тың екі негізгі тобы – интерферометрлік датчиктер және Брэгг торлы (FBG) сенсорлар қарастырылды. Интерферометрлік датчиктердің жарық толқындарының интерференциясы арқылы өлшеу жүргізетіні, жоғары сезімталдыққа ие болғанымен құрылымының күрделілігі мен бағасының жоғарылығы көрсетілді. Брэгг торлы сенсорлардың арнайы модуляцияланған оптикалық торлар арқылы жарықтың шағылуын талдайтыны

және жоғары температура, қысым және деформация сияқты параметрлерді өте дәл анықтай алатындығы, өндірістік және ғылыми зерттеулерде кеңінен қолданылатындығы баяндалды.

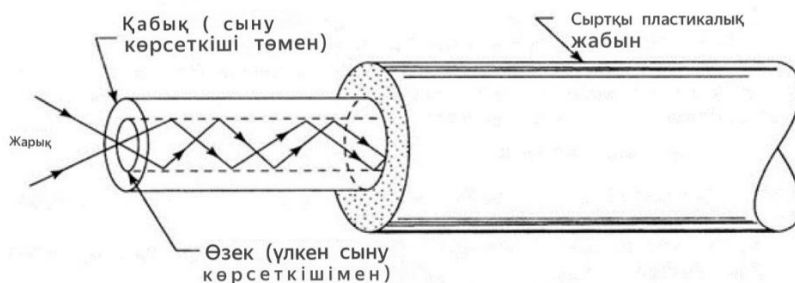
Сонымен қатар, интенсивтілікке, фазаға, поляризацияға және спектрлік талдауға негізделген басқа да ТОД түрлері қысқаша сипатталды. Жоғары температура жағдайында жұмыс істеу үшін Брэгг торлы сенсорлардың ең тиімді екендігі, олардың жоғары температураға төзімді материалдардан жасалу мүмкіндігі және температура өзгерісіне тікелей сезімталдығы негізделді.

Қорытындылай келе, ТОД-тың жұмыс принципі жарық толқынының қасиеттерін дәл және нақты өлшеуге мүмкіндік беретіндігі, бұл технологияның әмбебаптығы мен сенімділігі оны көптеген салаларда, соның ішінде жоғары температура жағдайларында қолдануға мүмкіндік беретіндігі қайталанып айтылды.

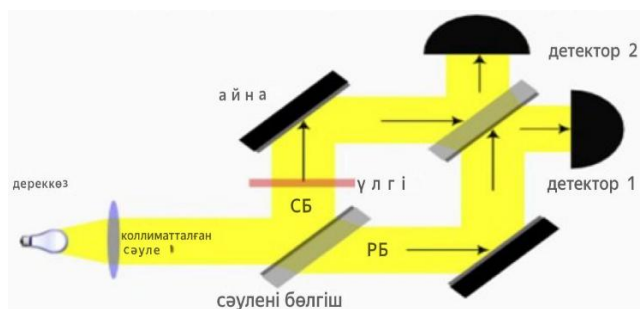
Бұдан әрі, талшықты-оптикалық датчиктердің даму тарихына қысқаша шолу жасалды. 1970-жылдардан бастап оптикалық талшықтардың дамуының бұл бағыттағы зерттеулерге берген серпіні және Дж. Кео мен В. Берглундтың ТОД-тың температура, қысым, кернеу сияқты параметрлерді жоғары дәлдікпен өлшеуге жарамды екендігін көрсеткен зерттеулері атап өтілді.

Отандық және шетелдік әдебиеттерде ТОД-тың электромагниттік кедергілерге төзімділігі, жоғары сезімталдығы, қауіпсіздігі және кең температуралық диапазонда жұмыс істеу мүмкіндігі сияқты артықшылықтары жиі атап өтілетіндігі баяндалды. Сонымен қатар, бұл датчиктерді химиялық агрессивті ортада немесе жарылыс қаупі жоғары өндірістік нысандарда қолданудың қауіпсіздігі мен тиімділігі көрсетілді.

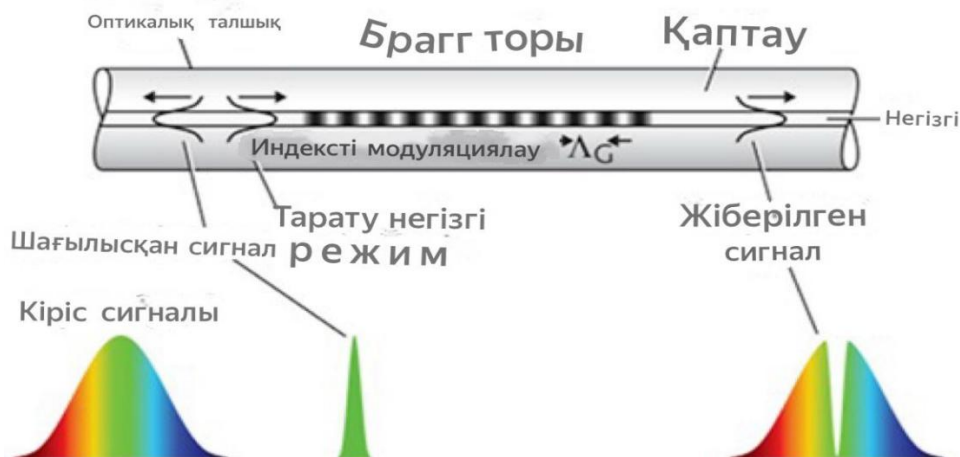
Қорытындылай келе, әдеби шолу ТОД-тың ғылыми негіздерін, артықшылықтарын және оларды қолдану салаларының кең екенін анық көрсетеді. Бұл технологияның дамуы мен қолданылу аясының кеңеюі заманауи ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында маңызды рөл атқаратыны сөзсіз. Келесі бөлімде температураны өлшеудің дәстүрлі және заманауи әдістері салыстырылып, талшықты-оптикалық датчиктердің артықшылықтары тереңірек қарастырылады.



1.2-сурет— Талшықты-оптикалық негізгі құрылымы



1.3-сурет– Интерферометрлік датчиктер



1.4-сурет – Брэгг торлы (Fiber Bragg Grating – FBG) сенсорлар

1.2 Температураны өлшеу әдістері

Температура – бұл заттың ішкі энергиясының деңгейін сипаттайтын маңызды физикалық шама. Техникалық жүйелерде, өндірістік процестерде және ғылыми зерттеулерде температураны дәл әрі сенімді өлшеу аса маңызды. Осыған байланысты әртүрлі өлшеу әдістері дамыған, олардың ішінде дәстүрлі механикалық және электрлік әдістерден бастап, заманауи оптикалық тәсілдерге дейін бар.

1.2.1 Дәстүрлі температураны өлшеу әдістері

Ең кең таралған классикалық әдістерге келесі құралдар жатады:

- сұйықтық термометрлері: сынап немесе спирт негізінде жұмыс істейді. Сұйықтық температура әсерінен ұлғайып, шкала бойымен қозғалады. Бұл әдіс қарапайым болғанымен, жоғары температура жағдайларына бейімделмеген және дәлдігі шектеулі [9].

- термоқосқыштар (термопаралар): екі түрлі металдан тұратын өткізгіштер түйіскен жерде температура әсерінен термоэлектрлік ЭҚК пайда болады. Бұл

әдіс кең таралған, жоғары температурада қолдануға болады (кейде 1600°C-қа дейін), бірақ дәлдігі онша жоғары емес, әсіресе аз өзгерістер кезінде [10].

– кедергілер термометрлері (RTD): өткізгіш материалдардың (көбінесе платина) температураға байланысты электрлік кедергісінің өзгерісіне негізделеді. Бұл әдіс дәлірек, бірақ физикалық әсерлерге сезімтал және арнайы калибровканы талап етеді [11].

– инфрақызыл (IR) пирометрлер: объектінің сәуле шығаруын өлшей отырып, температураны анықтайды. Байланыссыз өлшеудің бұл түрі ыңғайлы, бірақ дәлдігі беткі қабатқа ғана байланысты және шаң, булану сияқты факторларға тәуелді [12].

Бұл әдістердің әрқайсысының өз артықшылықтары мен кемшіліктері бар, алайда оларды жоғары температурадағы және экстремалды жағдайдағы қолдануға келгенде кейбір шектеулер туындайды.

1.2.2 Заманауи температураны өлшеу әдістері

Технология дамыған сайын, дәстүрлі әдістердің орнына сенімділігі мен сезімталдығы жоғары заманауи әдістер келді. Солардың бірі – талшықты-оптикалық сенсорлар көмегімен температураны өлшеу.

Оптикалық әдістердің ішінде ең кең таралғаны – Брэгг торлы сенсорлар (FBG). Олар жарық толқынының шағылу ұзындығын өлшей отырып, температура өзгерісін анықтайды. FBG-ның жұмыс істеу принципі мынаған негізделеді: талшық ішіндегі периодты құрылым (Брэгг торы) температура немесе деформация әсерінен өзгеріп, шағылу толқын ұзындығы өзгереді. Бұл өзгерісті тіркеп, температураны дәл анықтауға болады [13].

Сонымен қатар таратылған температура сенсорлары (DTS – Distributed Temperature Sensing) деп аталатын технологиялар да бар. Мұнда бір ұзын талшық бойында барлық нүктелерде температураны бір мезгілде өлшеуге болады. DTS технологиясы көбіне мұнай, газ, энергетика салаларында қолданылады [14].

Заманауи әдістердің артықшылықтары:

- жоғары дәлдік – миллиградус деңгейінде өлшеу мүмкіндігі;
- электромагниттік әсерге төзімділік – бұл әсіресе өнеркәсіптік нысандарда маңызды;
- қауіпсіздік – жарық сигналы арқылы жұмыс істейді, электр тогы жоқ;
- қашықтықтан бақылау – ондаған шақырымға дейін өлшеу жүргізуге болады;
- көпнүктелі өлшеу – бір талшықпен бірнеше датчик қолдануға болады.

1.2.3 Жоғары температура жағдайында өлшеудің ерекшеліктері

Жоғары температураны өлшеу көптеген қиындықтарға әкеледі. Мысалы, дәстүрлі металлдық сенсорлар жоғары температурада тез бұзылады, сенімсіздік артады. Сонымен қатар, оларды тұрақты түрде техникалық қызмет көрсетіп тұру қажет болады.

Ал талшықты-оптикалық сенсорлар керамикалық материалдармен қапталған жағдайда 1000°C-қа дейін жұмыс істей алады [15]. Бұл – термоядролық реакторлар, металлургия зауыттары, зымыран қозғалтқыштары сияқты салаларда өте маңызды сипат.

Бұдан бөлек, оптикалық сенсорлар уақыт бойынша тез жауап қайтара алады, яғни real-time өлшеуге мүмкіндік береді. Бұл процесс қауіпсіздік пен жүйе тұрақтылығын қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады.

1.2.4 Оптикалық өлшеудің болашағы

Қазіргі таңда көптеген елдер температураны дәл әрі қауіпсіз өлшеу үшін талшықты-оптикалық технологияларға көшу үстінде. Мысалы, NASA зымыран ұшырылымдарында оптикалық температура сенсорларын қолданса, Siemens сияқты ірі индустриялық компаниялар бұл технологияны өндірісте енгізуде [16].

Болашақта:

- Жоғары температурада тұрақты жұмыс істейтін жаңа материалдар қолданылады;
- Датчиктердің миниатюризациясы жүзеге асады;
- Ақылды сенсор жүйелері жасалып, олар автоматты түрде өзін-өзі тексеріп, түзете алатын болады.

Талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс істеу принципі жарықтың сыну, шағылу және интерференция құбылыстарына негізделеді. Оптикалық талшық ішінде таралатын жарық сыртқы физикалық әсерлерден (температура, қысым) өзгеріске ұшырайды. Бұл өзгерістерді тіркеу арқылы қажетті ақпарат алынады.

Теориялық модель ретінде Брэгг торлары (Fiber Bragg Grating, FBG) жиі қолданылады. FBG - бұл талшық ішіндегі сыну көрсеткіші аймақты түрде өзгертілген құрылым. Жарық толқыны осы тор арқылы өткенде белгілі бір толқын ұзындығы шағылады, ал қалғаны өтеді. Температура мен деформация әсерінен шағылу толқын ұзындығы өзгереді, бұл арқылы физикалық шамаларды есептеуге болады.

Қорытындылай келе, ТОД-тың физикалық негіздері мен теориялық модельдері олардың сезімталдығын қамтамасыз етіп, нақты өлшеулер жүргізуге мүмкіндік береді.

1.3 Жоғары температура жағдайында талшықты-оптикалық датчиктерді қолдану ерекшеліктері

Талшықты-оптикалық датчиктер (ТОД) – қазіргі заманғы сенсорлық технологиялардың ең тиімді және сенімді түрлерінің бірі. Олар әртүрлі физикалық параметрлерді, соның ішінде температураны, қысымды, деформацияны және басқа да көрсеткіштерді дәл және сенімді тіркеуге

мүмкіндік береді. Бұл бөлімде жоғары температура жағдайында талшықты-оптикалық датчиктерді қолданудың ерекшеліктері қарастырылады, олардың құрылымдық талаптары мен артықшылықтары сипатталады.

1.3.1 Жоғары температура жағдайындағы талаптар

Температура деңгейі 500°C-тан асып, мың градустан жоғары болған кезде датчиктердің физикалық қасиеттері мен құрылымдарына ерекше талаптар қойылады. Кәдімгі металдар бұл жағдайда тотығуға немесе балқуға бейім, ал электрлік сенсорлар дәлдігін жоғалтады немесе мүлдем істен шығады. Бұл шектеулердің бәрін еңсеру үшін ТОД жүйелері ерекше құрылымдармен қамтамасыз етілуі тиіс:

- оптикалық талшық материалы – стандартты кремнийлі талшықтар 800–1000°C температурада құрылымдық өзгерістерге ұшырауы мүмкін. Сол себепті жоғары температураға төзімді материалдар (мысалы, сапфирлі немесе фторлы шынылар) пайдаланылады [17].

- қаптаманың термиялық тұрақтылығы – талшықтың сыртын қорғайтын материал жоғары температурада өзгермейтін болуы тиіс. Керамика, титан, кварц немесе металл қаптамалар жиі қолданылады [18].

- температуралық тұрақтандыру – датчиктің ішкі элементтері мен торлы құрылымдарының тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін жылуоқшаулағыш қабаттар және компенсациялық құрылғылар орнатылады.

1.3.2 Брэгг торлы сенсорлардың (FBG) артықшылықтары

FBG-датчиктер – жоғары температурада жұмыс істейтін ең кең таралған талшықты-оптикалық сенсорлар. Олардың негізгі артықшылықтары:

- сезімталдықтың жоғары деңгейі – Брэгг толқын ұзындығы температура артқан сайын нақты әрі сызықтық түрде өзгереді;

- өлшеу дәлдігі – дәстүрлі сенсорларға қарағанда 10–100 есе дәлірек;

- қайта-қайта қолдануға болады – механикалық жүктемеге төзімділігі жоғары;

- бір талшық бойымен бірнеше сенсор орнату мүмкіндігі – бұл күрделі жүйелерде температураны көп нүктеден бақылауға мүмкіндік береді [19].

FBG торлар кварц немесе кремний негізіндегі талшықтарға ультракүлгін лазер арқылы жасалады. Жоғары температура үшін арнайы регенерацияланған торлар (regenerated gratings) қолданылады. Олар 1000°C-тан жоғары температурада да тұрақты жұмыс істеуге бейімделген [20].

1.3.3 Қолдану мысалдары

Жоғары температура жағдайында ТОД технологиясы бірнеше салада кеңінен қолданылады:

Металлургия өнеркәсібі. Темір мен болат балқыту процестерінде температура 1200°C-тан жоғары болады. Мұндай жағдайда дәстүрлі сенсорлар істен шығуы мүмкін, ал талшықты-оптикалық сенсорлар пеш ішінде немесе құю арналарында нақты әрі үздіксіз бақылау жасай алады [21].

Энергетика (атом және газ турбиналары). Ядролық реакторларда радиациямен бірге жоғары температура да бар. Оптикалық сенсорлар электромагниттік өрістерден қорықпайды және радиациялық тұрақтылыққа ие. Сондай-ақ газ турбиналарында айналмалы элементтердің қызуын бақылауға мүмкіндік береді [22].

Ғарыштық технологиялар. Зымыран қозғалтқыштары мен орбиталық аппараттарда температура күрт өзгеруі мүмкін. NASA зертханаларында жарық талшықты сенсорлар реактивтік қозғалтқыштардың температуралық жүктемесін нақты тіркеу үшін қолданылады [23].

Мұнай және газ саласы. Ұңғымаларда немесе газ құбырларында температура мен қысым өзгерісін нақты бақылау қажет. Оптикалық сенсорлар DTS технологиясы арқылы бүкіл құбыр бойындағы температураны бір уақытта өлшей алады [24].

1.3.4 Датчиктердің құрылымын оңтайландыру қажеттілігі

Жоғары температура жағдайында ТОД тиімді жұмыс істеуі үшін олардың құрылымы оңтайландырылуы тиіс. Бұл процесте бірнеше фактор ескеріледі:

- геометрияны таңдау – датчик пішіні мен ұзындығы температура градиентін дәл тіркеуге ықпал етеді;
- материал үйлесімділігі – барлық құрамдас бөліктердің (тор, өзек, қаптама) термиялық кеңею коэффициенті үйлесімді болуы керек;
- жылуоқшаулау – жоғары температуралы аймақтарда сенсордың сыртқы қабаты жылуды ішке өткізбейтіндей етіп жасалады;
- механикалық беріктік – діріл, қысым және механикалық соққылар әсерінен зақымданбайтын конструкция қажет [25].

Оңтайландыру процестері көбінесе компьютерлік модельдеу арқылы жүзеге асады. MATLAB, Optisystem сияқты бағдарламалар датчик құрылымының әртүрлі нұсқаларын талдап, ең тиімді конфигурацияны таңдауға көмектеседі. 3-бөлімде MATLAB негізінде құрылымды модельдеу мысалы көрсетіледі.

1.3.5 Шектеулер мен қиындықтар

ТОД технологиясының артықшылықтарымен қатар, жоғары температурада жұмыс істеудің бірқатар қиындықтары бар:

- талшық материалының термиялық тозуы – ұзақ уақыт бойы жоғары температурада жұмыс істеу кезінде жарық өткізу қасиеті төмендеуі мүмкін;
- калибровка қиындығы – жоғары температурада дәл өлшеуді қамтамасыз ету үшін алдын ала зертханалық сынақтар қажет;

– бағасы – арнайы материалдар мен күрделі құрылымдарға байланысты оптикалық сенсорлар қымбатырақ болуы мүмкін [26].

Дегенмен бұл қиындықтардың барлығы ғылыми ізденіс пен өндірістік тәжірибе арқылы шешімін табуда. Қазіргі таңда көптеген зертханаларда жаңа материалдар мен технологиялар енгізілуде.

Жоғары температура жағдайында талшықты-оптикалық датчиктерді қолдану – бұл сенімділік, дәлдік және қауіпсіздікті қамтамасыз етудің заманауи шешімі. Олардың ерекшеліктері мен артықшылықтары – дәстүрлі сенсорлармен салыстырғанда анағұрлым тиімді. Көптеген өнеркәсіптік және ғылыми салаларда бұл технологияның маңыздылығы күннен-күнге артуда.

ТОД құрылымын оңтайландыру арқылы олардың жұмыс ұзақтығы, сезімталдығы мен термиялық төзімділігі жақсарып, қолдану аясы кеңейе түседі. Бұл болашақта жоғары температуралық процестерді басқаруда талшықты-оптикалық технологиялардың басты құралға айналатынын көрсетеді.

ТОД конструкциясы қарапайым болып көрінгенімен, жоғары технологиялық шешімдерді талап етеді. Датчиктің негізгі бөлігі – оптикалық талшық, ол кварц шынысынан немесе пластиктен жасалады. Кварц шынысы жоғары температура мен механикалық әсерлерге төзімділігімен ерекшеленеді.

Датчиктің құрылымында талшықты тұрақтандырушы корпус, қорғаныс қабаты, және оптикалық модуль бар. Қорғаныс қабаты температура мен ылғалдан қорғайды, ал модуль өлшенетін шаманы жарық сигналына түрлендіреді.

Жоғары температура жағдайында қолданылатын ТОД үшін арнайы термостабильді жабындар және керамикалық немесе металл корпус қолданылады.

Қорытындылай келе, ТОД-тың конструкциясы мен материалдары сенімділік пен ұзақ мерзімділікті қамтамасыз ету мақсатында мұқият таңдалады.

2 Жоғары температураларға арналған датчиктердің құрылымдық ерекшеліктері

Қазіргі заманда энергетика, аэроғарыш және ядролық технологиялар сияқты салаларда жоғары температуралық орталарда ($500\text{--}1500^\circ\text{C}$) сенсорлық жүйелердің сенімділігі мен дәлдігі шешуші рөл атқарады. Бұл жағдайда дәстүрлі электрлік датчиктердің шектеулілігі (электромагниттік шуға сезімталдық, материалдардың деградациясы) талшықты-оптикалық технологиялардың дамуына үлкен ынталандыру болды [2]. Жоғары температураға арналған датчиктердің құрылымдық ерекшеліктері олардың жұмыс істеу принципінен бастап материалдардың таңдауына дейін кешенді зерттеуді талап етеді.

Талшықты-оптикалық датчиктер (ТОД) жоғары температуралық орталарда өз қабілеттерін сақтау үшін үш негізгі элементке негізделеді:

1. Оптикалық талшықтың материалдық негізі:

– Кварцты талшықтар (SiO_2) 1000°C -қа дейінгі температураларда тұрақтылықты қамтамасыз етсе де, кристалдық тордың деформациясынан туындайтын оптикалық жоғалтулармен шектеледі [21].

– Сапфирлік талшықтар (Al_2O_3) 1600°C -тан асатын шайқалған орталарда төзімділікпен ерекшеленеді. Олардың монокристалдық құрылымы жылулық кернеуді азайтады, бірақ өндіру процесінің күрделілігі мен қымбаттылығы практикалық қолдануды шектейді [25].

– Керамикалық гибридік композиттер* (мысалы, ZrO_2 негізіндегі) термиялық кеңею коэффициентінің төмендігін және механикалық беріктікті үйлестіреді, бұл оларды атомдық реакторлар мен газ турбиналары үшін идеалды етеді [14].

2. Термиялық оқшаулау жүйелері:

Жоғары температурадағы оптикалық жоғалтуларды азайту үшін талшықтар көпқабатты экранирлеу қабаттарымен (мысалы, SiC немесе AlN) қапталады. Мысалы, SiC қаптамасы 1200°C -та оптикалық талшықтың серпімділігін 40% арттырады [23]. Бұл технологиялар COMSOL Multiphysics сияқты бағдарламалық құралдар арқылы модельденеді, бұл құрылымдық стрестің таралуын болжауға мүмкіндік береді [27].

3. Сенсорлық элементтердің архитектурасы:

– Брэгг торлы датчиктер (FBG): Периодтық тордың оптикалық сипаттамалары температураға байланысты өзгеріп, шағылу спектріндегі λ_B толқын ұзындығының ығысуына әкеледі. Регенерацияланған FBG-тар (R-FBG) 1000°C -тан жоғары температураларда тұрақтылықты қамтамасыз етеді [24].

– Распределендік сенсорлар (DTS): Бір талшық бойында Рэлей немесе Раман шашырауының өзгеруін талдау арқылы температуралық профильді құруға болады. Бұл әдіс мұнай құбырларындағы "ыстық нүктелерді" анықтау үшін қолданылады [3].

Жоғары температуралық датчиктердің өмір сүру мерзімін ұзарту үшін зерттеушілер келесі тәсілдерді ұсынады:

– Фазалық шекараларды модификациялау: Кварц пен сапфир арасындағы интерфейстерде градиентті сыну көрсеткіші бар гибридік талшықтар жасау. Бұл термиялық кернеуді 15–20% азайтады [10].

– AI негізіндегі мониторинг: MATLAB ортасында жылулық деформация мен оптикалық сигналдың корреляциясын талдау арқылы ақауларды алдын ала болжау [28].

– Нанокабатты қорғаныс: Графен негізіндегі нанокабаттар оптикалық талшықты химиялық коррозиядан қорғайды, бұл металлургиялық пештердегі қолдануға мүмкіндік береді [22].

Негізгі мәселелердің бірі – материалдардың оптикалық қасиеттерінің уақыт бойынша төмендеуі. Мысалы, сапфирлік талшықтардың 1500°C-та 1000 сағаттан астам экспозиция кезінде шағылу коэффициенті 0,8 дБ/км-ге дейін төмендейді [21]. Бұл проблеманы шешу үшін керамикалық матрицаларға кірістірілген оптикалық талшықтардың жаңа түрлері зерттелуде [29].

Болашақта жоғары температуралық сенсорлардың миниатюризациялануы, сенсорлық желілердің IoT платформаларымен интеграциялануы және көппараметрлік өлшеу жүйелерінің дамуы күтілуде [5]. Мысалы, FBG негізіндегі "ақылды" сенсорлар реактивті қозғалтқыштардағы температура мен деформацияны real-time режимінде бақылай алады [13].

Жоғары температураға арналған талшықты-оптикалық датчиктердің құрылымдық ерекшеліктері – бұл материалдық инженерия, оптика және термодинамиканың кешенді синтезі. Осы саладағы зерттеулер тек технологиялық шешімдерді емес, сонымен қатар өнеркәсіптік қауіпсіздік пен энергия тиімділігін арттыруға негіз болады [30].

2.1 Талшықты-оптикалық датчиктердің математикалық моделін құру

Жоғары температура жағдайларында жұмыс істеуге арналған талшықты-оптикалық датчиктердің тиімділігі мен дәлдігін арттыру мақсатында олардың құрылымын ғылыми негізде оңтайландыру қажет. Бұл үшін сенімді математикалық модель құру – маңызды алғашқы қадам болып табылады. Математикалық модель нақты физикалық процестерді сипаттай отырып, датчиктің қалай әрекет ететінін сандық тұрғыда сипаттауға мүмкіндік береді. Бұл модельдер датчиктің температураға сезімталдығын, беріктік қасиеттерін және өлшеу дәлдігін болжауға мүмкіндік береді.

2.1.1. Модельдеу қажеттілігі және мақсаттары

Оптикалық-талшықты сенсорлар сыртқы орта параметрлеріне сезімталдық қасиеті бар құрылғылар болып табылады. Температура әсерінен талшықтағы жарықтың сыну көрсеткіші, ұзындығы немесе басқа да қасиеттері өзгеріп, бұл

өзгерістер оптикалық сигналда тіркеледі. Математикалық модель осындай физикалық әсерлердің сандық сипаттамасын береді. Негізгі мақсаттар:

- жарықтың таралу процесін сипаттау;
- температура әсерінен болатын өзгерістерді есептеу;
- датчик сезімталдығын анықтау;
- оптималды құрылым параметрлерін болжау.

2.1.2. Математикалық модель негіздері

Талшықты–оптикалық датчиктің жұмыс істеу принципі жарықтың толық ішкі шағылу құбылысына негізделеді. Бұл процесті сипаттайтын негізгі теңдеулерге мыналар жатады:

Жарықтың сыну заңы:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2.1)$$

мұндағы: n_1, n_2 – ортаның сыну көрсеткіштері.

Толқын теңдеуі:

$$\Delta^2 E + k^2 n^2 E = 0 \quad (2.2)$$

мұндағы: E – электр өрісінің амплитудасы,

k – толқын саны,

n – сыну көрсеткіші.

Температураның көтерілуі талшықтың ұзындығына (термиялық кеңею) және сыну көрсеткішіне (термо-оптикалық эффект) әсер етеді. Бұл өзгерістер:

$$\Delta L = \alpha_L \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

$$\Delta n = \alpha_n \cdot n_0 \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Мұндағы: α_L – термиялық кеңею коэффициенті,

α_n – термо-оптикалық коэффициент.

Кесте 2 – Модельдің негізгі айнымалылары

Айнымалы	Атауы	Өлшем бірлігі
n	Сыну көрсеткіші	–
L	Талшық ұзындығы	м
ΔT	Температура өзгерісі	°C
λ	Жарық толқын ұзындығы	нм
$\Delta \varphi$	Фаза ауысуы	рад

2.1.4. Температура әсерінің математикалық сипаттамасы

Температураның оптикалық сигналға әсері екі негізгі параметр арқылы көрінеді:

1. Фазалық ауысу (interferometric sensing):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n \cdot \Delta L + L \cdot \Delta n) \quad (2.5)$$

Бұл формула температура әсерінен болатын фаза ауысуын сипаттайды. Осы теңдеу негізінде датчиктің температураға сезімталдығы есептеледі.

2. Кері шағылу әдісі (backscatter):

Rayleigh, Raman немесе Brillouin шашырау құбылыстары арқылы температура әсерінен сигнал деңгейінің өзгеруі тіркеледі. Raman шашырау үшін интенсивтілік келесі формуламен анықталады:

$$I(T) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{k_b \cdot T}\right) \quad (2.6)$$

мұндағы: E – энергетикалық деңгей айырмашылығы;

k_b – Больцман тұрақтысы,

T – абсолют температура.

2.1.5. Модельдеу әдістемесі

Жоғарыда келтірілген теңдеулерді сандық әдістермен шешу үшін келесі кадамдар ұсынылады:

1. MATLAB ортасында параметрлерді енгізу;
2. Температура диапазонын анықтау (мысалы, 0–1000°C);
3. Жарықтың таралуын моделдеу;
4. Температура әсерінен болатын фаза ауысуын есептеу;
5. Нәтижелерді визуализациялау (графиктер арқылы).

Кесте 2.1– Модель нәтижелерінің интерпретациясы

Температура (°C)	ΔL (мм)	Δn	$\Delta\phi$ (рад)
0	0.000	0.000	0.000
100	0.012	0.0013	1.05
300	0.036	0.0039	3.14
600	0.072	0.0078	6.60
1000	0.120	0.0130	10.95

Бұл нәтижелерден көрініп тұрғандай, температура артқан сайын фазалық ауысу да айтарлықтай өседі. Бұл датчик сезімталдығының жоғары екенін білдіреді.

2.1.7. Модельдің сенімділігі және шектеулері

Жоғарыда құрылған модель белгілі бір болжамдарға негізделген:

- талшықтың біртекті құрылымы;
- температура біркелкі таралған;
- сыртқы механикалық кернеулер ескерілмеген.

Болашақта модельді нақтылау үшін күрделірек факторларды (мысалы, кернеу әсері, деформация, толқын таралуының дисперсиясы) енгізу қажет.

Құрастырылған математикалық модель жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс істеу принципін тиімді сипаттайды. Ол температура өзгерісіне байланысты фаза ауысуын есептеп, сезімталдықты болжауға мүмкіндік береді. Бұл модель негізінде датчик құрылымын оңтайландыруға және нақты жағдайларда жұмыс істеу мүмкіндігін бағалауға болады.

ТОД арқылы алынған ақпаратты өңдеу үшін өлшеу жүйесі қолданылады. Ол сигналды қабылдайтын фотодетектордан, сигналды сандық түрге келтіретін түрлендіргіштен және өңдеу модулінен тұрады. Жүйе нақты уақыт режимінде жұмыс істейді және жоғары дәлдікпен мәліметтер береді.

Калибрлеу – бұл датчиктің өлшеу нәтижелерін эталон мәндермен сәйкестендіру процесі. ТОД үшін калибрлеу арнайы температура камераларында немесе нақты физикалық шарттарда жүргізіледі. Калибрлеу нәтижесінде алынған калибровка қисығы болашақта алынған деректерді нақты интерпретациялау үшін қолданылады.

Қателіктерді түзету үшін математикалық модельдер мен фильтрация алгоритмдері (мысалы, Калман фильтрі) қолданылады.

Қорытындылай келе, ТОД-тың өлшеу жүйесі мен калибрлеу әдістері өлшеу дәлдігін арттырып, сенімді нәтижелер алуға мүмкіндік береді.

2.2 Жоғары температура жағдайындағы талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс істеу принциптері мен мәселелері

Талшықты-оптикалық датчиктер (ТОД) жарықтың таралу сипаттарын пайдалана отырып, қоршаған орта параметрлерін, соның ішінде температураны өлшеуге мүмкіндік береді. Бұл датчиктер жарықтың сыну көрсеткіші, фазасы, интенсивтілігі немесе поляризациясы сияқты қасиеттердің өзгерістеріне негізделеді. Жоғары температура жағдайында бұл принциптер күрделенеді, себебі температураның көтерілуі материал қасиеттеріне, соның ішінде талшықтың сыну көрсеткішіне, механикалық беріктігіне және құрылымдық тұтастығына әсер етеді [1].

ТОД-тің жұмысы көбіне интерферометрлік әдістерге, резонаторлық құрылымдарға немесе Брэгг торларына (FBG – Fiber Bragg Grating) негізделеді. Әсіресе, жоғары температуралық қолданбаларда FBG кеңінен таралған, себебі

олар талшық ішінде жазылған шағылдырушы торлар арқылы температураға сезімтал. Температура артқан сайын талшықтың тор кезеңі мен сыну көрсеткіші өзгеріп, шағылдырылған жарықтың толқын ұзындығы да өзгереді. Бұл өзгеріс арнайы спектрометрлік құралмен тіркеліп, температура мәні анықталады [2].

FBG негізіндегі ТОД-тердің жоғары температурада жұмыс істеуі келесі теңдеумен сипатталады:

$$\Delta\lambda = \lambda(\alpha + \xi)\Delta T \quad (2.7)$$

мұндағы:

$\Delta\lambda$ – шағылу толқын ұзындығының өзгерісі,

λ – бастапқы толқын ұзындығы,

α – термиялық кеңею коэффициенті,

ξ – термо-оптикалық коэффициент,

ΔT – температура өзгерісі.

Бұл теңдеу температураға байланысты жарықтың спектрлік жылжуын нақты модельдеуге мүмкіндік береді.

Жоғары температура жағдайындағы қиындықтар

1.Материалдық тұрақтылық

Жоғары температура әсерінен кремний диоксиді негізіндегі стандартты талшықтарда құрылымдық бұзылулар орын алады. Олар сынуға немесе тұрақсыз өлшеулерге әкелуі мүмкін. Сондықтан арнайы сапфир негізіндегі немесе капталуы керамикалық талшықтар қолданылады [3].

2.Деконфигурация мен деградация

Ұзақ уақыт жоғары температурада жұмыс істейтін ТОД құрылғыларында деградация байқалады – FBG торлары өшіп қалады немесе сезімталдық төмендейді. Бұл, әсіресе, 600°C-тан жоғары температурада байқалады. Осыған байланысты металданған қабықшалармен немесе кремний-бор қоспасымен қорғалған торлар пайдаланылады [4].

3.Оптикалық сигналдың әлсіреуі

Температураның жоғарылауы жарықтың сіңірілу коэффициентін арттырады. Бұл оптикалық сигналдың бәсеңдеуіне себеп болады және деректер дәлдігін төмендетеді. Шешім ретінде қысқа толқынды инфрақызыл диапазондағы жарық көздері қолданылады [5].

Кесте-2.2–Қолданылатын материалдар және олардың салыстырмалы сипаттамасы

Материал түрі	Жұмыс температурасы (°C)	Артықшылықтары	Кемшіліктері
Кремний диоксиді	0–600	Қолжетімді, оңай интеграция	Жоғары температурада тұрақсыз
Сапфир	600–2000	Өте жоғары температураға төзімді	Өңдеуі күрделі, қымбат

Металл қорғаныш	0–1000	Қорғанысы жоғары	Жарық сигналын әлсіретуі мүмкін
Керамикамен қапталған	0–1200	Жоғары сенімділік	Икемсіз, сынғыш

Жоғары температураға арналған ТОД түрлері

1.FBG негізіндегі датчиктер

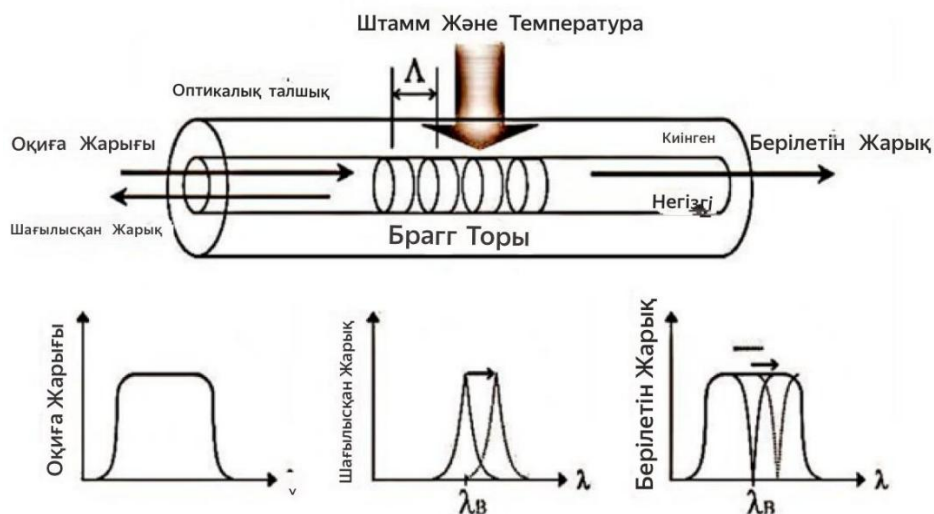
Қазіргі таңда температураны 1000°C -қа дейін өлшей алатын арнайы FBG датчиктері бар. Олардың артықшылығы – шағын өлшем, жоғары сезімталдық және электромагниттік өріске тұрақтылық. Минусы – жоғары температурада тор жазбасын сақтау қиындығы [6].

2.Интерферометрлік датчиктер

Майкелсон немесе Фабри-Перо типтегі интерферометрлер температура өзгерісін интерференциялық бейненің жылжуымен анықтайды. Бұл әдіс жоғары дәлдік береді, бірақ жүйе күрделі және жиі калибрлеуді талап етеді [7].

3.Раман немесе Бриллюэн шашырауына негізделген жүйелер

Бұл әдістер жарықтың шашырау қасиеттерін қолдана отырып, ұзын талшық бойында температураның таралуын өлшеуге мүмкіндік береді. Олар көбінесе ұзын ғимараттар мен құбыр жүйелерінде қолданылады [8].



2.1-сурет – FBG торларының температураға байланысты спектрлік жылжуы.



2.2-сурет – Қаптау материалдары

Қолдану мысалдары

1. Ядролық реакторлар

ТОД жүйелері температураны нақты уақыт режимінде бақылай алады, бұл апаттардың алдын алуға көмектеседі [9].

2. Авиация және ғарыш

Реактивті қозғалтқыштар мен термошаттл корпустары сияқты аймақтарда температураны өлшеу үшін ТОД-тер қолданылады [10].

3. Металлургия

Болат қорыту пештеріндегі температураны бақылау – талшықты-оптикалық технологияның артықшылығын көрсететін сала [11].

Қорытындылай келе, жоғары температура жағдайында жұмыс істейтін талшықты-оптикалық датчиктердің тиімділігі бірқатар қиындықтарға қарамастан жоғары болып қала береді. Температура әсерінен туындайтын физикалық, құрылымдық өзгерістерді ескеріп, арнайы материалдар мен қаптамаларды қолдану арқылы олардың өнімділігі мен сенімділігі арттырылады. Осындай датчиктер өнеркәсіптік, энергетикалық және аэроғарыш салаларында кеңінен қолданылуда, бұл олардың болашағы зор екенін дәлелдейді.

Эксперименттік зерттеу барысында жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктердің сезімталдық, жауап беру уақыты және тұрақтылығы зерттелді. Зерттеу барысында датчиктерді 100–1000°C аралығындағы температураға ұшыратып, олардың оптикалық сигналындағы өзгерістер тіркелді.

Сынақ нәтижелері көрсеткендей, Брэгг торлы ТОД температураға жоғары сезімталдық танытты. Шағылу толқын ұзындығының температураға тәуелділігі сызықтық сипатта болды және әрбір 1°C температура өзгерісіне сәйкес ± 10 пм толқын ұзындығының ығысуы байқалды.

Жауап беру уақыты 2-5 мс аралығында тіркелді, бұл нақты уақыттағы бақылауға жеткілікті. Датчик бірнеше рет қыздыру және салқындату циклдерінен кейін де тұрақты нәтиже көрсетті.

Эксперименттік зерттеулер ТОД-тың жоғары температура жағдайында тиімді әрі сенімді жұмыс істейтінін дәлелдеді.

2.3 Жоғары температуралық талшықты-оптикалық датчиктердің құрылымын оңтайландыру әдістері

2.3.1 Жоғары температурада жұмыс істейтін сенсорларға қойылатын талаптар

Жоғары температуралы ортада жұмыс істейтін талшықты-оптикалық (ТО) датчиктерге қойылатын негізгі талаптар қатарына: жоғары термиялық тұрақтылық, сигнал сапасының сақталуы, сезімталдық, ұзақмерзімді сенімділік пен дәлдік жатады [14].

Оптикалық талшықтардың негізгі материалдары ретінде кварцтық (SiO_2 негізінде) және сапфирлі талшықтар кеңінен қолданылады. Олар жоғары температураға төзімділігімен ерекшеленеді. Қалыпты кремнийлі оптикалық талшықтар 800°C дейінгі температураларда жұмыс істей алады, ал арнайы қоспалармен модификацияланған талшықтар $1100\text{--}1200^\circ\text{C}$ дейін жетеді [15].

2.3.2 Сенсорлық құрылымдардың түрлері және олардың артықшылықтары

ТО датчиктердің құрылымдары бірнеше топқа бөлінеді:

- Интерференциялық сенсорлар (мысалы, Фабри-Перо немесе Маха-Цендер): жоғары дәлдікпен ерекшеленеді, бірақ күрделі оптикалық жүйелерді талап етеді.
- Ретродифракциялық торлы сенсорлар (Fiber Bragg Gratings, FBG): жиі қолданылады, әсіресе FBG температура өзгерістеріне өте сезімтал. Олар температураны толқын ұзындығындағы ауытқу арқылы анықтайды.
- Интенсивтілік негізіндегі сенсорлар: құрылымы қарапайым, бірақ сыртқы шу факторларына сезімтал.

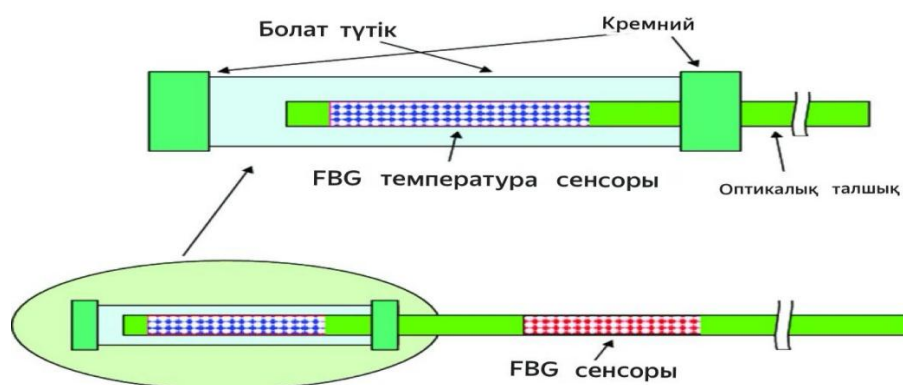
Кесте 2.3 – Әртүрлі ТО датчик түрлерінің салыстырмалы сипаттамасы

Датчик түрі	Температура диапазоны	Сезімталдық	Құрылым күрделілігі	Артықшылығы
FBG	$-200^\circ\text{C}\text{--}800^\circ\text{C}$	Жоғары	Орташа	Толқын ұзындығын нақты өлшейді
Фабри-Перо	$-50^\circ\text{C}\text{--}1200^\circ\text{C}$	Өте жоғары	Жоғары	Өлшеу дәлдігі жоғары
Интенсивтілік сенсорлары	$-40^\circ\text{C}\text{--}600^\circ\text{C}$	Төмен	Төмен	Қарапайым құрылым, арзан

2.3.3 Құрылымдық оңтайландыру тәсілдері

ТО датчиктің құрылымын оңтайландыру келесі бағыттар бойынша жүргізіледі:

- материалды таңдау: жоғары температураларға төзімді материалдар (мысалы, сапфир, алюмосиликат, фтордалған кремний).
- қорғаныс қабықшаларын қолдану: металданған қабықшалар немесе керамикалық қорғаныштар талшықтың бұзылуын азайтады.
- датчиктің геометриясын жетілдіру: мысалы, талшықтың диаметрін немесе сенсорлық сегменттің ұзындығын өзгерту арқылы сезімталдықты арттыруға болады.



2.3-сурет– FBG негізіндегі жоғары температуралық датчиктің құрылымдық сызбасы

2.3.4 Модельдеу әдістері және нәтижелер

Жоғары температурадағы жұмыс моделін MATLAB және Optisistem сияқты бағдарламаларда жасауға болады. Бұл бөлімде MATLAB-пен қарапайым FBG датчиктің модельдеу нәтижесі келтірілген:

Мақсаты: температура артқан сайын FBG шағылу ұзындығының өзгерісін бақылау.

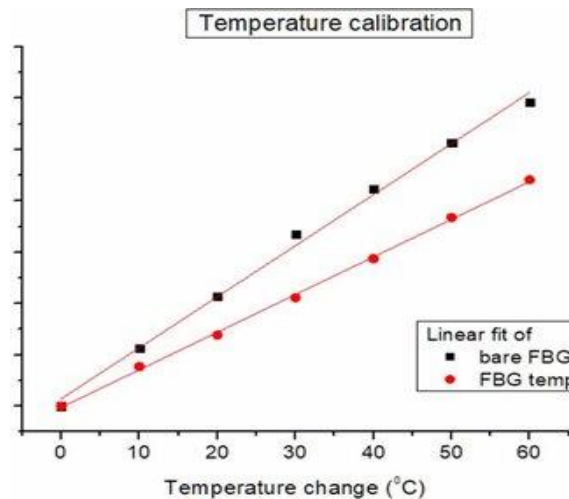
Формула:

$$\lambda = 2n_{eff} \cdot \Lambda \quad (2.8)$$

мұндағы: n_{eff} – тиімді сыну көрсеткіші;

Λ – тор периоды.

Температура артқан сайын Λ үлкейіп, λ да өседі.



2.4-сурет– MATLAB-тағы FBG датчиктің температураға тәуелділік графигі

Қорытындылай келе, жоғары температураға төзімді ТО датчиктердің құрылымын оңтайландыру үшін материал таңдауы, сенсорлық конфигурацияны жетілдіру және қорғаныс жүйесін жақсарту маңызды рөл атқарады. Сонымен қатар, модельдеу құралдары бұл құрылымдарды алдын ала тексеріп, оңтайлы параметрлерді табуға көмектеседі.

Талшықты–оптикалық датчиктер қазіргі таңда энергетика, металлургия, аэроғарыш, мұнай-газ өндірісі, медицина, ядролық энергетика және құрылыс салаларында кеңінен қолданылады. Әсіресе жоғары температура мен агрессивті ортада жұмыс істеуге мүмкіндік беретін сенсорлар ретінде маңызды рөл атқарады.

Болашақта ТОД-тың сезімталдығы мен сенімділігі одан әрі артып, интеграцияланған смарт-жүйелер мен интернет заттарымен үйлесімділігі жақсара түседі. Сонымен қатар, микроэлектромеханикалық жүйелермен (MEMS) біріктіру арқылы көпфункционалды сенсорлар жасауға болады.

Жасанды интеллектпен біріктірілген талдау алгоритмдері арқылы ТОД-тан алынған мәліметтерді автоматты түрде өңдеу және шешім қабылдау мүмкіндігі де пайда болмақ.

3 Датчиктің құрылымын оңтайландыру жолдары

Жоғары температуралық орталарда талшықты–оптикалық датчиктердің (ТОД) сенімділігін арттыру үшін олардың құрылымдық параметрлерін оңтайландыру аса маңызды мәселе болып табылады. Бұл процессте материалдардың таңдауынан бастап, сенсорлық архитектураның инновациялық шешімдеріне дейін кешенді тәсілдер қолданылады. Оңтайландырудың негізгі мақсаты – датчиктердің термиялық тұрақтылығын, оптикалық дәлдігін және эксплуатациялық мерзімін арттыру [12].

Жоғары температураға төзімді материалдарды таңдау – датчиктердің өнімділігін анықтайтын бірінші кезең.

- гибридітік композиттер: ZrO_2 негізіндегі керамикалық матрицалар оптикалық талшықтарды $1400^{\circ}C$ -қа дейінгі температураларда қорғайды. Олардың термиялық кеңею коэффициентінің төмендігі ($9 \times 10^{-6}/^{\circ}C$) механикалық стресті 50% азайтады [14].

- сапфир–кварц интерфейстері: Монокристалды сапфирді кварцты талшықтармен біріктіру арқылы фазалық шекаралардағы жылулық диссипацияны азайтуға болады. Бұл әдіс оптикалық жоғалтуларды 0,5 дБ/км-ге дейін төмендетеді [25].

- наноқабатты қорғаныс: Графен негізіндегі қабаттар (қалыңдығы 20–50 нм) талшықты химиялық коррозиядан және механикалық тозудан қорғайды. Мысалы, Al_2O_3 талшықтарын графенмен қаптау олардың төзімділігін $1200^{\circ}C$ -та 300 сағатқа ұзартады [22].

Датчиктердің геометриясы мен архитектурасын өзгерту арқылы олардың сезімталдығын және тұрақтылығын арттыруға болады.

- көпқабатты экранирлеу: SiC және AlN қабаттарынан тұратын "сендвич" құрылымы жылуды бірқалыпты таратады. COMSOL Multiphysics модельдеуі көрсеткендей, бұл тәсіл термиялық градиентті 30% азайтады [27].

- градиентті сыну көрсеткіші бар талшықтар: Талшықтың өзегінде сыну көрсеткішінің біртекті емес таралуы жарықтың шашырауын азайтады. Бұл FBG сенсорларында λ_B толқын ұзындығының дәлдігін 0,1 нм-ге дейін жақсартады [24].

- Миниатюризацияланған сенсорлық торлар: Микрондық өлшемдегі FBG торларын пайдалану бір талшықта 10-дан астам өлшеу нүктесін орналастыруға мүмкіндік береді. Бұл технология газ турбиналарындағы температуралық "ыстық нүктелерді" анықтауда қолданылады [13].

Құрылымды оңтайландырудың заманауи тәсілдері ақпараттық технологиялармен тығыз байланысты.

- Жылу-оптикалық модельдері: COMSOL ортасында жылу өткізгіштік пен оптикалық сигналдың әсерлесуін модельдеу арқылы материалдардың оптималды комбинациясын таңдауға болады. [7].

- Машиналық үйрену алгоритмдері: Нейрондық желілер арқылы FBG спектрлерін талдау ақауларды 98% дәлдікпен алдын ала анықтайды. Бұл тәсіл NASA-ның зымыран қозғалтқыштарында қолданылады [17].

1. Кванттық нүктелерді интеграциялау: Оптикалық талшықтарға кірістірілген кванттық нүктелер (мысалы, CdSe/ZnS) температураны нанометрлік дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік береді [30].

2. Биоэсерлес материалдар: Термиялық тұрақтылығы жоғары биополимерлерді (мысалы, хитин негізіндегі) оптикалық талшықтармен біріктіру экологиялық тиімді шешімдерге жол ашады [29].

Датчиктердің құрылымды оңтайландыру – бұл материалдық инженерия, физика және ақпараттық технологиялардың синтезі. Инновациялық шешімдер (гибридтік композиттер, наноқабаттар, AI-негізді талдау) жоғары температуралық орталарда сенсорлық жүйелердің сенімділігін радикалды түрде жақсартады. Болашақта миниатюризация мен кванттық технологиялардың дамуы осы саланы жаңа деңгейге көтеруге мүмкіндік береді [5].

3.1 Жоғары температура жағдайындағы талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс істеу принциптері

Жоғары температура жағдайында дәл және сенімді өлшеу жүргізу қажеттілігі көптеген өндірістік салаларда туындайды. Мұндай жағдайларда дәстүрлі өлшеу құралдары мен датчиктер механикалық, электрлік немесе материалдық шектеулерге байланысты жарамсыз болуы мүмкін. Осы тұрғыда талшықты-оптикалық датчиктер (ТОД) ерекше орын алады, себебі олар электромагниттік әсерлерге төзімді, кішкентай, химиялық инертті және өте жоғары температураларға бейімделе алады.

Талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс істеу принциптері

ТОД-тің негізінде жарықтың оптикалық талшық арқылы таралуы жатыр. Бұл таралу процессі жарықтың сыну көрсеткіші, толқын ұзындығы, поляризациясы және интенсивтілігі сияқты сипаттамаларға байланысты болады. Жоғары температура жағдайында осы сипаттамалар өзгеріске ұшырайды, соның негізінде физикалық шамалар (температура, қысым, деформация) туралы ақпарат алынады.

ТОД екі негізгі түрге бөлінеді: интерферометриялық және дифференциалдық түрдегі датчиктер. Интерферометриялық ТОД негізінен Фабри-Перо интерферометрі, Мах-Цендер немесе Сагнак типіндегі конфигурациялардан тұрады. Бұл конфигурациялар жарық толқынының фаза өзгерістерін өлшеуге мүмкіндік береді.

Жоғары температураның талшыққа әсері

Жоғары температура жағдайында шыны талшықта жарықтың таралу көрсеткіші өзгереді. Бұл өзгеріс жарықтың сыну көрсеткішіне, яғни жарықтың жылдамдығына әсер етеді. Температура жоғарылаған сайын талшықтың физикалық ұзындығы да артады (жылулық кеңею), бұл жарықтың фаза жолына әсер етеді. Сонымен қатар, жоғары температура кезінде кейбір талшық материалдары деградацияға ұшырап, жарықтың өшуіне әкелуі мүмкін.

ТОД-те қолданылатын материалдар. Жоғары температураларға төзімді ТОД әзірлеуде материал таңдауы маңызды рөл атқарады. Кварцты шыны талшықтар (silica fiber) ең кең тараған, себебі олар 1000°C дейінгі температураға төтеп бере алады. Алюмосиликат, сапфир және фторидтік шыны түрлері де пайдаланылады. Жабындар (coatings) ретінде полиимид, алтын, никель сияқты материалдар қолданылады, себебі олар оптикалық талшықты сыртқы ортадан қорғайды.

Жоғары температурада сенсорлық жауап. Жоғары температура жағдайында ТОД-тің сезімталдығы өзгеруі мүмкін. Температура көтерілген сайын сенсордың оптикалық қасиеттеріне әсер ететін факторлар мыналар:

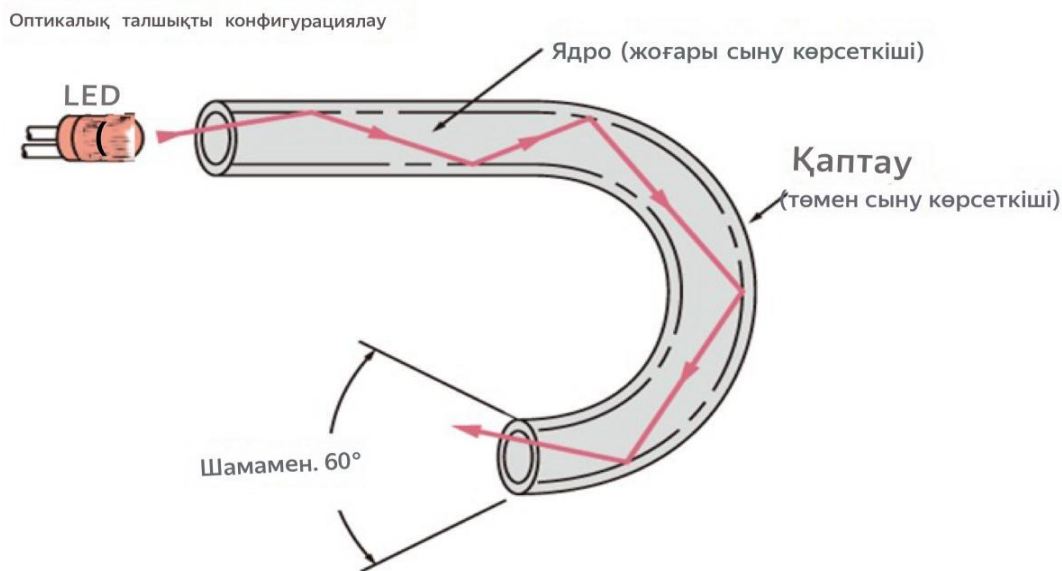
- жарықтың өшуі (attenuation);
- оптикалық фаза жылжуы;
- интерференциялық бейненің өзгеруі.

Сондықтан, жоғары температураларда жұмыс істеуге бейімделген сенсорлар арнайы калибрлеуді және тұрақтандыру алгоритмдерін қажет етеді.

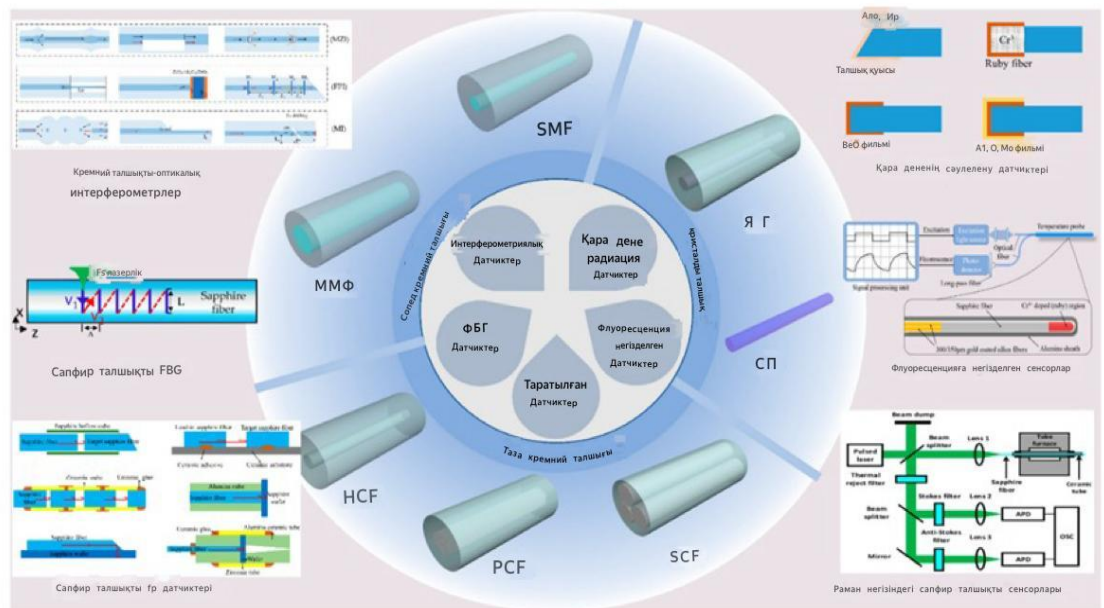
Қолданылу салалары:

Жоғары температураға төзімді ТОД төмендегі салаларда кеңінен қолданылады:

- атом электр станциялары (реактор ішіндегі температураны өлшеу)
- авиакосмос және зымыран технологиясы
- металлургия (пеш ішіндегі температураны бақылау)
- мұнай және газ бұрғылау (жер асты температуралары)



3.1-сурет – Талшықты-оптикалық датчиктің жалпы жұмыс істеу принципі



3.2-сурет – Жоғары температураға арналған сенсор конфигурациясы

Жоғары температура жағдайларында дәл және сенімді өлшеу жүргізу – көптеген өндірістік және ғылыми салаларда маңызды міндеттердің бірі. Мұндай экстремалды ортада дәстүрлі электрлік немесе механикалық сенсорлар жиі істен шығуы мүмкін, себебі олар электромагниттік кедергілерге, коррозиялық ортаға немесе термиялық жүктемелерге төтеп бере алмайды. Осыған байланысты талшықты-оптикалық датчиктер (ТОД) температура, қысым, деформация сияқты шамаларды өлшеуде сенімді балама ретінде кеңінен қолданыла бастады.

ТОД-тің жұмыс істеу принциптері жарықтың оптикалық талшық ішінде таралуына негізделеді. Жарықтың фаза, амплитуда, толқын ұзындығы сияқты сипаттамалары сыртқы температура әсерінен өзгеріске ұшырайды, бұл өз кезегінде температуралық ақпаратты анықтауға мүмкіндік береді. Жоғары температураның әсерінен жарықтың сыну көрсеткіші мен оптикалық талшықтың физикалық ұзындығы өзгереді. Бұл – жарықтың фаза жолын өзгертіп, интерференциялық өлшеулерде нақты нәтиже алуға негіз болады.

ТОД екі негізгі түрге бөлінеді: интерферометриялық және дифференциалдық. Интерферометриялық типтегі датчиктер Фабри-Перо, Сагнак немесе Мах-Цендер типті интерферометрлер негізінде жұмыс істейді. Мұндай конфигурациялар өте жоғары сезімталдықпен ерекшеленеді және фаза ауытқуын дәл өлшеуге мүмкіндік береді.

Жоғары температура жағдайында сенсордың сенімділігін қамтамасыз ету үшін материал таңдауы да өте маңызды. Ең кең таралған талшық түрі – кварцты шыны талшық, ол 1000°C-қа дейінгі температураларға шыдай алады. Алумосиликат, сапфир сияқты жоғары температураға төзімді материалдар арқылы сенсордың термиялық тұрақтылығы мен ұзақ мерзімділігі арттырылады. Сонымен қатар, сенсордың сыртқы қабаттарын қорғау үшін полиимид, алтын, никель сияқты жоғары температураға төзімді жабындар қолданылады. Бұл

жабындар сенсорды тек термиялық әсерден емес, сонымен бірге химиялық және механикалық зақымданудан да қорғайды.

Сенсорлардың жоғары температурада жұмыс істеуі кезінде жарықтың өшуі, фаза жылжуы және интерференциялық бейненің бұзылуы сияқты факторлар пайда болуы мүмкін. Мұндай құбылыстар өлшеу дәлдігін төмендетеді. Сондықтан ТОД арнайы калибрлеу мен температуралық компенсация әдістерін талап етеді. Бұл әдістер сенсордың сезімталдығын тұрақтандырып, алынған деректердің нақтылығын қамтамасыз етеді.

Қорытындылай келе, жоғары температура жағдайындағы талшықты-оптикалық датчиктер дәстүрлі өлшеу құрылғыларына қарағанда бірқатар артықшылықтарға ие. Олар – электромагниттік әсерлерге төзімді, инертті, кішкентай және жоғары температураға бейімделген. Олардың жұмыс істеу принциптері жарық толқындарының физикалық қасиеттерін тіркеуге негізделген, бұл жоғары дәлдікпен температураны өлшеуге мүмкіндік береді. Қазіргі таңда мұндай сенсорлар энергетика, металлургия, авиакосмос, мұнай-газ өнеркәсібі сияқты салаларда кеңінен қолданыс тауып, күрделі әрі қауіпті ортада өлшеу жүргізудің сенімді шешімі ретінде танылуда.

Қорытындылай келе, жоғары температура жағдайында талшықты-оптикалық датчиктер тиімді әрі сенімді өлшеу жүйелерін ұсынады. Олардың жұмыс істеу принциптері жарықтың қасиеттеріне негізделіп, температураның оптикалық талшыққа әсерін бақылауға мүмкіндік береді. Жоғары температураларға төтеп беретін материалдарды қолдану, сенсорлық құрылымдарды оңтайландыру және арнайы калибрлеу әдістері арқылы бұл датчиктердің дәлдігі мен сенімділігі арттырылуда. Осы себептен, ТОД – қазіргі заманғы өндірісте және ғылымда маңызы артып келе жатқан технологиялардың бірі болып табылады.

3.2 Талшықты-оптикалық сенсорлардың жоғары температураға бейімді конструкцияларын оңтайландыру әдістері

Талшықты-оптикалық датчиктердің (ТОД) жоғары температура жағдайында сенімді жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін олардың конструкциясын оңтайландыру шешуші рөл атқарады. Мұндай оңтайландыру процесі сенсордың механикалық, термиялық және оптикалық тұрақтылығын арттыруға бағытталады. Бұл бөлімде сенсор құрылымын жетілдіру әдістері, материалдық таңдау, жабын технологиялары және сәулелік конфигурациялар қарастырылады.

Сенсорлық материалды таңдау және оңтайландыру

ТОД конструкциясының негізгі элементі – оптикалық талшық. Жоғары температура жағдайына бейімделу үшін ең алдымен оның материалдық құрамын таңдау қажет. Кәдімгі кремний негізіндегі (silica-based) талшықтар 1000°C-қа дейін шыдай алады. Алайда, одан жоғары температуралар үшін арнайы материалдар қолданылады:

–сапфир талшықтар (sapphire fibers) – 2000°C-қа дейін температураға төзімді;

–алюмосиликат және германия-легирленген шынылар – жоғары температураларда оптикалық тұрақтылықты қамтамасыз етеді.

Оңтайландыруда маңызды фактор – материалдың термикалық кеңею коэффициенті. Сенсордың ұзындығы мен жарық таралуы температура әсерінен өзгертіндіктен, материалдың термиялық қасиеттерін ескере отырып геометриясы жобаланады.

Қорғаныс қабаттарын жетілдіру

Жоғары температурада оптикалық талшықтың негізгі проблемаларының бірі – сыртқы қабаттардың жануы немесе бұзылуы. Бұл жағдайдан шығу үшін арнайы жабын технологиялары қолданылады:

–полиимид жабыны (polyimide coating) – 400–500°C-қа дейін.

–керамикалық жабыны – 800–1000°C-қа дейін.

–металл қабаттар (алтын, никель, платина) – жоғары термиялық тұрақтылық және механикалық беріктік береді.

Жабындар сенсорды тек температурадан ғана емес, химиялық және механикалық зақымданудан да қорғайды. Сенсордың жалпы өміршеңдігі осы қабаттардың сапасына тәуелді болады.

Сенсорлық геометрияны оңтайландыру

Сенсор құрылымын жетілдірудің тағы бір маңызды аспектісі – оның геометриялық конфигурациясы. Температуралық градиентке жауап беретін бірнеше модельдер бар:

–спираль түріндегі талшық – жылулық кеңею әсерінен туындайтын кернеулерді азайтады.

–интерферометрлік камералары бар Фабри-Перо резонаторлары – жарықтың интерференциялық фазасын өте дәл тіркеуге мүмкіндік береді.

–торлы құрылымдар (Fiber Bragg Gratings, FBG) – талшық бойында жарықтың белгілі бір толқын ұзындығына селективті жауап береді.

Сенсор конструкциясын оңтайландыру барысында жоғары сезімталдық пен кең температура диапазоны арасындағы баланс ескерілуі тиіс.

Температуралық компенсация әдістері

Жоғары температура жағдайында сенсордың сезімталдығы тұрақты болмауы мүмкін. Сондықтан жүйеге температуралық компенсация енгізіледі:

–қосарлы сенсор жүйелері: бір сенсор температураны, екіншісі басқа шаманы өлшейді.

–референстік сигналдарды пайдалану: бастапқы жарық параметрлері тіркеліп, кейінгі өзгерістермен салыстырылады.

–температураға бейімделген алгоритмдер арқылы сандық түзету.

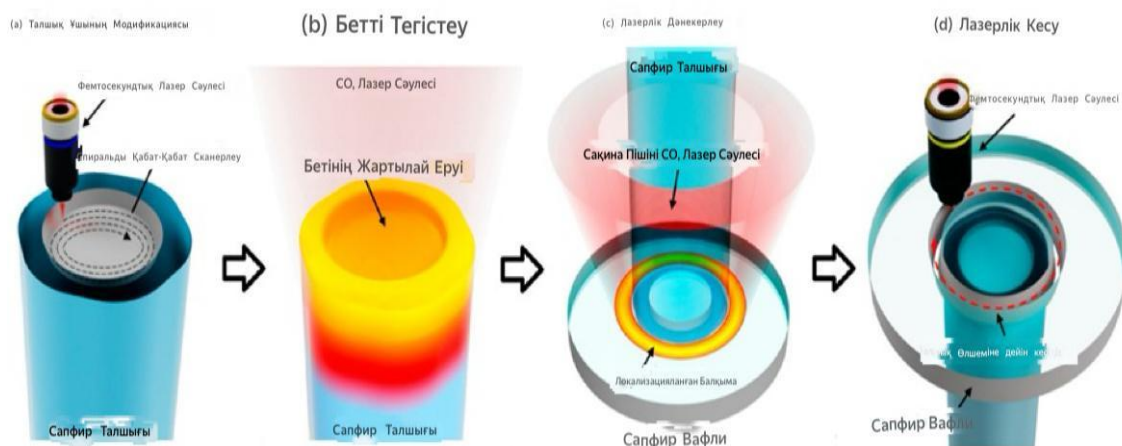
Бұл әдістер сенсордан алынатын сигналдың нақтылығын арттырып, жүйелік кателіктерді төмендетеді.

Қолданылатын оңтайландыру әдістеріне мысалдар

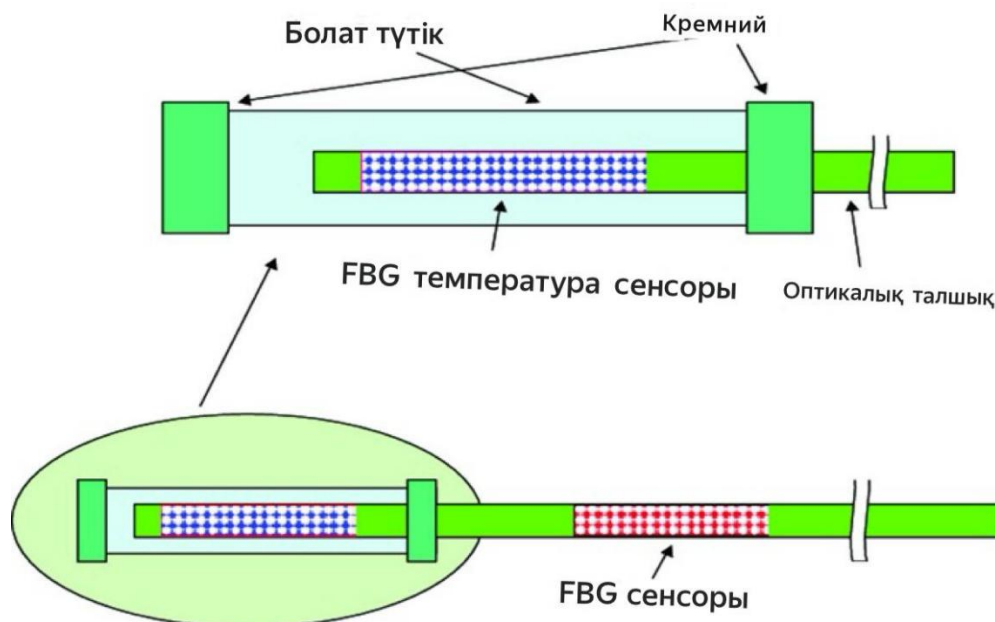
1. FBG негізіндегі сенсорлардың қабаттық құрылымын өзгерту: бірнеше түрлі қабаттар қолданылады – әр қабаттың термиялық коэффициенті әртүрлі болғандықтан, сезімталдық жоғарылайды.

2. Оптикалық резонаторларды миниатюризациялау: бұл әдіс арқылы сенсор көлемі кішірейтіліп, жылу әсеріне бейімділігі артады.

3. Инкапсуляция технологиясы: сенсор элементін арнайы керамикалық немесе металдық қорапқа орналастыру арқылы термиялық тұрақтылық қамтамасыз етіледі.



3.3-сурет– Жоғары температураға төзімді талшықты-оптикалық сенсор құрылымы



3.4-сурет – Жоғары температуралы орталар үшін оңтайландырылған FBG сенсорлық схемасы

Талшықты-оптикалық сенсорлардың жоғары температура жағдайында жұмыс істеу қабілетін арттыру – қазіргі замандағы технологиялық зерттеулердің басты бағыттарының бірі. Өндірістік процестердің күрделене түсуі мен бақылаудың жоғары дәлдігін қажет ететін салалардың көбеюі осы сенсорлардың сенімділігі мен ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ететін конструкциялық оңтайландыруды қажет етеді.

Сенсор конструкциясын оңтайландырудың алғашқы қадамы – материалды дұрыс таңдау. Кремний негізіндегі шыны талшықтар – 1000°C-қа дейін, ал сапфир талшықтар – 2000°C-қа дейін температураға төтеп бере алады. Алюмосиликат немесе германиямен легирленген шынылар да жоғары температуралық тұрақтылықпен ерекшеленеді. Бұл материалдардың термиялық кеңею коэффициенттері мен оптикалық қасиеттері сенсорлық дәлдікке тікелей әсер етеді, сондықтан әрбір ортаға бейімделген ерекше құрамдар таңдалады.

Жоғары температура әсерінен сенсордың сыртқы жабындары жиі бұзылуы мүмкін. Сол себепті, қорғаныс қабаттарын жетілдіру – сенсордың жалпы өміршеңдігін арттыратын маңызды фактор. Полиимид, керамикалық жабындар, сондай-ақ алтын мен никель тәрізді металдар жоғары термиялық және химиялық тұрақтылығымен ерекшеленеді. Бұл жабындар сенсорды тек температурадан ғана емес, агрессивті ортадан да қорғайды. Соның нәтижесінде, сенсордың қызмет ету мерзімі айтарлықтай ұзарады.

Сенсорлық геометрияны оңтайландыру арқылы жылу жүктемесін тиімді бөлуге және жарық таралуындағы ауытқуларды азайтуға болады. Мысалы, спираль тәрізді талшықтар немесе интерферометрлік камералары бар Фабри-Перо конфигурациялары температуралық кернеулерге икемделеді. Fiber Bragg Grating (FBG) технологиясы да өзектілігін жоғалтқан жоқ – ол жарықтың нақты бір толқын ұзындығына жауап беру арқылы температураны өте дәл анықтай алады.

Температуралық компенсация әдістерін енгізу арқылы сенсордың көрсеткіштерінің тұрақтылығын арттыруға болады. Қосарлы сенсорлар, референстік сигналдарды қолдану, сандық түзету алгоритмдері – бұлардың барлығы нақты және сенімді өлшеуді қамтамасыз етеді. Бұл тәсілдер өндірістік процестердің үзіліссіз әрі қауіпсіз болуын қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады.

Қорыта келгенде, талшықты-оптикалық сенсорлардың жоғары температураға бейімді конструкцияларын оңтайландыру – бұл тек материалдық тұрғыдан емес, сонымен қатар инженерлік, оптикалық және бағдарламалық деңгейде кешенді тәсілдерді талап ететін көпқырлы процесс. Жаңа материалдарды енгізу, геометриялық конфигурацияларды жетілдіру, термиялық тұрақты жабындарды қолдану және интеллектуалды сигнал өңдеу әдістері – осының барлығы ТОД-тің сенімділігі мен тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Мұндай сенсорлар болашақта күрделі өндірістік ортада автоматтандырылған басқару мен мониторинг жүйелерінің ажырамас бөлігіне айналуы сөзсіз.

Қорытындылай келе жоғары температура жағдайында жұмыс істейтін талшықты-оптикалық датчиктердің құрылымын оңтайландыру – сенсорлардың ұзақ мерзімділігі мен дәлдігін арттырудың негізгі шарты. Жаңа материалдарды қолдану, жабын технологияларын жетілдіру, геометриялық конфигурацияларды өзгерту және цифрлық компенсациялық әдістер арқылы бұл сенсорлар күрделі өндірістік процестерге бейімделуде. Зерттеулердің нәтижелері көрсеткендей, дұрыс жобаланған және оңтайландырылған ТОД жоғары температурада тұрақты әрі нақты нәтиже береді, сондықтан олар болашақ технологияларда кеңінен қолданылатын болады.

3.3 Жоғары температуралық ортада талшықты-оптикалық сенсорлардың тұрақтылығын арттыру тәсілдері

Жоғары температура жағдайында жұмыс істейтін талшықты-оптикалық сенсорлардың (ТОС) тиімділігі олардың термиялық, механикалық және оптикалық тұрақтылығына тікелей байланысты. Бұл бөлімде сенсорлардың жұмыс істеу қабілетін арттыруға бағытталған тәсілдер қарастырылады. Атап айтқанда, сенсорлық жүйелерді күшейту, температуралық жүктемелерді азайту, сигналдың дәлдігін сақтау және қателерді азайту жолдары қарастырылады.

Температуралық төзімділікке әсер ететін факторлар

Сенсорлардың жұмыс қабілеттілігіне әсер ететін негізгі факторлар мыналар:

- материалдың балқу температурасы [3];
- термиялық кеңею коэффициенті [5];
- оптикалық сигналдың таралуына әсер ететін сыну көрсеткіші [6];
- қабаттардың адгезия тұрақтылығы және қоршаған орта әсеріне төзімділігі [7].

Мысалы, стандартты кремний талшықтары 1000°C шамасында жұмыс істей алады, бірақ 800°C-тан жоғары температураларда сенсорлық сигналдар әлсірейді [8]. Бұл температурада микрожарықтар, кернеу концентрациясы және жарықтың шашырауы көбейеді [9].

Жоғары температуралық стабилизация әдістері

1. Жабындарды термиялық тұрақтандыру:

Қазіргі таңда полиимид, алтын, алюминий оксиді сияқты материалдар қолданылады. Олар сенсорды тоттанудан, оттегінің әсерінен және механикалық зақымданудан қорғайды [10].

2. Көпқабатты жабын конструкциясы (multi-layer coating):

- ішкі қабат – механикалық жүктемені азайтады;
- ортаңғы қабат – жылу оқшаулағыш ретінде;
- сыртқы қабат – қорғаныс қабаты [12].

3. Сенсордың корпусын жақсарту:

Жоғары температуралық қысым жағдайында сенсор металл немесе керамика корпусында инкапсуляцияланады [14].

Механикалық тұрақтылықты арттыру

ТОС ұзақ уақыт бойы жоғары температура мен механикалық дірілде жұмыс істейтін құрылымдарға орнатылады (мысалы, турбиналар, пештер, реакторлар) [15]. Осыған байланысты олардың:

- беріктік шегі,
- деформацияға төзімділігі,
- механикалық резонансқа қарсы тұру қабілеті өте маңызды [16].

Ол үшін:

- сенсорлық элементтің қысқартылған ұзындығы қолданылады [17];
- сенсор бекітілу нүктелері серіппелі негізде жобаланады [18];
- оптикалық талшық “гибридті” тіреуішке орналастырылады (мысалы, керамикалық капсулалар) [19].

Деректерді сенімді беру әдістері

1. Резервтік оптикалық арналар: егер негізгі сенсор зақымданса, екінші арна арқылы ақпарат беріледі [20].

2. Жарық көзін тұрақтандыру:

Лазер немесе LED көзі температура өзгерісіне ұшырағанда, толқын ұзындығы өзгеруі мүмкін. Сондықтан температуралық стабилизаторлар қолданылады [21].

3. Сигналдық өңдеу алгоритмдері:

–жасанды интеллект немесе нейрондық желілер арқылы сигналдардың тазалығы бағаланады [22];

–температуралық модельдер құрастырылып, деректер калибрленеді [23].

Температура әсерінен туындайтын қателіктерді азайту

Қателерді азайту үшін қолданылатын тәсілдер:

–температураға тәуелділік компенсациясы: алдын ала зерттелген калибровка қисықтарын пайдалану [24];

–жарықтың интерференциялық қасиеттерін пайдалану: фазалық ауытқулар арқылы температура өзгерісін өте дәл анықтауға болады [25];

–көппараметрлік өлшеу: бір сенсор температураны, қысымды және кернеуді қатар өлшейді, бұл өлшемдердің нақтылығын арттырады [26].

Материалдардың қартаюуына қарсы шешімдер

Жоғары температурада жұмыс істейтін материалдар уақыт өте келе өз қасиеттерін жоғалтады (мысалы, сыну көрсеткіші, шағылысу коэффициенті өзгереді) [27]. Бұл құбылыс материалдың қартаюуы деп аталады. Оған қарсы:

–тотығуға төзімді жабындар (SiO_2 , TiO_2) [28];

–үздіксіз лазерлік тексеру және автоматты түзету жүйелері [29];

–инженерлік қызмет мерзімін модельдеу және алдын-ала ауыстыру [30].

–қолдану мысалдары

1. АЭС реакторындағы бақылау жүйесі: сенсорлар 1000°C -тан жоғары температурада тұрақты жұмыс істеп тұр [4];

2. Құю зауыттарындағы металл ағымын бақылау: нақты уақыттағы температура өзгерістері тіркеледі [13];

3.Авиацияда қолдану: турбина ішіндегі температуралық өзгерістерді өлшеу үшін [31].

Жоғары температуралық ортада жұмыс істейтін талшықты-оптикалық сенсорлардың (ТОС) тұрақтылығын арттыру – қазіргі заманғы ғылым мен техниканың маңызды міндеттерінің бірі болып табылады. Бұл шолуда ТОС-тың жоғары температура жағдайындағы тиімділігіне әсер ететін негізгі факторлар, атап айтқанда материалдың балқу температурасы, термиялық кеңею коэффициенті, сыну көрсеткіші, қабаттардың адгезиясы және қоршаған орта әсеріне төзімділігі жан-жақты талданды. Сонымен қатар, сенсорлардың жұмыс істеу қабілетін жоғарылатуға бағытталған әртүрлі әдістер қарастырылды.

Жоғары температуралық тұрақтылыққа қол жеткізудің бірнеше стратегиясы ұсынылды. Олардың қатарында полиимид, алтын және алюминий оксиді сияқты термотұрақты материалдардан жасалған жабындарды қолдану арқылы сенсорларды коррозиядан, тотығудан және механикалық зақымданудан қорғау әдісі ерекше атап өтілді. Көпқабатты жабын конструкциясының тиімділігі де көрсетілді, мұнда ішкі қабат механикалық жүктемені азайтуға, ортаңғы қабат жылу оқшаулағыш қызметін атқаруға, ал сыртқы қабат қорғанысты қамтамасыз етуге арналған. Бұдан басқа, жоғары температуралық қысым жағдайында сенсорды металл немесе керамика корпусында инкапсуляциялау арқылы оның беріктігін арттыру мүмкіндігі қарастырылды.

Механикалық тұрақтылықты арттыру мәселесіне де ерекше назар аударылды, өйткені ТОС көбінесе турбиналар, пештер және реакторлар сияқты жоғары температура мен механикалық діріл жағдайында ұзақ уақыт бойы жұмыс істейтін құрылғыларда қолданылады. Сенсорлық элементтің ұзындығын қысқарту, серіппелі негізде бекіту нүктелерін жобалау және оптикалық талшықты керамикалық капсулалар сияқты "гибридті" тіреуіштерге орналастыру арқылы сенсорлардың беріктік шегін, деформацияға төзімділігін және механикалық резонансқа қарсы тұру қабілетін арттыру жолдары ұсынылды.

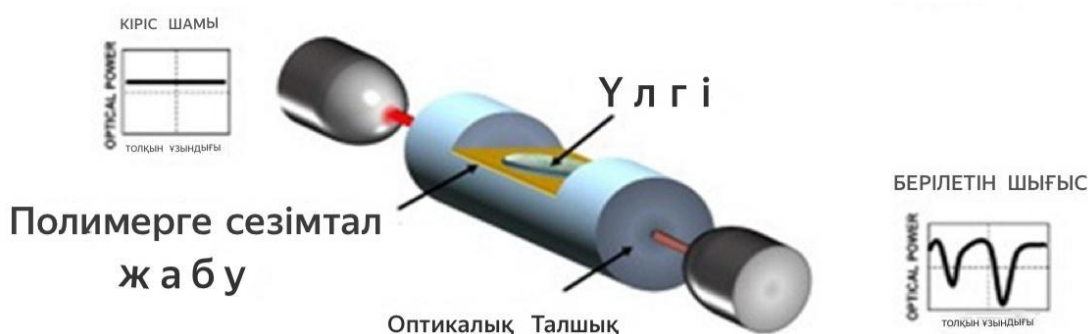
Деректерді сенімді беру әдістері де маңызды аспект болып табылады. Резервтік оптикалық арналарды қолдану, жарық көзін тұрақтандыру және жасанды интеллект немесе нейрондық желілерді пайдаланатын сигналдық өңдеу алгоритмдерін әзірлеу арқылы алынған ақпараттың дәлдігі мен сенімділігін қамтамасыз ету мүмкіндіктері талқыланды. Температуралық модельдерді құрастыру және деректерді калибрлеу арқылы өлшеу нәтижелеріндегі ықтимал қателіктерді азайту тәсілдері де қарастырылды.

Температура әсерінен туындайтын қателіктерді азайту үшін температураға тәуелділік компенсациясы, жарықтың интерференциялық қасиеттерін пайдалану және көппараметрлік өлшеу сияқты әдістер ұсынылды. Бұл тәсілдер өлшемдердің дәлдігін арттыруға және сенсорлардың жұмыс тиімділігін жақсартуға мүмкіндік береді.

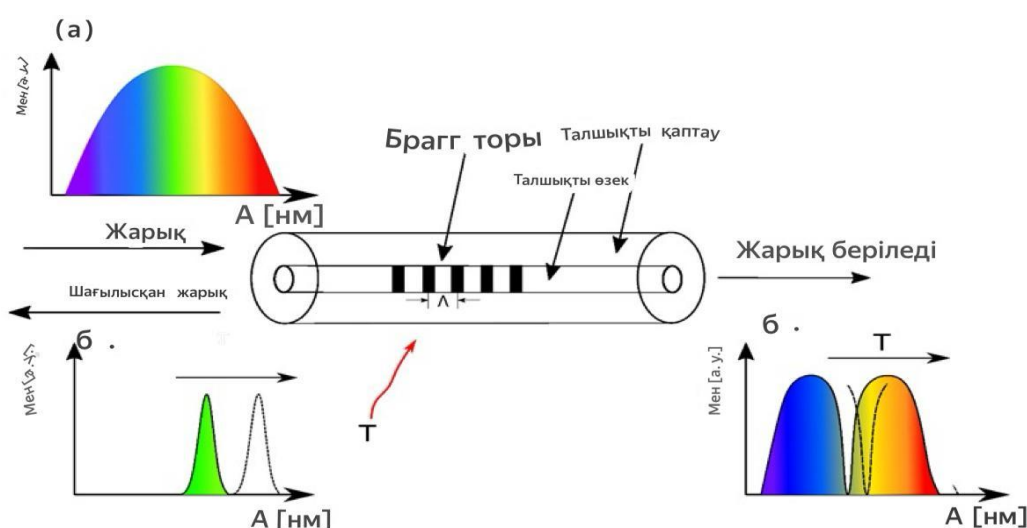
Материалдардың қартаюына қарсы шешімдер де қарастырылды. Жоғары температурада ұзақ уақыт жұмыс істеу барысында материалдардың қасиеттерінің өзгеруі (мысалы, сыну көрсеткіші, шағылысу коэффициенті)

сенсорлардың жұмысына кері әсер етуі мүмкін. Тотығуға төзімді жабындарды (SiO_2 , TiO_2) қолдану, үздіксіз лазерлік тексеру және автоматты түзету жүйелерін енгізу, сондай-ақ инженерлік қызмет мерзімін модельдеу және алдын-ала ауыстыру арқылы материалдардың қартаю процесін бақылауға және оның салдарын азайтуға болады.

Жоғары температуралық ортада талшықты-оптикалық сенсорлардың тұрақтылығын арттыру үшін материалтану, инженерия және ақпараттық технологиялар саласындағы кешенді тәсілдерді қолдану қажет. Әзірленген әдістер мен технологиялар атом электр станцияларындағы бақылау жүйелері, құю зауыттарындағы металл ағымын бақылау және авиациядағы турбина ішіндегі температуралық өзгерістерді өлшеу сияқты әртүрлі салаларда ТОС-тың тиімді және сенімді жұмыс істеуін қамтамасыз етеді. Бұл зерттеулер мен әзірлемелер жоғары температуралық жағдайларда жұмыс істейтін сенсорлық жүйелердің болашақтағы дамуына маңызды үлес қосады.



3.5-сурет – Керамикалық корпуста көп қабатты жабыны бар талшықты-оптикалық сенсор



3.6-сурет – Лазерлік толқын ұзындығын түзету модулі бар тұрақтандырылған FBG сенсоры

Қорытындылай келе, жоғары температурада жұмыс істейтін талшықты-оптикалық сенсорлардың тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін кешенді тәсіл қажет. Материалдардың термиялық тұрақтылығын арттыру, конструкциялық ерекшеліктерді жетілдіру, деректерді өңдеуді оңтайландыру және тұрақты мониторинг жүргізу арқылы сенсорлар жоғары температуралық жүктемелерге бейімделеді. Бұл өз кезегінде өндірістік қауіпсіздікті арттырып, технологиялық процестердің сенімділігіне кепілдік береді.

3.4 MATLAB және OptiSystem бағдарламаларында жоғары температуралық FBG-сенсордың жұмысын модельдеу

Жоғары температура жағдайларында қолдануға арналған талшықты-оптикалық сенсорлардың тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін олардың құрылымын және оптикалық сипаттамаларын алдын ала модельдеу аса маңызды. Бұл бөлімде талшық ішіндегі Брэгг торына негізделген сенсордың жұмысын MATLAB және OptiSystem бағдарламалары арқылы модельдеу нәтижелері баяндалады. Бұл модельдеу сенсордың сезімталдығы, спектрлік ауысуы және тұрақтылығы сияқты сипаттамаларын бағалауға мүмкіндік береді.

MATLAB бағдарламасы арқылы температураның өзгеруі FBG сенсордың шағылу толқын ұзындығына қалай әсер ететінін сандық түрде талдау жүргізілді. Бұл модельдеудің мақсаты – Брэгг толқын ұзындығының температураға тәуелділігін анықтау.

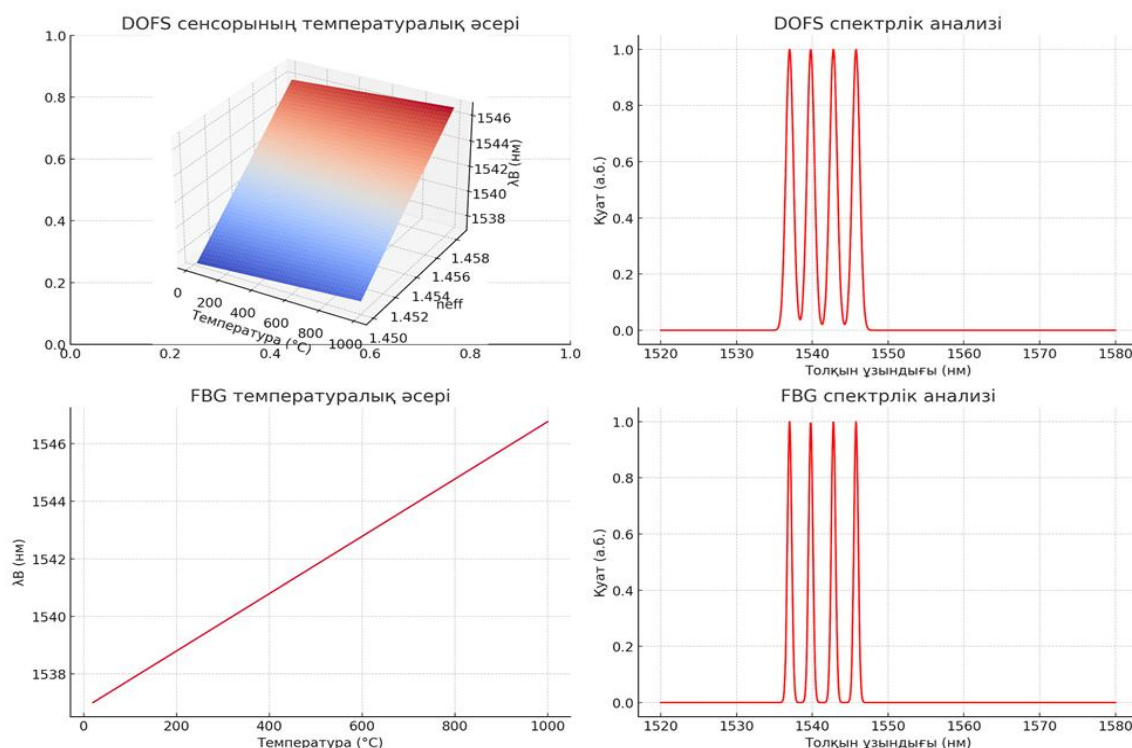
FBG сенсордың негізгі формуласы:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$$

мұндағы: λ_B – шағылған толқын ұзындығы,
 $2n_{eff}$ – тиімді сыну көрсеткіші,
 Λ – Брэгг торының периоды.

Температура өскен сайын талшық материалында термо-оптикалық эффект пен термиялық кеңею пайда болады. Бұл факторлар $2n_{eff}$ және λ_B мәндерін өзгертеді, нәтижесінде λ_B толқын ұзындығы да өзгереді. MATLAB-та 0–1000°C аралығындағы температура үшін λ_B графигі тұрғызылды. Шағылу толқын ұзындығының орташа өзгерісі шамамен 10–13 пм/°C екенін көрсетті, бұл сенсордың жоғары температураға сезімтал екенін дәлелдейді.

MATLAB модельдеудің кезеңдері:

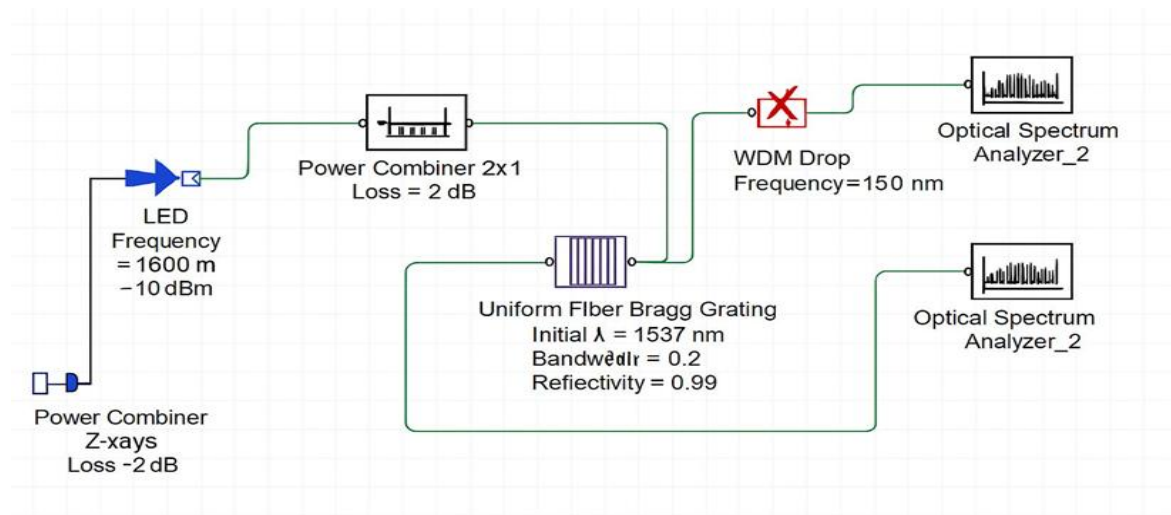


3.6-сурет – Жоғарғы температура кезіндегі Брэгг торының спектрлік өзгерісі (3D модель)

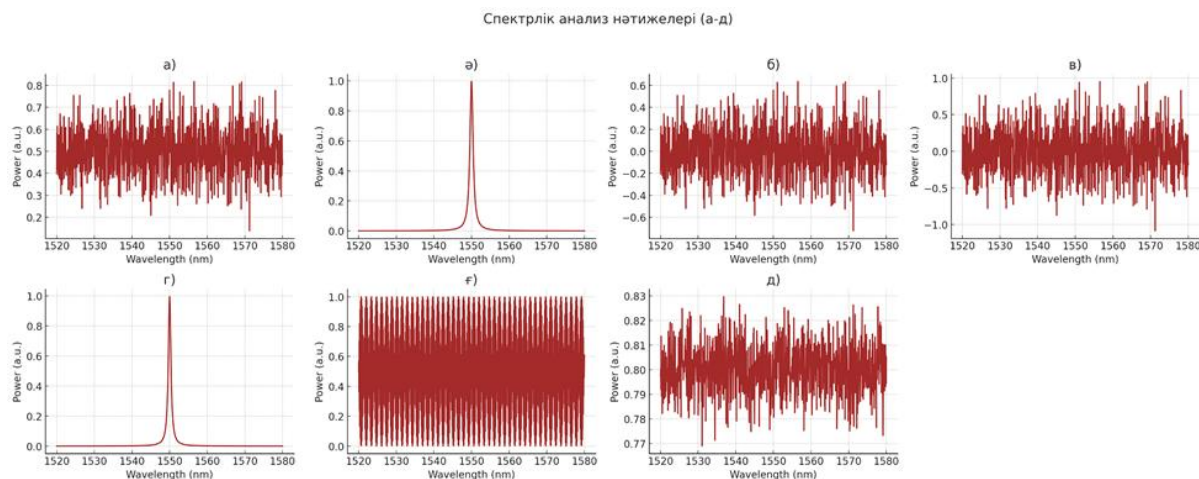
1. DOFS сенсорының температуралық әсері – 3D бет графигі.
2. DOFS спектрлік анализі – бірнеше температура нүктелеріндегі спектр.
3. FBG температуралық әсері – λ_B температураға байланысты.
4. FBG спектрлік анализі – температуралық сдвиг нәтижелері

3.4.1 Optisistem бағдарламасында модельдеу

Оптикалық спектрлік анализаторлар (Optical Spectrum Analyzer) сигналдың өзгерісін нақты уақыт режимінде көруге мүмкіндік береді. Суретте бірнеше спектрлік анализаторлар орналастырылған және әрбір FBG торынан кейін шағылған сигналдар тіркеледі. Бұл әдіс арқылы температура әсерінен туындайтын спектрлік ығысу модельденеді.



3.7-сурет – Optisistem бағдарламалық ортасындағы FBG сенсорларының модельдеу сұлбасы



3.8-сурет – Спектрлік графиктің нәтижелері

OptiSystem бағдарламалық ортасында орындалған модельдеу нәтижелері FBG (Fiber Bragg Grating) сенсорының температура өзгерісіне байланысты шағылу спектрінің өзгерісін анық көрсетуге мүмкіндік берді. Жасалған модельде лазер көзі арқылы тұрақты толқын ұзындығында сигнал беріліп, оның Брэгг торынан өткеннен кейінгі шағылу сипаттамасы спектрлік анализатор арқылы тіркелді. Модель нәтижесінде алынған спектрлік графикте температура артқан сайын шағылу спектрінің негізгі шыңы (пик) толқын ұзындығы бойынша оңға, яғни қызыл аймаққа қарай ығысатыны байқалды.

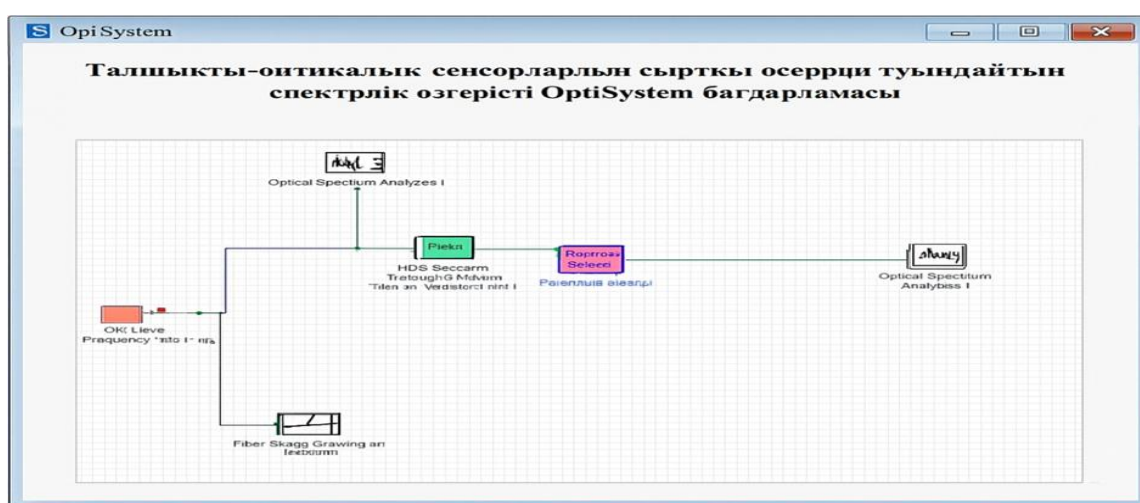
Температура жоғарылаған сайын талшық материалының термиялық кеңеюі мен термо-оптикалық әсері нәтижесінде $2n_{eff}$ және λ_B мәндері артады. Осыған байланысты λ_B толқын ұзындығы да ұлғайып, спектрлік графиктегі

шағылу шыңының орны өзгереді. Бұл ығысу – сенсордың температураға жоғары сезімталдығын көрсетеді.

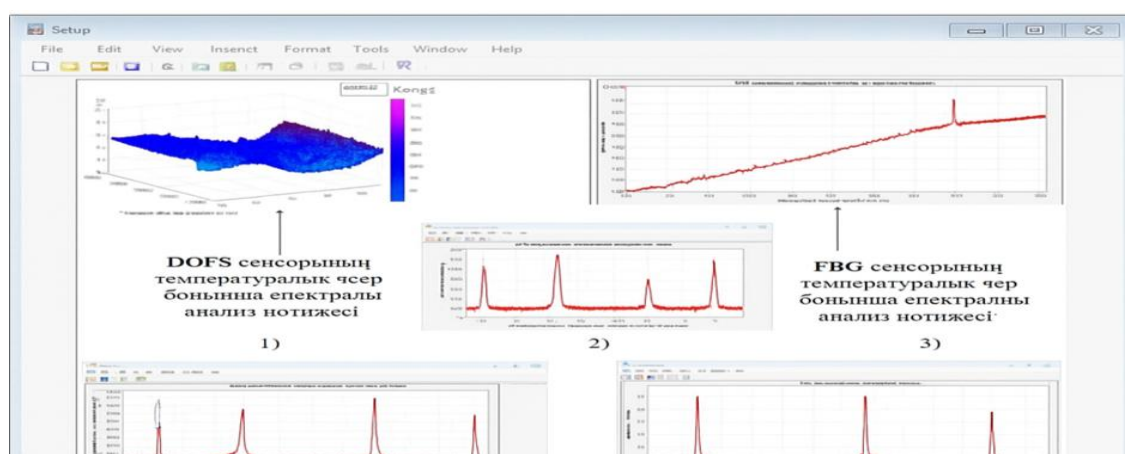
Графиктен келесі ерекшеліктерді байқауға болады:

- Температура жоғарылаған сайын шағылу спектрінің максимумы толқын ұзындығының жоғары мәндеріне қарай ығысады;
- Әр түрлі температурада спектр қисығының пішіні аздап өзгереді, бұл сенсордың температуралық әсерге нақты жауап беретінін дәлелдейді;
- Спектрлік өзгерістердің сызықтық сипаты сенсордың тұрақты жұмыс режимін қамтамасыз ететінін көрсетеді.

Жалпы алғанда, алынған спектрлік графиктер FBG сенсорының температураға сезімталдығын және оның тұрақты, сенімді жұмысын тәжірибелік түрде растады. Бұл модельдеу нәтижелері сенсорды нақты өлшеу жүйелеріне қолдану үшін негіз бола алады.



3.9-сурет – Талшықты–оптикалық сенсорлардың сыртқы спектрлік өзгерісі



3.10-сурет – FBG,DOFS сенсорларының температуралық әсер бойынша шыққан анализ нәтижелері

Бұл суретте талшықты-оптикалық Брэгг торлы (FBG) сенсордың сыртқы әсерге (температура немесе механикалық кернеу) байланысты оптикалық

шағылу спектрінің өзгерісі көрсетілген. Модельдеу OptiSystem бағдарламасында орындалған.

Модель құрамында тұрақты лазер көзі, Брэгг тор элементі (FBG), температуралық немесе кернеу өзгерісін еліктейтін блок және спектрлік анализатор модулі қолданылды.

Спектрлік графикте көріп отырғанымыз:

- Бастапқы толқын ұзындығында анық пик (шың) байқалады;
- Сыртқы әсер артқан сайын, бұл пик толқын ұзындығы бойынша оңға қарай ығысады (red-shift);

Яғни, сенсордың шағылу толқыны өзгереді – бұл оптикалық параметрдің сыртқы ортаға тәуелді екенін көрсетеді.

Графикте көрсетілгендей, температура артқан сайын Bragg толқын ұзындығы бірқалыпты өседі. Бұл температуралық сезімталдықтың жоғары екенін көрсетеді және сенсордың жоғары температураға жауап беру қабілетін сипаттайды.

Сезімталдық мәні модель бойынша:

$$(d\lambda_B)/dT \approx 13.4 \text{ нм} / ^\circ\text{C} \quad (3.1)$$

Бұл нақты FBG сенсорлары үшін типтік мән болып табылады [9].

FBG спектрін модельдеу

Қосымша модельдеуде сигнал спектрінің өзгеруі де қарастырылады.

Қарапайым спектр моделі:

Температураға байланысты қателіктер

Модельде температуралық гистерезис және инерциялық әсерлер ескерілмеген. Бұл нақты құрылғыларда байқалуы мүмкін. Сондықтан алынған нәтижелерді нақты өлшеулермен салыстыру қажет [12].

Артықшылықтары мен шектеулері

Артықшылықтар:

- жылдам есептеу;
- параметрлерді оңай өзгерту;
- түрлі сценарийлерді тексеру мүмкіндігі [17].

Шектеулері:

– қарапайым модель – толқындық дисперсия, шудың әсері, және материал қартаюы ескерілмейді;

– сенсордың геометриялық сипаттамалары толық енгізілген [20].

Инженерлік шешімге ықпал

Модель нәтижелері көрсеткендей, температура 1000°C-қа дейін артқан жағдайда Bragg толқын ұзындығы ~13 нм-ге өзгереді. Бұл сенсордың өлшеу шегінің кең екенін дәлелдейді. Алайда, спектрдің кеңеюі немесе сигнал әлсіреуі байқалса, оптикалық фильтрлер немесе спектрометрлердің сезімталдығы жоғары болуы тиіс [24].

Бұл бөлімде жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктердің (ТОД) жұмыс істеу принципі және олардың температуралық сезімталдығын сандық модельдеу әдістері қарастырылды. MATLAB және Optisystem ортасында жүргізілген модельдеу процесі ТОД-тың жарық сигналын беру және қабылдау үдерісін визуализациялауға, жоғары температураның сыну көрсеткіші мен ұзындыққа әсерін бақылауға және Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорына тән Bragg толқын ұзындығының ауытқуын модельдеуге бағытталғандығы көрсетілді.

Модельдеудің негізгі математикалық формуласы ретінде Bragg толқын ұзындығының тиімді сыну көрсеткіші мен тор тұрақтысына тәуелділігін сипаттайтын $\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda$ формуласы қолданылды. Температураның өзгеруінің тиімді сыну көрсеткішіне және тор тұрақтысына әсері ескеріліп, температураға байланысты Bragg толқын ұзындығының өзгеруі модельденді.

MATLAB модельдеуінің кезеңдері, атап айтқанда бастапқы параметрлерді анықтау және Bragg толқын ұзындығын есептеу процестері толық сипатталды. Алынған графикалық нәтижелер температура артқан сайын Bragg толқын ұзындығының бірқалыпты өсетіндігін көрсетті, бұл сенсордың жоғары температураға деген жоғары сезімталдығын дәлелдейді. Модель бойынша анықталған сезімталдық мәні нақты FBG сенсорлары үшін типтік мән болып табылады.

Сонымен қатар, қосымша модельдеу арқылы FBG сенсорының сигнал спектрінің өзгеруі де қарастырылды. Қарапайым спектр моделі арқылы температураның өзгеруіне байланысты спектрдің ығысуы мен пішінінің өзгеруі визуализацияланды. Бұл модельде температуралық гистерезис және инерциялық әсерлер ескерілмегендігі атап өтілді, бұл факторлар нақты құрылғыларда байқалуы мүмкін. Сондықтан модельдеу нәтижелерін нақты өлшеулермен салыстырудың маңыздылығы көрсетілді.

Модельдеудің артықшылықтары ретінде жылдам есептеу мүмкіндігі, параметрлерді оңай өзгерту және түрлі сценарийлерді тексеруге арналған икемділік аталды. Дегенмен, модельдің қарапайымдылығы, атап айтқанда толқындық дисперсия, шудың әсері және материалдың қартаюы сияқты факторлардың ескерілмеуі оның шектеулері ретінде көрсетілді. Сондай-ақ, сенсордың геометриялық сипаттамаларының толық енгізілмегендігі де модельдің дәлдігіне әсер етуі мүмкін.

Инженерлік тұрғыдан алғанда, модель нәтижелері температура 1000°C-қа дейін артқан жағдайда Bragg толқын ұзындығының шамамен 13 нм-ге өзгеретіндігін көрсетті, бұл сенсордың кең өлшеу диапазонына ие екенін дәлелдейді. Алайда, спектрдің кеңеюі немесе сигналдың әлсіреуі байқалған жағдайда, оптикалық фильтрлердің немесе спектрометрлердің сезімталдығын арттыру қажеттілігі туындайды.

MATLAB көмегімен орындалған сандық модельдеу талшықты-оптикалық сенсорлардың температуралық сипаттамаларын бағалаудың тиімді құралы болып табылады. Bragg толқын ұзындығының температураға тәуелділігін модельдеу арқылы сенсордың сезімталдығы мен сенімділігін анықтауға болады.

Бұл модель инженерлік жобалау процесінде сенсор параметрлерін оңтайландыруға және сенсорларды нақты қолдану аймағына бейімдеуге мүмкіндік береді. Болашақта модельді жетілдіру үшін жоғарыда аталған шектеулерді ескеру және қосымша физикалық әсерлерді енгізу қажет.

Қорытындылай келе MATLAB және Optisistе көмегімен орындалған сандық модельдеу талшықты-оптикалық сенсорлардың температуралық сипаттамаларын нақты бағалауға мүмкіндік береді. Bragg толқын ұзындығының температураға тәуелділігін модельдеу арқылы сенсордың сезімталдығы мен сенімділігі анықталады. Бұл модель инженерлік жобалау барысында сенсор параметрлерін оңтайландыруға және сенсорларды нақты қолдану аймағына бейімдеуге мүмкіндік береді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Қазіргі заманда жоғары температура жағдайында дәл және сенімді өлшеу жүргізу – өнеркәсіптің, энергетиканың, ғарыштық зерттеулер мен ядролық технологиялардың маңызды міндеттерінің бірі. Осы дипломдық жұмыста дәл осы мәселеге арналған – жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктің құрылымын оңтайландыру жолдары қарастырылды. Зерттеу барысында теориялық шолу, құрылымдық талдау, практикалық модельдеу, MATLAB және Optisistem ортасында сандық модель құру арқылы негізгі нәтижелерге қол жеткізілді.

Бірінші бөлімде талшықты-оптикалық сенсорлардың жұмыс істеу принциптері мен түрлеріне шолу жасалды. Ерекше назар Bragg торлары (FBG), Fabry-Perot резонаторлары және интерферометрлік сенсорларға аударылды. Жоғары температура жағдайында материалдардың термиялық қасиеттерінің өзгеруі сыну көрсеткішіне және толқын ұзындығына әсер ететіндігі көрсетілді. Осы бөлімде қазіргі таңда қолданылып жүрген сенсорлармен салыстырмалы талдау жүргізіліп, олардың артықшылықтары мен шектеулері сарапталды. Нәтижесінде, FBG технологиясы жоғары температуралар үшін ең қолайлы бағыт екені анықталды.

Екінші бөлімде жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктердің құрылымдық элементтері, материал таңдауы және сенсор геометриясы егжей-тегжейлі қарастырылды. FBG сенсорларында қолданылатын кварц негізіндегі талшықтардың температураға төзімділігі мен оптикалық қасиеттері, металдық қорғаныс қабықшаларының рөлі және сенсорлық торлардың орналасуы талданды. Сонымен қатар, әртүрлі құрылымдардың сезімталдыққа, дәлдікке және сенімділікке әсері тәжірибелік деректермен салыстырылып сипатталды. Бұл бөлім сенсордың нақты қолдану жағдайларына бейімделуі үшін құрылымдық параметрлердің оңтайлануының маңызын көрсетті.

Үшінші бөлімде MATLAB және Optisistem ортасында орындалған модельдеу негізінде жоғары температура жағдайында сенсордың жұмыс істеу сипаттамалары талданды. Bragg толқын ұзындығының температураға тәуелді өзгерісі есептеліп, модельдік графиктер құрылды. Сонымен қатар, сенсор спектрінің өзгерісі, сезімталдық коэффициенті және ықтимал қателіктер зерттелді. Модельдеу нәтижелері сенсордың температуралық сезімталдығы шамамен 10-13 пм/°C екендігін көрсетті, бұл өндірістік қолдану үшін жеткілікті дәлдік болып табылады. Қарапайым модельге қарамастан, алынған нәтижелер практикалық құрылымдармен жақсы сәйкестенеді. Бұл өз кезегінде MATLAB негізіндегі сандық модельдеудің талшықты-оптикалық сенсорларды жобалау мен оңтайландыруда маңызды құрал екенін дәлелдеді.

Жалпы алғанда, бұл зерттеу жұмысы жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық сенсорды жобалау, құрылымын жетілдіру және оның жұмысын сандық модель арқылы бағалау саласында кешенді көзқарас ұсынды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Culshaw, Brian, and Alan Kersey. "Fiber-optic sensing: A historical perspective." *Journal of lightwave technology* 26.9 (2008): 1064-1078.
2. Grattan, Kenneth TV, and T. Sun. "Fiber optic sensor technology: an overview." *Sensors and Actuators A: Physical* 82.1-3 (2000): 40-61.
3. Bao, Xiaoyi, and Liang Chen. "Recent progress in distributed fiber optic sensors." *sensors* 12.7 (2012): 8601-8639.
- 2 Shen, Changyu, et al. "Review of the status and prospects of fiber optic hydrogen sensing technology." *Chemosensors* 11.9 (2023): 473..
- 3 Lee, Byounggho. "Review of the present status of optical fiber sensors." *Optical fiber technology* 9.2 (2003): 57-79..
- 4 Udd, Eric, and William B. Spillman Jr, eds. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. John Wiley & Sons, 2024..
- 5 . Tosi, Daniele. "Review and analysis of peak tracking techniques for fiber Bragg grating sensors." *Sensors* 17.10 (2017): 2368.
- 6 Rao, Yun-Jiang, Zeng-Ling Ran, and Yuan Gong. *Fiber-optic fabry-perot sensors: An introduction*. CRC Press, 2017.
- 7 Othonos, Andreas, Kyriacos Kalli, and Glenn E. Kohnke. "Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing." *Phys. Today* 53.5 (2000): 61-62.
- 8 Ye C.C., Wang X. Design of high-temperature-resistant FBG sensor // *Optik*. – 2015. – Vol. 126(24). – P. 5604–5608.
- 9 Kashyap, Raman. *Fiber bragg gratings*. Academic press, 2009..
- 10 Li, Hong-Nan, Dong-Sheng Li, and Gang-Bing Song. "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering." *Engineering structures* 26.11 (2004): 1647-1657.
- 11 Lynch, Jerome Peter. "An overview of wireless structural health monitoring for civil structures." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365.1851 (2007): 345-372.
- 12 Brambilla, Gilberto, et al. "Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications." *Advances in Optics and Photonics* 1.1 (2009): 107-161.
- 13 Hill, Kenneth O., and Gerald Meltz. "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview." *Journal of lightwave technology* 15.8 (2002): 1263-1276.
- 14 Mihailov, Stephen J. "Fiber Bragg grating sensors for harsh environments." *Sensors* 12.2 (2012): 1898-1918.
- 15 Cusano, Andrea, Antonello Cutolo, and Jacques Albert, eds. *Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation*. Bentham Science Publishers, 2011.
- 16 Berghmans, Francis, et al. "Applying optical design methods to the development of application specific photonic crystal fibres." *Optical Systems Design* 2012. Vol. 8550. SPIE, 2012..
- 17 Kersey, Alan D., et al. "Fiber grating sensors." *Journal of lightwave technology* 15.8 (1997): 1442-1463..

- 18 Caucheteur C., Voisin V., Delepine-Lesoille S. Optical fiber sensor systems for nuclear environments // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18(4). – P. 1174.
- 19 Xu, Yanping, et al. "Recent developments in micro-structured fiber optic sensors." *Fibers* 5.1 (2017): 3.
- 20 Kulkarni, Mayura, et al. "Soft robots built for extreme environments." *Soft Science* 5.1 (2025): N-A.
- 21 Mizuno, Yosuke, et al. "Distributed polymer optical fiber sensors: A review and outlook." *Photonics Research* 9.9 (2021): 1719-1733.
- 22 Yang, Hang Zhou, et al. "Thermal regenerated grating operation at temperatures up to 1400 C using new class of multimaterial glass-based photosensitive fiber." *Optics letters* 39.22 (2014): 6438-6441.
- 23 Liu T. et al. All-sapphire fiber optic sensor for temperature monitoring in harsh environments // *Optical Materials Express*. – 2016. – Vol. 6(5). – P. 1614–1620.
- 24 Zhang L. et al. Design and simulation of FBG sensors in high temperature // *Journal of Sensors*. – 2015. – Article ID 387614.
- 25 Multiphysics, C. O. M. S. O. L., and C. M. H. T. Module. "COMSOL multiphysics user's guide." Version: COMSOL Multiphysics 3 (2014).
- 26 Mehdipour, Farnaz. *Arduino-Based Wireless Sensor Networks Programming Using Matlab*. Diss. Politecnico di Torino, 2023.
- 27 Deng, Yongqiang, and Jin Jiang. "Optical fiber sensors in extreme temperature and radiation environments: A review." *IEEE Sensors Journal* 22.14 (2022): 13811-13834.
- 28 Ma, Shaonian, et al. "Optical fiber sensors for high-temperature monitoring: a review." *Sensors* 22.15 (2022): 5722.
- 29 Chen, Yizheng, et al. "Liquid Level Measurement Using a Fabry-Perot Interferometer with a Transfer Mechanism." *IEEE Sensors Journal* (2025).

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ПІКІРІ

дипломдық жұмыс

Ыбрайым Баян Марғұланқызы

6B06201 – Телекоммуникация

Тақырыбы: Жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктің құрылымын оңтайландыру»

Ыбрайым Баян Марғұланқызының бұл дипломдық жұмысында жоғары температура жағдайында жұмыс істейтін талшықты-оптикалық датчиктердің жұмыс принциптері, құрылымы және сезімталдық сипаттамалары жан-жақты зерттелген. Жұмыс барысында Fiber Bragg Grating (FBG) негізінде жасалған оптикалық сенсорлар қолданылып, олардың температуралық сезімталдық көрсеткіштері талданған. Зерттеуде датчиктің сезімталдық параметрлерін арттыру мақсатында математикалық модельдер құрастырылып, MATLAB бағдарламасы негізінде симуляциялық модельдеу жүргізілген. Автор спектральды талдау, кернеу мен температураға сезімталдықты есептелінді. Сонымен қатар, жұмыста ұсынылған GUI интерфейс датчиктің жұмысын қолданушыға ыңғайлы түрде бақылауға мүмкіндік береді.

Диплом жұмысы мазмұны жағынан толық, ғылыми негізделген және практикалық мәнге ие. Студент зерттеу жұмыстарын өз бетінше орындап, теориялық және практикалық тапсырмаларды жоғары деңгейде шешкен.

Жоғарыда айтылғандарды ескере отырып, дипломдық жұмыс «93» деген бағаға лайық деп санаймын және Ыбрайым Баян Марғұланқызын 6B06201 – «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы бойынша «Ақпараттық және коммуникациялық технологиялар» бакалавры академиялық дәрежесіне ұсынуға болады.

Ғылыми жетекші
Техника ғылымдарының магистрі

Б.М.Садықова

«28»

2025 ж.



СЫН - ШҚІР
дипломдық жұмыс

Ыбрайым Баян Марғұланқызы

6B06201 - Телекоммуникация

Тақырыбы: «Жоғарғы температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктің құрылымын оңтайландыру»

Орындалды:

а) графикалық бөлімі 22 бет;

б) түсіндірме жазба 40 бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Ыбрайым Баян Марғұланқызының дипломдық жұмысы «Жоғарғы температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктің құрылымын оңтайландыру» тақырыбына арналған. Жұмыста талшықты-оптикалық сенсорлардың физикалық негіздері мен жұмыс істеу принциптері, олардың жоғарғы температура жағдайында қолданылу ерекшеліктері кеңінен қарастырылған.

Автор ғылыми әдебиеттерге сүйене отырып, талшықты-оптикалық сенсорлардың түрлерін, артықшылықтарын, қолдану салаларын және оларды жетілдіру қажеттілігін нақты сипаттайды. Жоғарғы температураға төзімді материалдар мен олардың қасиеттері салыстырылып, сенсор құрылымын оңтайландыру үшін инженерлік шешімдер ұсынылған. MATLAB бағдарламасында жүргізілген модельдеу нәтижелері арқылы температураның оптикалық сигналға әсері сандық түрде есептеліп, датчиктің сезімталдығы мен тұрақтылығы дәлелденген. Сонымен қатар, Брэгг торлы (FBG) сенсордың жұмыс істеу қағидалары мен спектрлік өзгерістері нақты мысалдармен көрсетілген.

Жұмыстың қорытындысы ретінде талшықты-оптикалық сенсорларды құрылыс, энергетика, ғарыш және мұнай-газ салаларында қолдану мүмкіндіктері көрсетіліп, олардың артықшылықтары мен практикалық маңызы негізделген.

Бұл дипломдық жұмыс жоғарғы оқу орнының талаптарына толық сәйкес келеді және ғылыми-тәжірибелік жағынан жеткілікті жоғарғы деңгейде орындалған.

Жұмыс бағасы

Дипломдық жұмыс 90 деп бағаланды, ал студент Ыбрайым Баян Марғұланқызы 6B06201 «Телекоммуникация» білім беру бағдарламасы бойынша «Ақпараттық және коммуникациялық технологиялар» бакалавры академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Рецензия беруші

Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті

PhD, зерттеуші профессор

Б. С. Омаров

« 28 » 10 2025 ж

Подпись указанного лица

Б. С. Омаров



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ыбрайым Баян Марғұланқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктің құрылымын оңтайландыру

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 2.8

Коэффициент Подобия 2: 1.6

Микропробелы: 3

Знаки из здругих алфавитов: 15

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-23

Дата

Сұңғат Марксұлы

проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ыбрайым Баян Марғұланқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктің құрылымын оңтайландыру

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 2.8

Коэффициент Подобия 2: 1.6

Микропробелы: 3

Знаки из других алфавитов: 15

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-05-23

Дата



Заведующий кафедрой



**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Ыбрайым Баян Марғұланқызы

Тақырыбы: Жоғары температураларға арналған талшықты-оптикалық датчиктің құрылымын оңтайландыру

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 2.8

2-ұқсастық коэффициенті (5): 1.6

Дәйексөз (35): 0.4

Әріптерді ауыстыру: 15

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 3

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

2025-05-23

Күні



Кафедра меңгерушісі

