

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

"Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті"
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

ӘОЖ 681.586.5

Қолжазба құқығында

Жумагазиев Адилбек Талгатулы

Магистр академиялық дәрежесін алу үшін
МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертацияның атауы Жоғары температуралы ортада қолдануға арналған талшықты-оптикалық қысым сенсорын модельдеу және зерттеу

Дайындау бағыты 7М06201- «Телекоммуникация »

Ғылыми жетекші
PhD докторы
қауымдастырылған профессор
Смайлов Н.К.

«05» 06 2024 ж.

Рецензент
Phd докторы,
ғылым жөніндегі проректор
Д.С Жамангарин

«05» 06 2024ж.

Норма бақылаушы
т.ғ.м., ассистент
Кенгесбаева С.С.

«01» 06 2024ж.

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
ЭТжТ кафедра меңгерушісі
т.ғ.к., қауым. профессор

Е. Таштай

«05» 06 2024ж.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

“Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті”
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыш технологиялар

7M06201- «Телекоммуникация»



**Магистерлік диссертация орындауға
ТАПСЫРМА**

Магистрант: *Жумагазиев Адилбек Талғатулы*

Тақырыбы: *«Жоғары температуралы ортада қолдануға арналған талшықты-оптикалық қысым сенсорын модельдеу және зерттеу»*

Университет ректорының *«31» тамыз 2023 ж. №1365-М бұйрығымен* бекітілген.

Аяқталған жобаны тапсыру мерзімі: *« _____ » сәуір 2024 ж.*

Жұмыстың бастапқы мәліметтері: 1) Талшықты-оптикалық қысым сенсорларының тиімділігі; 2) Қысымның әсерінен оптикалық талшықтың механикалық деформацияларын сипаттайтын модель құру; 3) Деформацияланған талшықта жарық толқындарының таралу математикалық моделін есептеу.

Магистрлік диссертацияда қарастырылатын сұрақтар, диссертацияның қысқаша мазмұны:

- а) Талшықты-оптикалық түрлендіргіште болатын физикалық процестер;*
- ә) Қысым және температураның арнайы алынған диапазонындағы жарықтың сыну көрсеткіші өзгеруіне тәуелділігін зерттеу.*
- б) Қысым сенсорының сыртқы қабаты элементінің жоғары температуралы ортадағы деформациялану деңгейін ANSYS Engineering бағдарламалық жүйесінде модельдеу.*



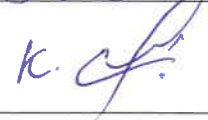
Ұсынылған негізгі әдебиеттер:

- 1) Ma, S.; Xu, Y.; Pang, Y.; Zhao, X.; Li, Y.; Qin, Z.; Liu, Z.; Lu, P.; Bao, X. Optical Fiber Sensors for High-Temperature Monitoring: A Review. Sensors 2022, 22, 5722
- 2) Shrinkhla G; Rajappa B; Joseph J; Characterization of Fabry Perot Interferometer based Pressure Sensor of Range 100 mbar 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON) | 978-1-7281-6916-3/20/\$31.00 ©2020.
- 3) Yang, S.; Homa, D.; Heyl, H.; Theis, L.; Beach, J.; Dudding, B.; Acord, G.; Taylor, D.; Pickrell, G.; Wang, A. Application of sapphire-fiber-bragg-grating-based multi-point temperature sensor in boilers at a commercial power plant. Sensors 2019, 19, 3211.
- 4) Бростилов, С.А. К вопросу о создании и внедрении волоконно-оптических систем и сенсоров давления на изделиях ракетно-космической и авиационной техники/ Т.Ю. Бростилова, С.А. Бростилов // Труды межвузовского сборника Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС 2012. Пенза: Изд-во ЛГУ 2012 г., с.23-28

Магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімі	Ескерту
Талшықты-оптикалық қысым сенсорларының жұмыс принциптері, артықшылықтары мен кемшіліктерін зерттеу	13.02.2023 - 27.06.2023	орындалды
Қысым және температураның сенсордағы жарықтың таралуына әсері	01.09.2023 - 04.01 2024	орындалды
Қысым сенсоры элементін ANSYS Engineering бағдарламалық ортасында модельдеу	15.03.2024-25.04.2024	орындалды

Аяқталған магистрлік диссертация үшін, оған қатысты бөлімдердегі диссертация кеңесшілері мен норма бақылаушысының қойған
қолтаңбалары

Бөлімдердің атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күн	Қолы
Диссертация жұмысының тақырыбын талдау	PhD докторы қауымдастырылған профессор Смайлов Нуржигит Куралбаевич	17.10.2022	
Теориялық ақпарат	PhD докторы қауымдастырылған профессор Смайлов Нуржигит Куралбаевич	20.04.2023	
Норма Бақылау	Кенгесбаева Сара ЭТжҒТ каф.ассистенті, т.ғ.м.	01.06.2024	

Ғылыми жетекшісі


(қолы)

Смайлов Н.К.

Магистрант тапсырманы орындауға алды


(қолы)

Жумагазиев А.Т.

Күні “03” 10 2022 ж.

АННОТАЦИЯ

Магистрлік диссертация тақырыбы «Жоғары температуралы ортада қолдануға арналған талшықты-оптикалық қысым сенсорын модельдеу және зерттеу».

Бұл магистрлік диссертация кіріспеден және үш тараудан тұрады, сонымен қатар магистрлік диссертация жазу кезінде қолданылған мен әдебиеттер тізімі мен қорытындыдан құралған.

Жұмыстың мақсаты жоғары температуралы ортада қолданылуға арналған қысым сенсорын зерттеу және ондағы процестерді модельдеу.

Сенсордың жұмысын модельдеу заманауи бағдарламалық жасақтаманың көмегімен жүзеге асырылды, бұл оның әртүрлі температуралар мен қысымдардағы әрекетін егжей-тегжейлі зерттеуге мүмкіндік берді. Нәтижелер экстремалды жағдайларда сенімді қысымды бақылауды қажет ететін өнеркәсіптік қосымшаларда сенсорларының қолданудың перспективасын көрсетеді.

Жұмыс қорытындысында өнеркәсіпке талшықты-оптикалық қысым сенсортерін одан әрі дамыту және енгізу бойынша негізгі тұжырымдар мен ұсынымдар баяндалған.

АННОТАЦИЯ

Тема магистерской диссертации «моделирование и исследование волоконно - оптического сенсора давления для использования в высокотемпературных средах».

Эта Магистерская диссертация состоит из введения и трех глав, а также списка литературы и заключения, использованного при написании магистерской диссертации.

Целью работы является исследование сенсора давления для применения в высокотемпературных средах и моделирование процессов на нем.

Моделирование работы сенсора осуществлялось с помощью современного программного обеспечения, что позволило детально изучить его поведение при различных температурах и давлениях. Результаты показывают перспективу использования сенсоров давления в промышленных приложениях, требующих надежного контроля давления в экстремальных условиях.

В заключении работы изложены основные выводы и рекомендации по дальнейшему развитию и внедрению в промышленности волоконно-оптических сенсоров давления.

ANNOTATION

The topic of the master's thesis is "modeling and research of a fiber - optic pressure sensor for use in high-temperature environments".

This master's thesis consists of an introduction and three chapters, as well as a list of references and conclusions that were used when writing a master's thesis.

The purpose of the work is to study the pressure sensor for use in high-temperature environments and simulate the processes occurring in it.

Modeling the operation of the sensor was carried out with the help of modern software, which made it possible to study in detail its behavior at different temperatures and pressures. The results show the prospect of using pressure sensors in industrial applications that require reliable pressure monitoring in extreme conditions.

As a result of the work, the main conclusions and recommendations for the further development and implementation of fiber-optic pressure sensors in the industry are outlined.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	6
1. Жоғары температуралы талшықты-оптикалық қысым сенсорларын технологиялық жобалау	8
1.1 Қолданыстағы талшықты-оптикалық қысым сенсорларын талдау және оларды жасау технологиясын зерттеу	9
2 Талшықты-оптикалық түрлендіргішінде болатын физикалық процестерді математикалық модельдеу	20
2.1 Шағылыстырғыш типті талшықты-оптикалық микро ығысу түрлендіргішінің құрылымдық-технологиялық параметрлерін сандық математикалық модельдеу	21
2.2 Талшықты-оптикалық қысым сенсорының түрлендіргіштеріне жарықтың өтуінің математикалық моделін құру	24
3 Талшықты-оптикалық Брегг торларына негізделген жоғары температуралы қатты күйдегі қысым сенсорының параметрлерін зерттеу	33
3.1 Брегг талшықты торлары негізіндегі қысым сенсоры	33
3.2 Қысым сынағы және температураны өтеу әдісін моделдеу	37
3.3 Температураны өтеу әдісі	40
3.4 Температура мен қысымды айқастыру	41
Қорытынды	43
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	44

КІРІСПЕ

Зымыран-ғарыш және авиациялық техниканың қазіргі заманғы ақпараттық-өлшеу жүйелеріне қойылатын аса маңызды талаптар өлшемдердің сенімділігі мен дәлдігінің жоғарылауы болып табылады. Сонымен қатар, күшті электромагниттік кедергілердің әсерінен абсолютті ұшқын, жарылыс, өрт қауіпсіздігі, жұмыс қабілеттілігі талаптары жиі кездеседі. Дәстүрлі жүйелерден айырмашылығы, талшықты-оптикалық сенсортерге негізделген талшықты-оптикалық ақпараттық-өлшеу жүйелері (ТОАӨЖ) осы мәселелерді шешуге мүмкіндік береді.

ТОАӨЖ әзірлеу мен енгізудің күрделілігі талшықты-оптикалық сенсортерді дайындаудың технологиялық процестері мен рәсімдерін әзірлеу және жетілдіру, олардың массалық габариттік сипаттамаларын төмендету, метрологиялық сипаттамаларын едәуір жақсарту, пайдаланудың қатаң жағдайларында жұмысқа қабілеттілігін қамтамасыз ету қажеттілігімен байланысты. Сонымен, жоғары қысымды +300 °С дейінгі температурада талшықты-оптикалық қысым сенсоры (ТОҚС) көмегімен өлшеу мәселелері әлі шешілген жоқ.

Қазіргі уақытта сәулелену көздері мен қабылдағыштарының (жарық және фотодиодтар), металл мембраналарының параметрлерінің өзгеруіне, оптикалық талшықтардың мүмкін иілуіне байланысты жоғары қосымша қателіктерге байланысты қарапайым өндіріс технологиясы мен құрылымы бар және қатты жұмыс жағдайында жұмыс істеуге арналмаған рефлекторлық типтегі су құбырларын сериялық өндіру үшін ең көп әзірленген. Мұндай жоғары температурадағы температура қателігі 10 % жетуі мүмкін. Шағылысу типтегі ТОҚС оптикалық талшықтар алыс дифракция аймағында мембранаға қатысты алыс орнатылғандықтан (1...1,5 мм), содан кейін оптикалық сигналды түрлендірудің жоғары сезімталдығын қамтамасыз ету үшін мембрананың ауытқуы 50...150 мкм болуы керек, бұл үлкен динамикалық қателікке әкеледі, сонымен қатар бірнеше бұрылатын оптикалық талшықтарды қолдану қажеттілігі, бұл ТОҚС массалық сипаттамалар мен шығындардың өсуіне әкеледі.

Сондықтан өндіріс технологиясын жетілдіру негізінде жақсартылған метрологиялық және пайдалану сипаттамалары бар шағын көлемді жоғары температуралы ТОҚС құру өзекті міндет болып табылады, оны шешу ұшқын, жарылыс, өрт қауіпсіздігі бағыттарында әзірлеу және енгізу барысы үшін жаңа мүмкіндіктер ашады.

Бұл жағдайда шыны мембрананы пайдалану оптикалық сигналдың модуляция тереңдігінің едәуір артуын, температура мен динамикалық қателіктердің ретке келуін қамтамасыз етеді.

Бұл ретте жана ТОҚС құру кезінде технологиялық сипаттағы мәселелер айқындаушы болып табылады, өйткені біз ТОҚС-негізгі элементтері болып табылатын негізгі талшықты-оптикалық микробығу түрлендіргіштерінің (ТОМТ) 0-10 мкм диапазонында бір-біріне қатысты оптикалық элементтердің

(оптикалық талшықтарды, шыны мембрананы жеткізу және бұру) орналасуы мен конфигурациясы туралы айтып отырмыз.

Зерттеу және моделдеудің мақсаты мен міндеті, мұнда диссертациялық жұмыстың мақсаты өндіріс технологиясын жетілдіру және жоғары температуралы талшықты-оптикалық қысым сенсортерінің дәлдігі мен сенімділігін арттыру болып табылады.

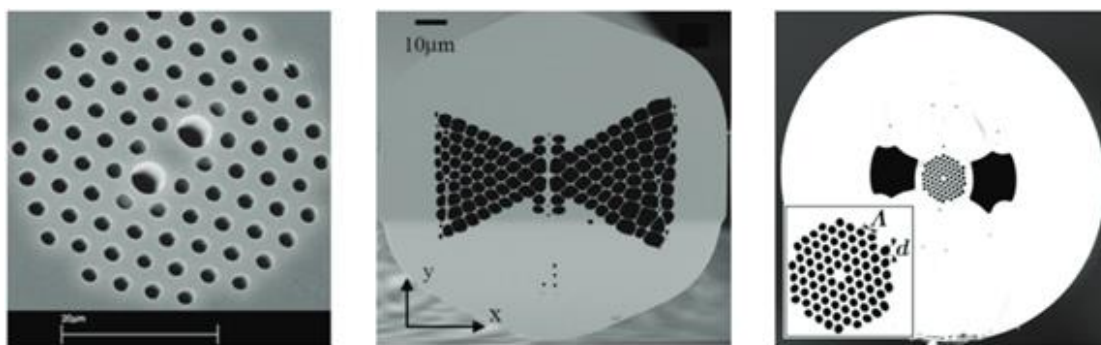
Жұмыста шешілген ғылыми міндет жоғары температуралы ортадағы өндірісте қолданылатын метрологиялық және пайдалану сипаттамалары жақсартылған Жоғары температуралы ТОҚС өндірудің ғылыми негізделген техникалық шешімдерін зерттеу және әзірлеу.

1 Жоғары температуралы талшықты-оптикалық қысым сенсорларын технологиялық жобалау

«Талшық» сөзінде қарапайым адам нәзік бұйраларға оралған немесе шам жарығынан ағып жатқан жарқыраған түктерді елестетеді. Бірақ бұл жарықдиодты кварц жіптері декорациядан да көп. 1950 жылдары пайда болғаннан бері оптикалық талшықтар энергияны беру, байланыс, кескін беру және өлшеу үшін пайдаланылды.

Сонымен қатар, олар басқа өлшеу әдістері жұмыс істемейтін жағдайларда жиі қолданылады. Әмбебап диэлектрлік оптикалық талшықтарды вакуумдық камерада немесе мұхит түбінде қолдануға болады.

Талшықтан қысым сенсортеріне дейін стандартты оптикалық талшықтар байланыс жүйелерінде қолдануға арналған және өлшеуге жарамсыз болды. Талшықтың бізге қажетті параметрге сезімтал болуы үшін оны өңдеу қажет, мысалы, талшықты торды немесе талшықтардың арнайы микроқұрылымын енгізу. Микроқұрылымды талшықтар мұнай кен орындарын барлау сияқты қолданбалы тапсырмалар үшін сезімтал қысым сенсортерін өндіруде пайдалы болуы мүмкін. Техниктер мен инженерлер оларды сұйықтық қысымын анықтау үшін пайдаланады. 1.1-суретте әдебиеттерден алынған қысым сенсоры ретінде жұмыс істейтін оптикалық талшықтың мысалдары көрсетілген.



1.1-сурет - Қысым сенсортеріндегі микроқұрылымды оптикалық талшықтар: (1) фотонды кристалды талшық, (2) микроқұрылым - үшбұрышты тесік торы бар күшейтілген талшық, (3) бүйірлік тесіктері бар фотонды кристалды талшық .

Талшықты-оптикалық қысым (ТОҚС) сенсорлар сезімталдық пен электромагниттік қауіпсіздікте тиімді, төтенше жағдайларда жұмыс істей алады. Олар әдетте өте кішкентай, жеңіл және сенсордың сипаттамаларын еркін таңдауға мүмкіндік береді

ТОҚС әзірлеу мен енгізудің күрделілігі талшықты-оптикалық сенсортерді дайындаудың технологиялық процестері мен рәсімдерін әзірлеу және жетілдіру, олардың массалық габариттік сипаттамаларын төмендету, метрологиялық сипаттамаларын едәуір жақсарту, пайдаланудың қатаң жағдайларында жұмысқа қабілеттілігін қамтамасыз ету қажеттілігімен

байланысты. Сонымен, + 300°C дейінгі температурада ТОҚС көмегімен қысымды өлшеу мәселелері әлі шешілген жоқ.

1.1 Қолданыстағы талшықты-оптикалық қысым сенсорларын талдау және оларды жасау технологиясын зерттеу

Қазіргі уақытта сәулелену көздері мен қабылдағыштарының (жарық және фотодиодтар), металл мембраналарының параметрлерінің өзгеруіне, оптикалық талшықтардың мүмкін иілуіне байланысты жоғары қосымша қателіктерге байланысты қарапайым өндіріс технологиясы мен құрылымы бар және қатты жұмыс жағдайында жұмыс істеуге арналмаған рефлекторлық типтегі су құбырларын сериялық өндіру үшін ең көп әзірленген. Мұндай жоғары температурадағы температура қателігі 10 % жетуі мүмкін. Шағылысу типтегі ТОҚС оптикалық талшықтар алыс дифракция аймағында мембранаға қатысты алыс орнатылғандықтан (1...1,5 мм), содан кейін оптикалық сигналды түрлендірудің жоғары сезімталдығын қамтамасыз ету үшін мембрананың ауытқуы 50...150 мкм болуы керек, бұл үлкен динамикалық қателікке әкеледі, сонымен қатар бірнеше бұрылатын оптикалық талшықтарды қолдану қажеттілігі, бұл ТОҚС массалық сипаттамалар мен шығындардың өсуіне әкеледі.

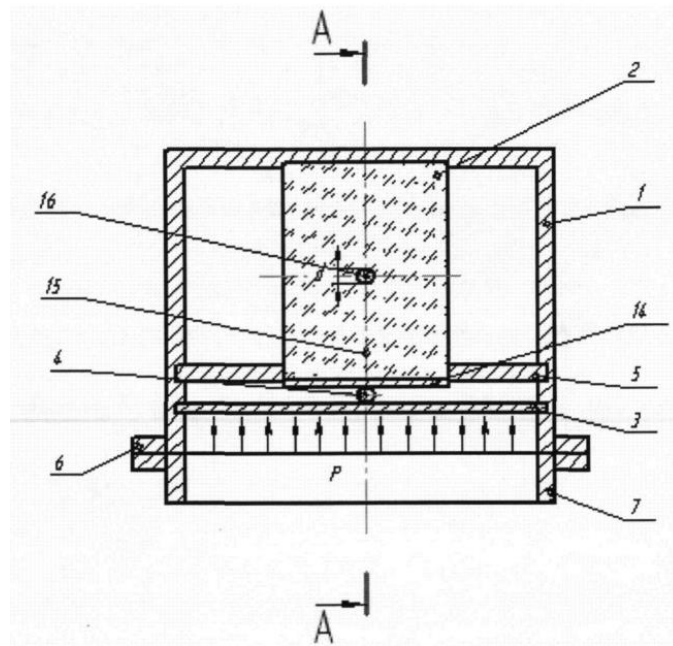
Жұмыста қойылған ТОҚС құру міндеттерін және оларды дайындау технологиясын шешу үшін патенттік зерттеулер жүргізілді. 1.2-суретте ТОҚС қарастырылған, оны белгілі бір нақтылау кезінде жоғары температурада қолдануға болады, өйткені оның негізгі құрылымдық технологиялық компоненттері шыны және жоғары температуралы қорытпалар болып табылады.

ТОҚС 1-корпусынан тұрады, оның ойығына 3-мембрана орналастырылған, ол 14 төсеме және 4 шар оптикалық белсенді материалдан жасалған 2 пластинамен байланысқан. 3-мембрана сезімтал элемент бола отырып, 1-корпустың жұмыс кеңістігін тығыздайды.

16-тесік пластинаның жүктемесі кезінде пайда болатын тангенс кернеулеріне байланысты жарық түстерінің арасындағы нақты шекараны алу үшін қажет. Корпуста бағыттаушы жарық өткізгіштің көмегімен поляризацияланған жарық көзіне қосылған бағыттаушы линза орналасқан. 11-анализатор 12-қабылдау линзасы және тіркеу аппаратурасы бар қабылдау жарық өткізгіші арқылы қосылады. 6-фланецтің көмегімен жұмыс ортасының қысымын жеткізу үшін 7-құбыр корпусқа бекітіледі.

Бұл талшықты-оптикалық қысым датчигін қолдану келесі артықшылықтарды қамтамасыз етеді:

- жарылыс қаупі бар ортада, яғни ракеталық жүйелер (РЖ) және авиациялық жүйелер (АЖ) бұйымдарының жұмысына тән жағдайларда жұмыс істеу мүмкіндігі;
- өлшеулердің дәлдігін, жеделдігін және дұрыстығын арттыру.



1.2-сурет- Талшықты-оптикалық қысым сенсоры [12]: 1-корпус; 2-пластина; 3-мембрана; 4-шар; 5-шектегіш; 6-фланец; 7-келте құбыр; 8-поляризацияланған жарық көзі; 9-жарық өткізгіш; 10 - бағыттаушы линза; 11-анализатор; 12-қабылдағыш линза; 13 - тіркеуші аппаратура; 14 - төсем; 15-оптикалық белсенді материалдан жасалған пластинаның симметрия осі.

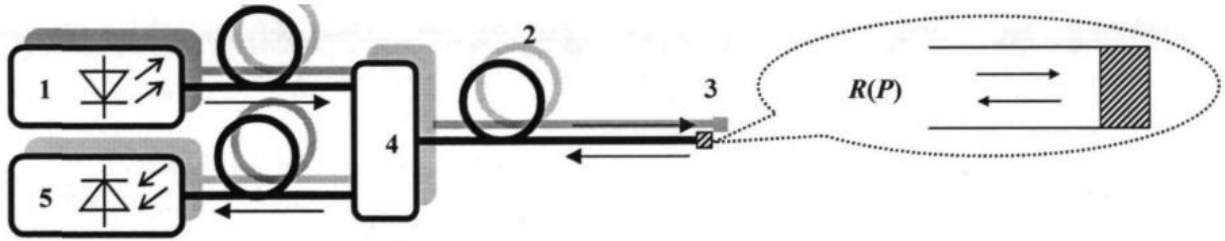
Бұл сенсордың кемшіліктері құрылғы дизайнының технологиялық күрделілігін және оны құрастыру процедурасын қамтуы керек.

1.3-суретте кремний пластиналарына негізделген сезімтал элементі (СЭ) бар рефлекторлы типтегі ТОҚС схемасы көрсетілген [4].

Сенсор құрамына талшықты-оптикалық микрожылжу түрлендіргіші (ТОМТ) кіреді, оның жұмыс принципі инфрақызыл электромагниттік толқындар үшін оптикалық талшықтарды беру және бұру аймағында және СЭ маңында шағылысу қабілетін өлшеуге және өлшенетін физикалық шама - қысым әсерінен оптикалық сигнал қарқындылығының өзгеруіне негізделген.

СЭ мыналардан құралған – «жарық өткізгіш - кремний қабатты-айна».

Бұл жағдайда жақсы оптикалық жанасуды, кремний пластинасының ОТ-мен қосылуының беріктігі мен сенімділігін қамтамасыз ету керек, пластинаның талшық осіне қатысты үш координаталар мен бұрыштар бойынша талшықтың ұшына қатысты берілген орнын сақтау қажет. Кремний пластиналарының қалыңдығы 10-100 мкм болуы керек, ал көлденең өлшемдері 150x150...200x200 мм мұндай кремний пластиналарын жасау технологиясы белгілі және жақсы дамыған. Бір жағынан бүріккіш айнасы бар кремний пластинасы талшықтың ұшына дәнекерленген [14]. Кремний бетіне тұндырылған диэлектрлік немесе металл пленкалар немесе $R=30\%$ шағылыстыратын кремний-ауа интерфейсі айна рөлін атқара алады.

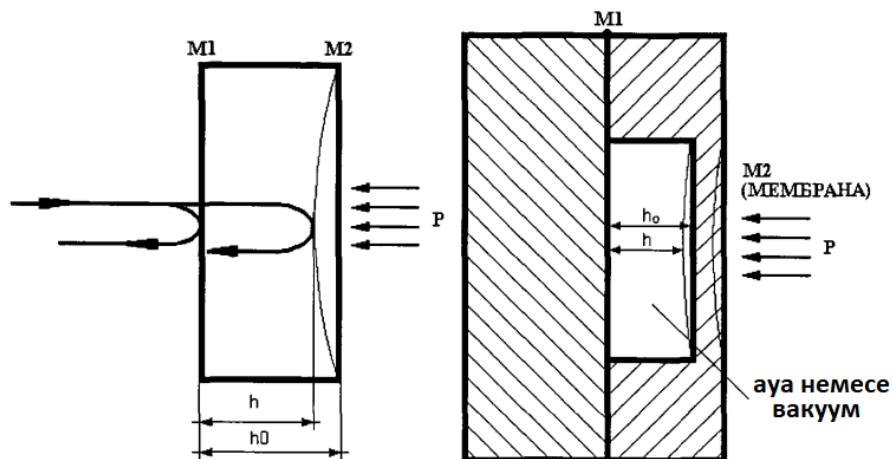


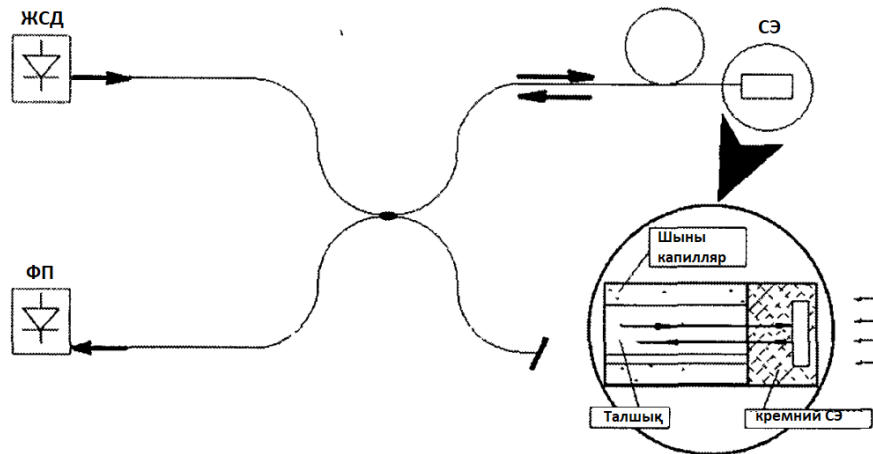
1.3-сурет- α -өту түріндегі кремний сезімтал элементтері бар талшықты-оптикалық қысым сенсорының схемасы [13]: 1-жарық диоды; 2-талшықты кабель; 3-кремнийге сезімтал элемент; 4-көп режимді талшықты сплиттер; 5-сәулелену қабылдағышы

Жоғарыда қарастырылған СЭ жартылай өткізгіш қабатында амплитудалық модуляцияны немесе оптикалық сәулелену фазасын қолдануға болатын шағылысатын типті ТОҚС құруға негіз болады [15]. Бұл типтегі сулардың үлкен кемшілігі өлшенетін қысымның әсерінен – «шыны-кремний» ортасының интерфейсіндегі жарық ағынының жоғалуы.

Миниатюризация және біріздендіру тұрғысынан СЭ, ол сол кремнийдің негізінде орналасқан кремний мембранасы, ол капиллярдың көмегімен оптикалық талшықпен түйіседі (1.4-сурет).

Талшықты-оптикалық тракт бойынша жарықдиодты сәулелену сплиттер арқылы СЭ-ке түседі. СЭ шекаралары айналар рөлін атқарады: жылжымалы М2 және қозғалмайтын М1, қашықтықта орналасқан h_0 және «кремний-ауа» шекараларында шағылысу коэффициенттері бар $r_{1,2} > 2 \sim 0,3$.





1.4-сурет-ТОҚС жұмыс істеуінің оптикалық схемасы [16]

Осылайша, СЭ-бұл h_0 базасымен әлсіз контрастты Фабри-Перо интерферометрі болып есептеледі. Интерферометрден шағылысқан сәулелену талшықты-оптикалық тракт және сплиттер арқылы ФҚ фотоқабылдағыш құрылғысына түседі, оның шығыс сигналы тіркелген сәулелену қуатына пропорционалды. Интерференция үлгісі жеткілікті көріну үшін $\Delta\lambda \ll \frac{\lambda^2}{2h}$ шартын орындау қажет. Мұндағы λ -сәулелену толқынының ұзындығы, $\Delta\lambda$ -жарық көзінің спектрінің ені.

Толқын ұзындығы 1200...1300 нм немесе 1500...1600 нм диапазонында сәулеленетін және спектрлік сызықтың ені $\Delta\lambda \approx (30...60)$ нм болатын қолданыстағы жарықдиодтар үшін h мәні бірнеше микрон болуы тиіс, бұл елімізде бар технологиялармен толығымен жүзеге асырылуы мүмкін. Өлшенетін қысым мен Фабри-Перо интерферометрінен шағылысу коэффициенті арасындағы бірімәнді тәуелділік тек $\Delta P = \lambda/4\beta_0$ интерферограмманың өсіп келе жатқан немесе төмендейтін бөлігінің жарты периоды шегінде ғана болады. Бұл ретте аталған бөліктерде шығыс тәуелділік сызықтыққа жақын болатын $\Delta P \uparrow$ және $\Delta P \downarrow$ мәндерінің жұмыс аралықтары (сызықтық емес 3%-дан аспайды) жарты периодтың бөлігіне тең болады:

$$\Delta P \downarrow \approx (2/3)\Delta P \quad (1.1)$$

Схема шағылысқан қуатты $3 \cdot 10^{-3}$ салыстырмалы қателікпен тіркеуді қамтамасыз етеді, бұл мембрананың иілуіне $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ мкм сәйкес болуы керек. Бірқатар авторлар алған эксперименттік деректерге қарағанда, бұл толығымен шынайы сандар. Осылайша, біздің бағалауымыз бойынша, қысымды өлшеудің салыстырмалы дәлдігі $(0,5...1)\%$ болуы керек.

Бұл құрылғының негізгі кемшілігі - оптикалық жүйені (1 мкм-ге дейін) дәл реттеу қажеттілігінде. Дәлдікті арттыру үшін тіркеу жүйесінде интерферометриялық әдістердің бірін қолдану қажет: «ақ жарық интерферометриясы» әдісі немесе екі толқынды интерферометрия әдісі.

Соңғы онжылдықта микроэлектроника технологиясында микрондық және субмикрондық өлшемдері бар микро-оптомеханикалық құрылымдарды құрумен байланысты жаңа бағыт айтарлықтай дамыды, бұл әртүрлі функционалды оптикалық және талшықты-оптикалық құрылғыларды, атап айтқанда, сенсорлық элементтерді (СЭ) құру мүмкіндіктерін ашады. Мұндай СЭ топтық технологиялар әдістерімен жасалады және олардың микроструктураларының миниатюрлігі мен геометриялық параметрлерінің жоғары дәлдігі, қолданылатын материалдардың физика-химиялық қасиеттерінің тұрақтылығы арқасында аз инерциялылық пен өлшеулердің жоғары кеңістіктік локалдылығын қамтамасыз етеді, жақсы қайта өндірілу және метрологиялық сипаттамалардың сәйкестігіне ие, массогобариттік параметрлері минималды, бұл көп арналы талшықты оптикалық өлшеу құрылғыларын құру және басқару жүйелерін жасауда өте маңызды.

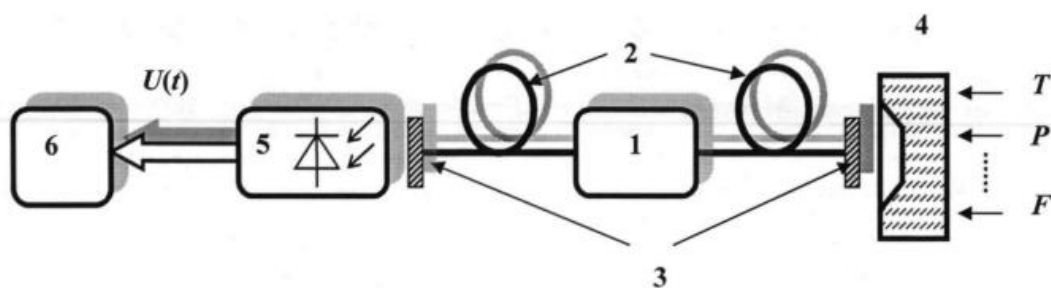
Қазіргі уақытта жиілік шығуымен ТОҚС-ге үлкен қызығушылық танытылуда, онда өлшенетін әсерлерге тәуелді айқын резонанстық қасиеттері бар микрожүйелер қолданылады, олардың негізінде жиілік шығуымен прецизиондық өлшеу жүйелерін құру мүмкін. Оптоакустикалық, термооптикалық, оптомеханикалық қасиеттердің белгілі бір үйлесіміне ие микро резонаторлы жүйелерді жасау мүмкіндігінәі арқасында жоғары акустикалық сапалылық Q -мен сипатталатын микрорезонаторлардың тиімді оптикалық қоздырылуын жүзеге асыруға болады. Микрорезонаторларды жасау технологиясының негізінде Ресейде, Қытайда және басқа елдерде жақсы игерілген монокристалдарды анизотропты химиялық өңдеу және материалдарды плазмохимиялық өңдеу әдістері жатыр. Қолда бар технологиялық мүмкіндіктер әртүрлі материалдардан (Si, SiO₂, GaAs және т.б.) резонанстық жиіліктері 100 МГц және одан жоғары, сапалылық Q мәні 10^4 -ке дейін жететін микрорезонаторларды жасауға мүмкіндік береді. [1]

Белгілі микрорезонаторлық ТОҚС схемаларында микрорезонаторлардың оптикалық қоздырылуы және тербеліс параметрлері туралы ақпараттың алынуы екі тәуелсіз талшықты-оптикалық арналар арқылы жүзеге асырылады, бұл ТОҚС құрылғысын күрделендіріп, оның сенімділігін төмендетеді.

Қарастырылып отырған ТОҚС-нің функционалды мүмкіндіктерін едәуір кеңейту микрорезонатормен әрекеттесетін талшықты лазерді (ТЛ) пайдалану арқылы жүзеге асырылады. Бұл жағдайда микрорезонаторлық құрылым екі жақты рөл атқарады: бір жағынан, оптикалық резонатор ТЛ құрамына енгізілген лазер сәулесінің оптикалық басқарылатын модуляторы болып табылады, екінші жағынан, ТОҚС-нің сенсорлық элементі рөлін атқарады (1.5-сурет).

Нәтижесінде, ТЛ және МРЖ байланысқан жүйесінде микроструктураға сыртқы әсерлерге тәуелді жиілікте автотербелістер пайда болады. Резонанстық өзара әрекеттесу жағдайында жиілігі f микрорезонатор жиілігімен іс жүзінде сәйкес келетін тұрақты автотербеліс режимдері пайда болуы мүмкін. Қарастырылып отырған схема бойынша микрорезонатор

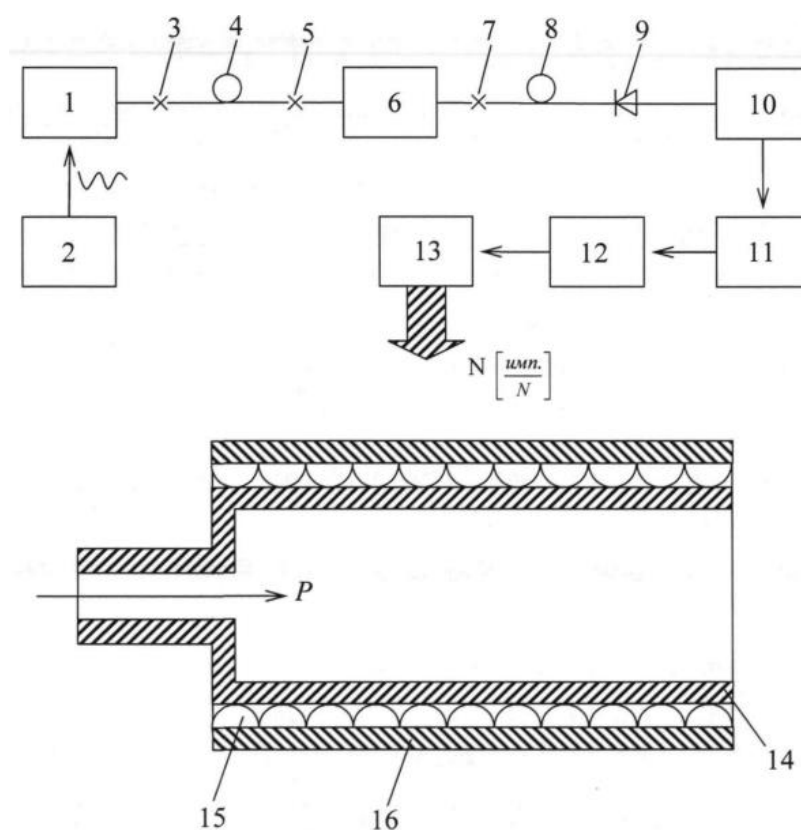
ТЛ-дің айналарының бірінің рөлін атқарады және осылайша лазердің оптикалық кері байланыс тізбегіне қосылады.



1.5-сурет - Микрорезонаторлық ТОҚС схемасы: 1 - талшықты лазер; 2 - талшықты кабель; 3 - жартылай мөлдір айналар; 4 - микрорезонаторлар; 5 - фотоприемник; 6 - сигналдарды өңдеу блогы; Т - температура, Р - қысым, F - күш.

Мұндай жүйелердің кемшіліктері мыналар болып табылады: біріншіден, талшықты лазер резонаторының ұзындығының айтарлықтай болуына байланысты (қашықтағы объектілердің физикалық параметрлерін өлшеу кезінде) оған әртүрлі тұрақсыздандырушы факторлардың жиынтық әсері жүйедегі микрорезонаторлардың жиілік жолағындағы сигнал/шум қатынасының айтарлықтай төмендеуіне және, сәйкесінше, өлшеу дәлдігінің төмендеуіне әкеледі; екіншіден, жүйенің өлшеу арналарының өзара айтарлықтай әсерлері пайда болуы мүмкін; үшіншіден, ТЛ сорғылау деңгейінің шектеулілігіне байланысты ТЛ релаксациялық тербеліс жиілігі тек шектеулі мәндер аралығында өзгеруі мүмкін, бұл өз кезегінде өлшеу арналарының максималды санын шектейді.

Бұлардың ішінде, кварц мембраналарымен құрылған ТОҚС-лердің арасында оптикалық түнел әсер бойынша ТОҚС-лер ерекше орын алады. 1.6-суретте ТОҚС-нің осындай бір үлгісі көрсетілген.



1.6-сурет - Оптикалық туннель эффектіндегі ТОҚС

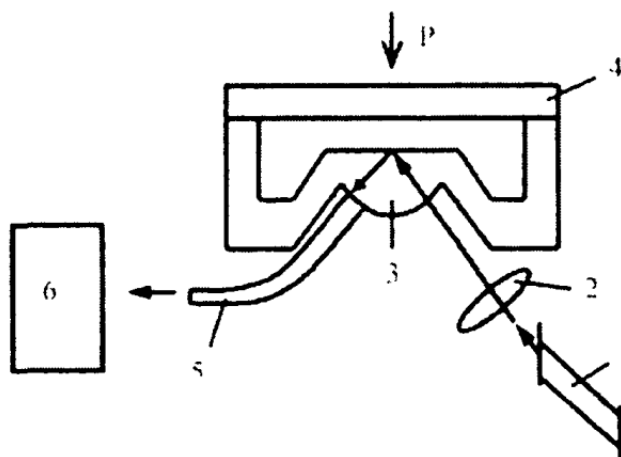
мұнда, 1-жарық көзі; 4,8-оптикалық талшықтар; 6-сезімтал элемент; 3, 5, 7 - дәнекерлеу орындары; 9-фотоқабылдағыш; 10-күшейткіш; 11-төмен жиілікті сүзгі; 12-шектегіш күшейткіш; 13-импульстік есептегіш

Жарық көзі 1-ден (жартылай өткізгіш лазер) шығаратын сәуле оптикалық талшықтың бөлігіне енгізіледі, ол 4-ші талшықты поляризатордың кірісіне дәнекерленеді. Талшықты поляризатордың шығу бөлігі дәнекерлеу арқылы 6-шы сезімтал элементтің оптикалық талшықтарымен жалғанады. Фотоприемач 9-дан сигнал алдын ала күшейткішке 10 түседі, ол төмен жиілікті сүзгілерден 11, 12 өтіп, импульс есептегішіне 13 беріледі. Күшейткіш-шектегіш 12 импульстер тізбегін бөліп шығарады, олардың саны оптикалық талшыққа түскен қысымға пропорционалды. Импульс есептегіші 13 жарық көзі толқынының ұзындығы өзгерген уақыт аралығындағы импульстер санын есептейді.

Фото жарық қабылдағышындағы интенсивтіліктің өзгерісін келесі түрде сипаттауға болады:

$$I_{\Phi} \sim \frac{1}{2} P_0 (1 + \sin wt) \left(1 - \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda_0(1+m \sin wt)} * BL_B \right] \right) \quad (1.2)$$

Оптикалық талшыққа 1 Н қысым түскенде, интенсивтілік биені саны 2Н-ге артады, ал 1000Н қысым түскенде биені саны 2000Н-ге дейін артады. Бұл кемшіліктер кварц сезімтал элементі бар ТОҚС-да жойылған, ол 1.7-суретте көрсетілген.



1.7-сурет - Туннельдік эффектке негізделген талшықты-оптикалық қысым сенсоры.

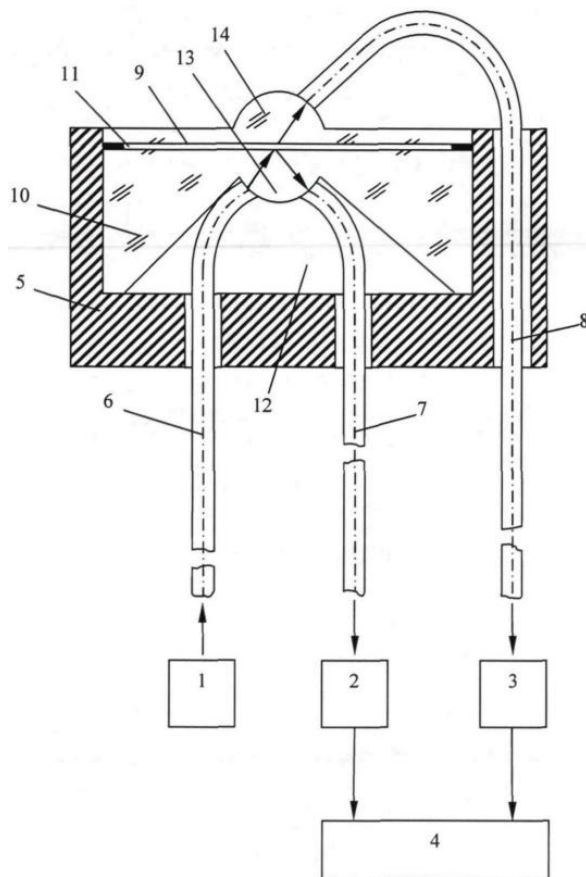
мұнда 1 - лазер; 2 - линза; 3 - кварц талшықты жарық өткізгіш; 4 - пластина; 5 - шығаратын оптикалық талшық; 6 - фотоприемник.

Онда толқын ұзындығы 0,63 мкм лазер пайдаланылған. Лазер сәулесі линза 2 арқылы фокусталып, $45,6^\circ$ бұрышпен кварц талшықты жарық өткізгіштің 3 шағылысатын бетіне бағытталды. Оның сәулеленуі апертуралық бұрышты 2° дерлік біркелкі толтырады. Шағылысқан сәулелену ағыны талшықты жарық өткізгіш 5 арқылы фотоприемникке 6 жіберіледі. Пластина 4 диаметрі 20 мм, қалыңдығы 0,48 мм. Пластинаға қолданылатын қысым сынап манометрі арқылы өлшенеді. Мұндай қысым датчигінің эксперименттік түрлендіру функциясы абсцисс осіне жетпейді. Бұл, біріншіден, пластина мен жарық өткізгіштің жанасатын беттерінің микро-және макронеровностарына байланысты саңылау нөлге дейін азайтылмайтындықтан, екіншіден, эксперименттік сипаттаманы алу кезінде оптикалық арнаның ауданы толық ішкі шағылысуға ұшыраған сәулелену ағынының қимасынан аз болғандықтан түсіндіріледі. Осы екі себеп немодуляцияланған сәулелену ағынының болуына әкеледі.

1.8-суретте кварц элементімен тағы бір ТОҚС нұсқасы көрсетілген. Сенсорте жарық көзі 1, дифференциалды схема бойынша өлшеу көпір тізбегіне қосылған фотоприемниктер 2 және 3 бар. Сондай-ақ, жарық шығаратын 6 және екі оптикалық талшық 7 және 8 бір корпуспен 5 біріктірілген, олар сәйкесінше 1 жарық көзіне және 2 және 3 фотоприемниктерге қосылған, мембрана 9, негізге 10 орнатылған және 11 төсемімен бөлінген. Негіз 10 мөлдір, оның бір жағының ортасында сфералық беті бар ойық жасалған. Мембранада 9 сфералық сегмент түрінде қатты орталық бар, оның радиусы сфералық беттің радиусына тең.

Қысым болмаған кезде мембрана 9 мен негіздің 10 арасындағы саңылау оларды бөлетін төсемнің 11 қалыңдығына тең. Бұл жағдайда негізге 10 түсетін және шығатын жарық талшығынан 6 шығатын осьтік сәулелер екі бірдей бөлікке бөлінеді - шағылысқан және сынған, ауа саңылауы арқылы

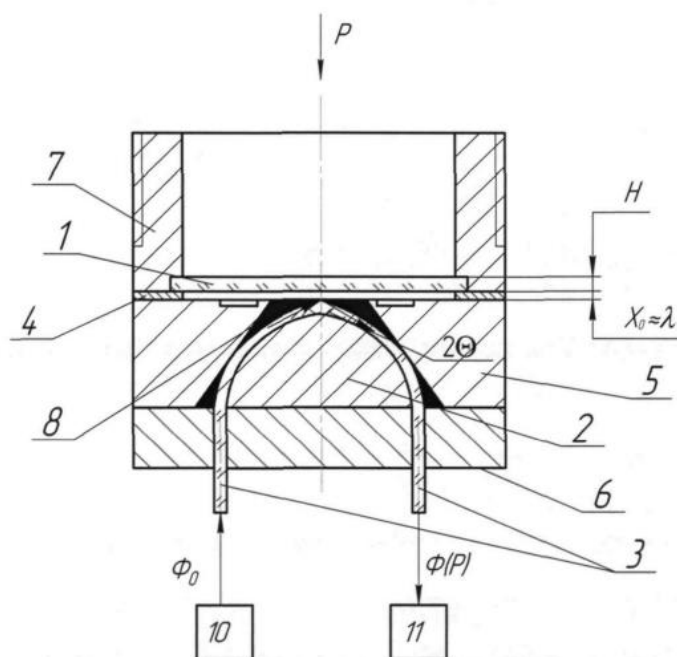
өткен, нәтижесінде фотоприемниктерге 2 және 3 бірдей мөлшерде жарық энергиясы түседі.



1.8-сурет - Оптикалық туннельдік эффектке негізделген ТОҚС

Мембранаға 9 қысым түсіргенде, ол иіледі, осылайша ауа саңылауының мөлшерін азайтады, бұл өткен жарық ағынының мөлшерін арттырып, сәйкесінше шағылысқан жарық ағынының мөлшерін азайтады және сирету кезінде кері көрініс байқалады. Сондықтан қысымның әсерінен көпір схемасы теңгерімсіз болып, оның шығысында қысымға пропорционал сигнал пайда болады. Мұндай техникалық шешім жарықтың шағылуына байланысты френелдік жоғалтуларды азайтуға және ТОҚС сезімталдығы мен дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді.

Жоғарыда қарастырылған ТОҚС метрологиялық және пайдалану сипаттамалары тұрғысынан жоғары әлеуетке ие. Бірақ олардың басты кемшілігі - конструкцияның төмен технологиялылығы. 1.8-суретте туннельдік эффектке негізделген ТОҚС жетілдірілген техникалық шешімі көрсетілген, оның өндіріс технологиясы қарапайым және жоғары температуралы ТОҚС әзірленетін технологиялық шешімдер үшін негіз болуы мүмкін [11].



1.9-сурет - Туннельдік эффектке негізделген талшықты-оптикалық қысым сенсоры[11]: 1 - мембрана; 2 - жастық; 3 - оптикалық талшықтар; 4 - төсем; 5 - қақпақ; 6 - втулка; 7 - корпус; 8 - ситаллоцемент

Бұл сенсор бір-бірінен белгілі қашықтықта орналасқан втулка 6-ға жапсырылған кіріс және шығыс оптикалық талшықтарынан 3 тұрады. Оптикалық талшықтар «жастыққа» 2 салынып, қақпақпен 5 қысылып, сенсор осіне қатысты сәйкес бұрышпен (мысалы, 47°) түйіседі. Қақпақтан 5 жоғары орналасқан оптикалық талшықтардың бөлігі N мөлшерінде кесіледі және жылтыратылады.

Сенсор келесі түрде жұмыс істейді: жарық көзі 11-ден шыққан жарық ағыны Φ_0 кіріс оптикалық талшықтар 3 арқылы мембрана 1 жағына белгілі бұрышпен (θ) бағытталады, оның мәні «жастықтың» 2 пішіні мен өлшемдеріне байланысты және түрлендірудің максималды сезімталдығы мен оптикалық сигнал модуляциясының тереңдігін қамтамасыз ету шарты бойынша таңдалады, және ол мына өрнекпен анықталады: $\arcsin(n_2/n_1) < \theta < \arcsin(n_3/n_1)$, мұнда n_1, n_2, n_3 - оптикалық талшықтың өзегі, мембрана мен оптикалық талшықтар арасындағы орта және кварц мембранасының сыну көрсеткіштері сәйкесінше.[5]

Өлшенетін қысым P әсерінен мембрана 1 иіледі, және орталық бөлігінде мембрана мен оптикалық талшықтардың 3 жылтыратылған ұштары арасындағы саңылау бастапқы мәннен X_0 аз болады. Нәтижесінде, оптикалық талшықтардың жылтыратылған ұштарында электромагниттік толқындар үшін шағылу қабілеті өзгереді, сәйкесінше өлшенетін қысым P туралы ақпарат беретін $\Phi(P)$ жарық ағынының θ бұрышпен шағылысқан қарқындылығы өзгереді және ол шығатын оптикалық талшықтар арқылы

қабылдағышқа 11 жіберіледі. Қабылдағыш 11 оптикалық сигналды электрлікке түрлендіреді.

Туннельдік эффектке негізделген ТОҚС қатал зымыран-ғарыш техникасы жағдайларында жұмыс істеуге қабілетті және оны дайындау кезінде күрделі технологиялық және өлшеу операцияларын қажет етпейді. Мұндай сенсор конструкциясы жоғары қоршаған орта температурасы жағдайында қысымды дәл өлшеуді қамтамасыз етеді.

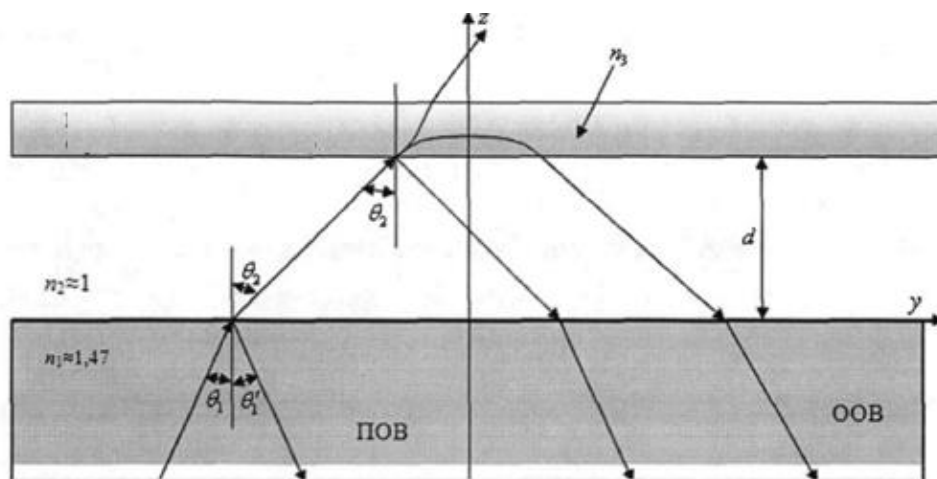
2 Талшықты-оптикалық түрлендіргішінде болатын физикалық процестерді математикалық модельдеу

Шағылыстырғыш типті талшықты-оптикалық микроауысудың түрлендіргішіндегі жарық ағынының таралу процесін математикалық формализациялау процесі «шыны-ауа» шағылысу аймағында орын алады.

ТОҚС өндіру технологиясын және құрылымдық-технологиялық шешімдерді әзірлеу кезінде негізгі міндеттердің бірі оптикалық сигналды түрлендіру аймағына жарық ағынының сәулеленуінің мүмкін болатын максималды қуатын беруді анықтау болып табылады. Ол үшін шағылысатын типтегі талшықты-оптикалық қысым сенсортерінің оптикалық арнасында жарық ағынының таралу процесін математикалық формализациялау жүргізілуі тиіс. ТОМТ-да (талшықты оптикалық микро-ығысу түрлендіргіші) оптикалық арнада жарық ағынының таралуының математикалық моделі шығарылды.

2.1-бөлімде көрсетілгендей, ТОМТ модуляциялайтын шағылыстыратын элементтен және оған қатысты белгілі бір қашықтықта орналасқан кіріс және шығыс оптикалық талшықтардың ұштарынан тұрады (2.1-сурет) [10].

Сыну коэффициенттері бар «шыны-ауа» n_1 және n_2 сыну коэффициенттері бар «ауа – әйнек» орталарының шекараларында n_2 және n_3 сәйкесінше Френель шағылысу заңын ескере отырып, Снеллиус формулаларымен сипатталған классикалық заңдарға сәйкес түсетін толқынның шағылуы мен сынуы орын алады.



2.1-сурет-Жарық ағынының шағылысатын типті ТОМТ-ге таралуы [10] «шыны-ауа» ортасының шекарасындағы сынған толқын жазық толқынның өрнегімен сипатталады.

Мұнда n_1 және n_2 , n_3 - әйнектің, ауаның, жарық қайтарушы элементтің материалының сыну коэффициенттері; θ_1 и θ_2 оптикалық сәулеленудің «кіріс ОТ - ауа әйнегі» интерфейсіне түсу бұрышы және сәйкесінше шығыс ОТ-тан оптикалық сәулеленудің шығу бұрышы.

2.1 Шағылыстырғыш типті талшықты-оптикалық микро ығысу түрлендіргішінің құрылымдық-технологиялық параметрлерін сандық математикалық модельдеу.

ТОҚС жобалау сатысында оптикалық жүйені есептеу бірқатар құрылымдық және технологиялық параметрлерді анықтау мақсатында жүзеге асырылады:

- ОТ-ның қиғаш ұштарынан модуляциялық оптикалық элементке дейінгі h_i қашықтығы (кварц мембранасы);

- талшықты-оптикалық түрлендіргіштің оптикалық осіне қатысты ОТ орнатылған және оның астында ОТ-дан шығу сәулеленудің тиімді енгізілуін, $\Phi=f(W, \Phi_0, h_1, \alpha)$ түрлендірудің сызықтық функциясын, оптикалық сигнал модуляциясының максималды тереңдігін қамтамасыз ететін ОТ-ның сәулелену беті кіріс мен шығыс ОТ қабылдау беті кесілген α бұрышы, шығыс оптикалық талшық ұштарының орналасу жазықтығындағы жарықтың біркелкі таралуы, ТОМТ минималды өлшемдері.

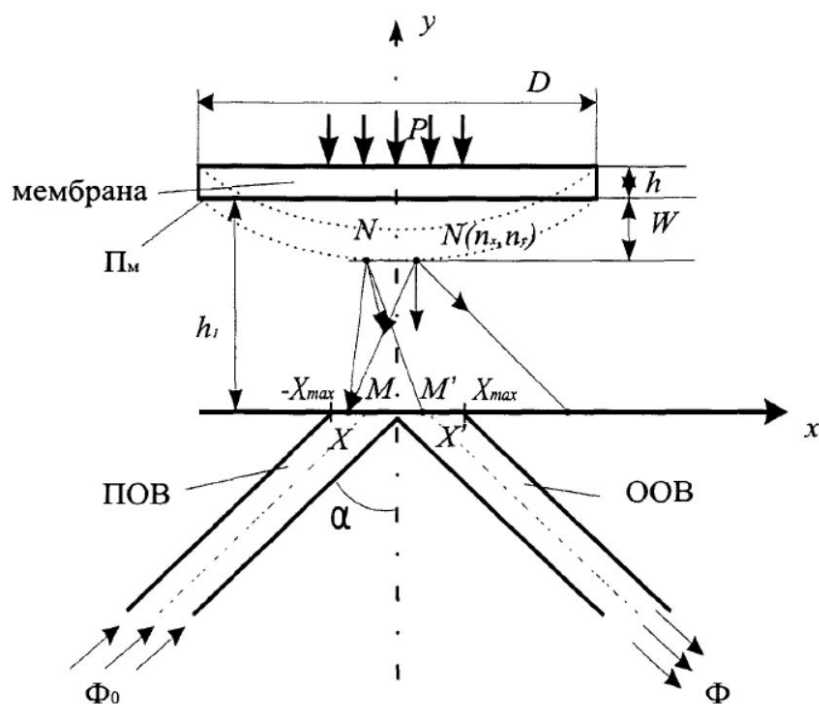
Түрлендіру функциясын шығару үшін ТОМТ- геометриялық құрылысы 2.13-суретте көрсетілген.[9]

ТОМТ өндіру технологиясын жобалау кезінде түрлендіру функциясын анықтау міндеті тұр:

$$\Phi=f(W, \Phi_0, h_1, \alpha) \quad (2.1)$$

өлшеу арнасындағы жарық ағынының таралуын және берілген d_0 ; d_C ; θ_{NA} мәндерін ескере отырып, мембрана OZ осі бойымен қозғалғанда:

- W - мембранасының ауытқуы;
- құрылымдық параметрлер:
 - D - мембрана-модуляциялық элемент диаметрі;
 - h -мембрананың қалыңдығы;
 - h_1 - мембранадан жазықтыққа дейінгі қашықтық П-талшықтарды біріктіру
- α -оптикалық микро-оптикалық түрлендіргіштің оптикалық осіне қатысты ОТ орнатылған бұрыш.
- Φ_0 - кіріс ОТ түсетін жарық ағыны;
- Φ - шығыс ОТ арқылы өтетін жарық ағыны;
- D - модуляциялық элементтің мембрананың диаметрі;
- h -мембрананың қалыңдығы;
- h_1 - мембранадан жазықтыққа дейінгі қашықтық N-талшықтардың байланысы;
- W - Р қысымының әсерінен мембрананың ауытқуы;
- α - у оптикалық осіне қатысты ОТ орнатылған және оның астында сәулеленетін кіріс ОТ беті мен шығыс ОТ-ның қабылдау беті кесілген бұрыш.



2.2-сурет-ТОМТ жеңілдетілген схемасы

Жарық ағынын түрлендіру функциясын шығару үшін сәулелердің жазықтықтағы ТОМТ-ге өтуі құрылады. 2.13-суретте көрсетілгендей ОХУ координаттар жүйесін енгізейік. Содан кейін нүктелердің координаттары келесідей болады:

- кіріс ОТ жазықтығында: $M(x_M, 0)$, мұнда $X_{max} < x_M < 0$;
- мембрана бетінде: $N(n_x, n_y)$ және келесі теңдеуді қанағаттандырады

$$n_x^2 + (n_y - h_1)^2 = W^2 \quad (2.2)$$

- шығыс ОТ жазықтығында: $M'(x_M', 0)$, мұнда $0 < x_M' < X_{max}$;

Сәулелердің барысын құру

- Біз MN сәулесін саламыз, нүктенің координаттары $M(x_M, 0)$, мұнда $-X_{max} < x_M < 0$. MN сәулесінің теңдеуі:

$$y = \text{ctg}(\theta_{NA} - \alpha) * x - x_M * \text{ctg}(\theta_{NA} - \alpha) \quad (2.3)$$

$\bar{e}_{MN}(-1, \text{ctg}(\theta_{NA} - \alpha))$ – MN сәулесінің бағыттаушы векторы, $\bar{e}_{MN} \parallel MN$.

- $N(n_x, n_y)$ нүктесінің координаттарын табамыз.

$$N = MN \bar{e}_{MN} \quad (2.4)$$

мұндағы $N(n_x, n_y)$ нүктесінің координаттары түзудің қиылысу нүктесі MN және Π_M - мембрана беті ретінде орналасқан.

Π_M теңдеуі:

$$n_x = \frac{n_y + x_M * ctg(\theta_{NA} - \alpha)}{ctg(\theta_{NA} - \alpha)} \quad (2.5)$$

мұндағы n_y $n_y < h_1$ кезіндегі квадрат теңдеудің шешімінен анықталады

$$Wn_y^2 + (8Wx_M - D^2)ctg^2(\theta_{NA} - \alpha)n_y + (4Wx_M^2 + D^2(h_1 - W))ctg^2(\theta_{NA} - \alpha) = 0 \quad (2.6)$$

Векторлық теңдеудің шешімінен NM сәулесінің бағыттаушы векторын табамыз яғни ол,

$$\frac{\bar{e}_{MN}}{|\bar{e}|} + \bar{e}_{MN'} = \frac{\bar{n}}{|\bar{n}|} \quad (2.7)$$

мұнда \bar{n} мембрана бетіне нормал вектор. Онда,

$$\bar{e}_{MN} = \left\{ \sin(\theta_{NA} - \alpha) - \frac{8W}{\sqrt{64W^2 + D^4}}; \cos(\theta_{NA} - \alpha) - \frac{D^2}{\sqrt{64W^2 + D^4}} \right\} \quad (2.8)$$

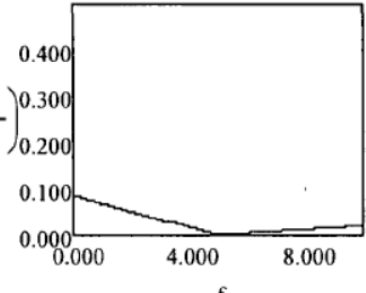
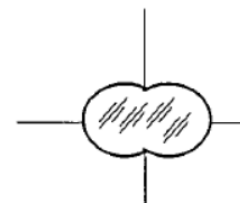
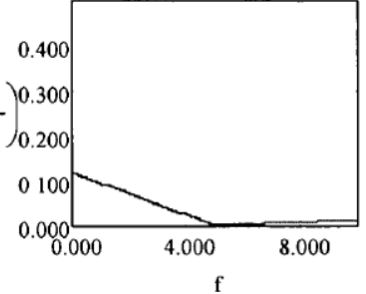
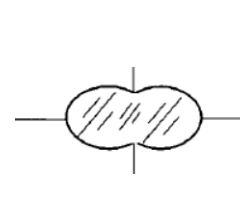
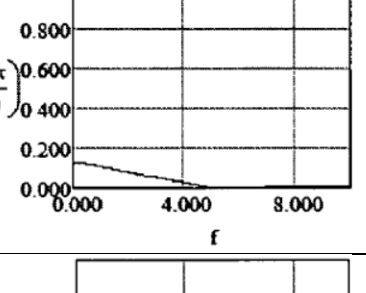
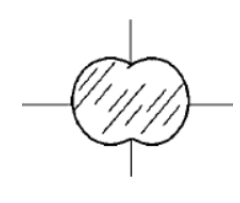
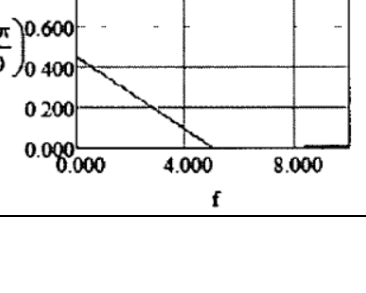
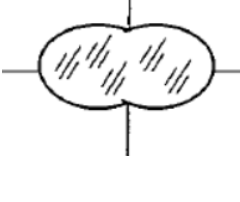
NM' сәулесінің теңдеулері келесідей болады,

$$\frac{x - n_y}{\sin(\theta_{NA} - \alpha) - \frac{8W}{\sqrt{64W^2 + D^4}}} = \frac{x - n_x}{\cos(\theta_{NA} - \alpha) - \frac{D^2}{\sqrt{64W^2 + D^4}}} \quad (2.9)$$

- M'(x', 0) нүктесінің координаттарын табамыз.

$$x' = n_x - n_y * \frac{\sin(\theta_{NA} - \alpha) - 8W}{\cos(\theta_{NA} - \alpha) - D^2} \quad (2.10)$$

Кесте-2.1 MathCAD ортасындағы математикалық модельдеу нәтижелері

Параметрлердің берілген мәндері		Түрлендіру функциясы	П жазықтығында кесілген талшықтардың беткі пішіні
h_1 , мкм	α , град		
5	47	$\frac{\text{inten}\left(X_{\max}, f, h_x, \frac{47 \cdot \pi}{180}\right)}{\text{---}}$ 	
5	58	$\frac{\text{inten}\left(X_{\max}, f, h_x, \frac{58 \cdot \pi}{180}\right)}{\text{---}}$ 	
5	60	$\frac{\text{inten}\left(X_{\max}, f, h_x, \frac{60 \cdot \pi}{180}\right)}{\text{---}}$ 	
5	73	$\frac{\text{inten}\left(X_{\max}, f, h_x, \frac{73 \cdot \pi}{180}\right)}{\text{---}}$ 	

2.2 Талшықты-оптикалық қысым сенсорының түрлендіргіштеріне жарықтың өтуінің математикалық моделін құру

Жоғары температуралы орта үшін талшықты-оптикалық қысым сенсорының түрлендіргіштеріне жарықтың өтуінің математикалық моделін құру бірнеше негізгі қадамдарды қамтиды. Біз жүйенің оптикалық, механикалық және жылу аспектілерін ескеруіміз керек. Модельдің негізгі

компоненттеріне жарықтың таралу теңдеулері, жарықтың механикалық деформациялармен әрекеттесуі және температураға тәуелділік жатады.

Негізгі теңдеулер мен тәсілдер

1. Талшықтағы жарықтың таралуы:

Талшықтағы жарықтың таралуын сипаттау үшін біз Гельмгольц теңдеуін қолданамыз [2]:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (2.11)$$

мұндағы E -электр өрісі, k - толқын саны.

Жарықтың механикалық деформациялармен өзара әрекеттесуі:

Қысым мен механикалық деформациялар талшықтың сыну көрсеткіштерін өлшейді. Мұны Брюстер эффектісі арқылы сипаттауға болады:

$$n = n_0 + \Delta n \quad (2.12)$$

мұндағы n_0 -бастапқы сыну көрсеткіші, Δn -деформацияға байланысты сыну көрсеткішінің өзгеруі.

Жылу әсерлері, температураның өзгеруі толқын ұзындығына және сыну көрсеткішіне әсер етеді. Мұны температураға тәуелділік теңдеулерімен сипаттауға болады:

$$n(T) = n_0 + \beta(T - T_0) \quad (2.13)$$

мұндағы β -температураның кеңею коэффициенті, T -ағымдағы температура, T_0 - бастапқы температура.

Модельдеу қадамдары. Толқындық теңдеуді анықтау: қысым мен температураның әсерінен сыну көрсеткішінің өзгеруін ескере отырып, талшықтағы жарықтың таралу теңдеуін жазамыз:

$$\nabla^2 E + k^2 n^2(x, y, z) E = 0 \quad (2.14)$$

Бұл теңдеуді соңғы айырмашылықтар әдісімен немесе ақырлы элементтер әдісімен шешеміз.

Механикалық модель: біз қысымның әсерінен талшықтағы механикалық кернеудің моделін жасаймыз. Біз цилиндрлік координаттар үшін Ламе теңдеулерін қолданамыз:

$$\sigma_r = \frac{Pr_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \quad (2.15)$$

мұндағы σ_r - радиалды кернеу, P -қысым, r_i және r_0 — талшықтың ішкі және сыртқы радиустары.

Жылу моделі. Жылу ағындары мен температураның талшықтың ұзындығына таралуын ескере отырып, талшықтағы температура өрісінің моделін құрамыз. Жылу өткізгіштік теңдеуін қолданамыз:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2.16)$$

мұндағы α -жылу өткізгіштік коэффициенті, T -температура.

Есептеу мысалы, оптикалық модель:

- бастапқы сыну көрсеткіші болсын $n_0=1.45$
- қысым сыну көрсеткішін $\Delta n=0.01$ -ге өзгертеді.

Механикалық модель үшін:

- қысым $P=10^6$ Па.
- ішкі радиусы $r_i=0.1$ мм, сыртқы радиусы $r_o=0.2$ мм.
- радиалды кернеу мәні

$$\sigma_r = \frac{10^6 * 0,1^2}{0,2^2 - 0,1^2}$$

Жылу моделі:

- бастапқы температура $T_0=300$ к.
- температураның өзгеруі 100 К ($T=400$ К).
- температураның кеңею коэффициенті $\beta=10^{-5}$ К⁻¹

Барлық компоненттерді қосу арқылы біз жоғары температуралы орта үшін талшықты-оптикалық қысым сенсорында жарықтың толық үлгісін аламыз. Бұл теңдеулер мен тәуелділіктерді нақты есептерді шешу және сандық есептеулерді орындау үшін MathCad бағдарламалық жасақтамасында жүзеге асыруға болады [4].

Біз механикалық кернеу мен жылу беру модельдерін күрделендіріп және осы факторлардың талшықтың оптикалық сипаттамаларына әсерін қарастыратын болсақ келесі модельдеуді орындауға болады.

Жарықтың толық өту моделі

Оптикалық модель (талшықтағы жарықтың таралуы): жарықтың таралуының негізгі теңдеуі (Гельмгольц теңдеуі) сыну көрсеткішінің механикалық және жылу факторларына тәуелділігін ескере отырып:

$$\nabla^2 E + k^2 n^2(x, y, z, T, v) E = 0 \quad (2.17)$$

$n(x, y, z, T, \sigma)$ — координаттарға, температураға және механикалық кернеулерге байланысты сыну көрсеткіші.

Механикалық модель (кернеулер мен деформациялар):

Цилиндрлік координаталық жүйедегі талшық үшін Ламаның тепе-теңдік теңдеулері:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{d\sigma_z}{dz} = 0 \quad (2.18)$$

мұндағы σ_r и σ_z — радиалды, айналмалы және осьтік кернеулер сәйкесінше.
Деформациялардың Гук теңдеулері арқылы кернеулермен байланысы:

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)) \quad (2.19)$$

мұндағы ϵ_r — радиалды деформация, E-серпімділік модулі, ν - Пуассон коэффициенті.

Жылу моделі (температураның таралуы):

Цилиндрлік координаттар жүйесіндегі жылу өткізгіштік теңдеуі,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.20)$$

мұндағы α -жылу өткізгіштік коэффициенті.

Толық кадамдар мен есептеулер.

Оптикалық қасиеттері:

Сыну көрсеткішінің температура мен деформацияға тәуелділігі:

$$n(T, \epsilon) = n_0 + \beta(T - T_0) + \gamma\epsilon \quad (2.21)$$

мұндағы γ -сыну көрсеткішінің деформацияға тәуелділік коэффициенті,
 ϵ -жалпы деформация.

Механикалық кернеулер. Радиалды қысым кернеуі үшін,

$$\sigma_r(r) = \frac{Pr_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (2.22)$$

Айналмалы кернеу үшін:

$$\sigma_\theta(r) = \frac{Pr_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (2.23)$$

Жылу кеңеюі:

Температуралық кеңеюге байланысты деформация деңгейі

$$\epsilon_T = \sigma_T(T - T_0) \quad (2.24)$$

мұндағы α_T -термиялық кеңею коэффициенті.

Аралас деформация:

Жалпы деформация механикалық және жылу компоненттерін қамтиды:

$$\epsilon = \epsilon_m + \epsilon_T \quad (2.25)$$

Нақты жағдай үшін есептеу мысалы

Бізде бастапқы сыну көрсеткіші $n_0=1.45$ болатын оптикалық талшық бар делік. Қысым $P=1$ МПа болсын, ішкі және сыртқы талшық радиустары $r_i=0.1$ мм және $r_o=0.2$ мм сәйкесінше. Бастапқы температура $T_0=300$ К, ағымдағы температура $T=400$ К.

Механикалық кернеу:

Сыртқы бетіндегі радиалды кернеу:

$$\sigma_r(r_o) = \frac{10^6 * 0.1^2}{0.2^2 - 0.1^2} \left(1 - \frac{0.2^2}{0.2^2}\right) = 0$$

Ішкі бетіндегі радиалды кернеу:

$$\sigma_r(r_i) = \frac{10^6 * 0.1^2}{0.2^2 - 0.1^2} \left(1 - \frac{0.2^2}{0.1^2}\right) = -1.33 * 10^6 \text{ Па}$$

Жылу кеңеюі:

Температуралық кеңеюге байланысты деформация деңгейі

$$\epsilon_T = 10^{-5} * (400 - 300) = 0.001$$

Сыну көрсеткіші:

Жалпы деформация

$$\epsilon = \epsilon_m + \epsilon_T \quad (2.26)$$

$\epsilon_m \approx \sigma_r / E$ - серпімділік модулі болсын, мұнда $E=70 \times 10^9 \text{ Па} = 70 \times 10^9 \text{ Па}$.

Онда:

$$\epsilon_m \approx \frac{-1.33 * 10^6}{70 * 10^9} \approx -1.9 * 10^{-5}$$

Жалпы деформация

$$\epsilon \approx -1.9 * 10^{-5} + 0.001 = 0.000981$$

Бұл деформациядағы сыну көрсеткіші

$$N(T, \epsilon) = 1.45 + 10^{-5} * 100 + \gamma * 0.000981$$

$\gamma = 0.02$ болса:

$$N(T, \epsilon) = 1.45 + 10^{-5} * 100 + 0,02 * 0.000981 \approx 1,45102$$

Бұл модель оптикалық, механикалық және жылу әсерлерін ескере отырып, жоғары температуралы орта үшін талшықты-оптикалық қысым сенсорындағы жарықтың өтуін сипаттайды. Мұндай тәсіл қысым мен температураға ұшыраған кезде талшықтың оптикалық қасиеттерінің өзгеруін болжауға мүмкіндік береді, бұл экстремалды жағдайларда қысымды дәл өлшеу үшін маңызды.

Есептелген теңдеулер келесідей:

Сыну көрсеткіші

$$n(T, \epsilon) = n_0 + \beta(T - T_0) + \gamma\epsilon \quad (2.27)$$

Жылулық деформациясы

$$\epsilon_T = \sigma_T(T - T_0) \quad (2.28)$$

Механикалық деформация

$$\epsilon_m = \frac{\sigma_r}{E} \quad (2.29)$$

Мұнда радиалдық қысым деңгейі

$$\sigma_r = \frac{Pr_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \quad (2.30)$$

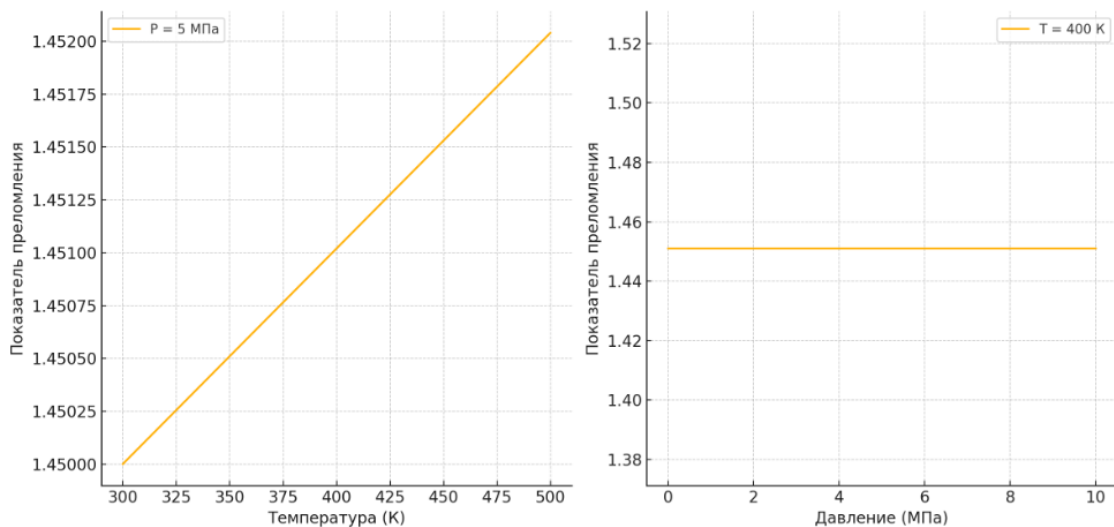
Жалпы деформация

$$\epsilon = \epsilon_m + \epsilon_T \quad (2.31)$$

Бастапқы параметрлер:

- Бастапқы сыну көрсеткіші $n_0=1.45$
- Температураға тәуелділік коэффициенті $\beta=10^{-5}$
- Деформацияға тәуелділік коэффициенті $\gamma=0.02$
- Жылу кеңею коэффициенті $\alpha_T=10^{-5}$
- Серпімділік модулі $E=70 \times 10^9$ Па
- Бастапқы температура $T_0=300$ К
- Р қысымы 0 мен 10 МПа аралығында өзгереді
- Температура Т варьируется от 300 до 500 К
- Температура Т 300 бен 500 К аралығында өзгереді
- Ішкі радиус $r_i=0.1$ мм
- Сыртқы радиусы $r_0=0.2$ мм

Алдымен сыну көрсеткішінің белгіленген қысымдағы температураға, содан кейін — белгіленген температурадағы қысымға тәуелділігін есептейміз.



2.3-сурет - Сыну көрсеткішінің тәуелділік графикалары

Графиктерде сыну көрсеткішінің температура мен қысымға тәуелділігі талшықты-оптикалық қысым датчигі үшін көрсетілген.

1. Сыну көрсеткішінің тұрақты қысымдағы температураға тәуелділігі (5 МПа):

- сол жақтағы графикте сыну көрсеткішінің 5 МПа тұрақты қысымдағы температураға тәуелділігі көрсетілген.

- сыну көрсеткіші температураның жоғарылауымен жоғарылайтынын көруге болады. Бұл талшықтың термиялық кеңеюіне және материалдың оптикалық қасиеттерінің өзгеруіне байланысты.

2. Сыну көрсеткішінің бекітілген температурадағы қысымға тәуелділігі (400 K):

- оң жақтағы графикте сыну көрсеткішінің 400K тұрақты температурадағы қысымға тәуелділігі көрсетілген.

- сыну көрсеткіші қысымның жоғарылауымен төмендейтінін көруге болады. Бұл материалдың оптикалық қасиеттерін өзгертетін қысым әсерінен талшықтың механикалық деформациясына байланысты.

Бұл графиктер температура мен қысымның талшықты-оптикалық сенсордың оптикалық қасиеттеріне қалай әсер ететінін көрсетеді. Модель сыртқы жағдайларға байланысты сыну көрсеткішінің өзгеруін болжауға мүмкіндік береді, бұл жоғары температуралы ортадағы қысымды дәл өлшеу үшін маңызды.

Айта кететін жәйт, тәуелділік графикалары Python бағдарламалу тілінде жазылып құрастырылды. Python бағдарламалу тіліндегі жазылған код:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Исходные параметры
n0 = 1.45
```

```

beta = 1e-5
gamma = 0.02
alpha_T = 1e-5
E = 70e9 # модуль Па
T0 = 300 # начальная температура в К
r_i = 0.1e-3 # иш радиус в м
r_o = 0.2e-3 # сырт радиус в м
# Қысым және температура графиктері
pressures = np.linspace(0, 10e6, 100) # давление от 0 до 10 МПа
temperatures = np.linspace(300, 500, 100) # температура от 300 до 500 К
fixed_pressure = 5e6 # фикс давление 5 МПа
fixed_temperature = 400 # фикс температура 400 К
n_vs_temp = []
for T in temperatures:
    epsilon_T = alpha_T * (T - T0)
    sigma_r = (fixed_pressure * r_i**2) / (r_o**2 - r_i**2) * (1 - (r_o**2 /
r_o**2))
    epsilon_m = sigma_r / E
    epsilon = epsilon_m + epsilon_T
    n = n0 + beta * (T - T0) + gamma * epsilon
    n_vs_temp.append(n)
n_vs_pressure = []
for P in pressures:
    sigma_r = (P * r_i**2) / (r_o**2 - r_i**2) * (1 - (r_o**2 / r_o**2))
    epsilon_m = sigma_r / E
    epsilon_T = alpha_T * (fixed_temperature - T0)
    epsilon = epsilon_m + epsilon_T
    n = n0 + beta * (fixed_temperature - T0) + gamma * epsilon
    n_vs_pressure.append(n)
#
plt.figure(figsize=(12, 6))
#
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.plot(temperatures, n_vs_temp, label='P = 5 МПа')
plt.xlabel('Температура (К)')
plt.ylabel("")
plt.title("")
plt.grid(True)
plt.legend()
#
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.plot(pressures / 1e6, n_vs_pressure, label='T = 400 К')
plt.xlabel('Давление (МПа)')
plt.ylabel("")

```

```
plt.title("")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.plot(temperatures, n_vs_temp, label='P = 5 МПа')
plt.xlabel('Температура (K)')
plt.ylabel("")
plt.title("")
```


3 Талшықты-оптикалық Брегг торларына негізделген жоғары температуралы қатты күйдегі қысым сенсорының параметрлерін зерттеу.

Талшықты-оптикалық қысым датчиктері (ТОҚД) жоғары температура, коррозиялық орта, иондаушы сәулелену және т.б. сияқты экстремалды жағдайларда қысымды өлшеу қажет болатын әртүрлі салаларда кеңінен қолданылады. Жоғары дәлдік, электамдылық және электромагниттік кедергілерге төзімділік энергетика, аэроғарыш және мұнай-газ салалары сияқты салаларда енгізуді қажет етеді. Алайда, жоғары температурада ТОҚД-ның сенімді жұмысын қамтамасыз ету үшін олардың конструктивті және пайдалану сипаттамаларын мұқият талдау қажет.

ANSYS бағдарламалық құралы физикалық процестерді, соның ішінде механикалық, жылу және электромагниттік құбылыстарды модельдеу және талдау үшін қуатты құралдарды ұсынады. ANSYS-ті талшықты-оптикалық қысым датчиктерін зерттеу үшін пайдалану олардың Жоғары температуралы ортадағы әрекеттерін егжей-тегжейлі талдауға, дизайнды оңтайландыруға және жұмыс сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Бұл бөлімде физикалық құрылысты, қысымның өзгеруіне оптикалық реакцияны егжей-тегжейлі талдауды және температураны өтеу әдісін талқылауды қоса алғанда, талшықты-оптикалық торларға негізделген жоғары температуралы диафрагма қысым сенсорының жоғары температуралы ортада өзін ұстауын сипаттайды. Жоғары температуралық және қалыпты температуралық сығымдау кезінде пішінді өзгертудің математикалық моделі жасалды, жоғары температурада қысым датчигінің температуралық кедергілерін жоюға көмектесетін тиімді температуралық компенсация әдісі ұсынылды. Сонымен қатар, дизайн моделіне сәйкес жоғары температура мен қысымда сенсордың сыртқы корпусын есептеу модельдеуі жүргізілді. Ұсынылған температураны өтеу әдісі қысымды салыстырмалы қателікпен толық шкаланың төмен деңгейде болуы және 300°C жағдайында 50 МПа дейінгі диапазонда өлшеуге мүмкіндік беретіндігі моделденді. Алайда бұл компьютерлік моделдеу нәтижелері толықтай сенсордың эксперименттік прототиптің әзірлеуді талап етеді.

3.1 Брегг талшықты торлары негізіндегі қысым сенсоры.

Жоғары температурадағы ішкі қатты күйдегі қысым аэрокосмикалық қозғалтқыштардың жүйесінің қауіпсіздігі мен экологиялық бейімделуінің маңызды көрсеткіші болып табылады. Бұл бүкіл құрылым ішінара немесе толық тұрақсыздық пен істен шығуды тудыратынын анықтау үшін қажет және бұл термиялық кеңеюден туындаған шамадан тыс деформацияға байланысты тұрақтылықты жоғалтуға әкеледі. Мысалы, қатты зымыран қозғалтқышының ішкі қысымы, қару-жарак жүйесінің оқтұмсығындағы ішкі

өрт және жарылғыш қысым, олар жоғары температурадағы ішкі қысымды өлшеуді қажет етеді.

Брегг талшықты торлары (БТТ) электромагниттік кедергіге төзімділік, шағын өлшем, жеңілдік және агрессивті ортаға жоғары төзімділік сияқты керемет артықшылықтарының арқасында оптикалық байланыс пен сенсорлық өрістерде ұсынылды және кеңінен қолданылды. Талшықты торлы сенсор технологиясы экологиялық, тиімді және тұрақты сипаттамаларына байланысты біздің күнделікті өмірімізде барлық жерде бар. Осы негізде Брегг талшықты торлы сенсорлар (БТТ) көпірлердің, көшкіндердің алдын алу қауіпсіздігін бақылауда ұсынылды және кеңінен қолданылды. Бір талшық бойымен бірнеше БТТ орналастыру мүмкіндігі бірдей инженерлік қосымшаларда қолдануға болатын температураны, қысымды, деформацияны, қозғалысты, дірілді және үдеуді өлшеуге арналған әртүрлі сенсорларды жасауға мүмкіндік берді. Брегг талшықты торға негізделген қысым датчиктері жергілікті қуат көзін қажет етпестен қашықтықтан таратылған бақылау үшін жарамды болып табылады. Әсіресе жанғыш және жарылғыш, электромагниттік кедергілерде және қатал жағдайларда күшті радиацияда олар үлкен артықшылықтарды оңай көрсетеді, бұл оларды қатты күйдегі қысымды сынауда жиі қолданады. БТТ негізіндегі қысымды өлшеу сенсорлардың кең таралған технологияларының бірі болып табылады және қысымды бақылауды Брегг талшықты торының деформация параметрлері мен физикалық өлшенетін объектісін тексеру арқылы жанама түрде жүзеге асыруға болады. Әдебиеттерде күштің тікелей өлшенуіне арналған БТТ сенсорлары туралы да айтылды. Көптеген зерттеушілер бреггтің талшықты торлары арқылы қысымды өлшеу технологиясының саласына назар аударады. 2013 жылы Хуан және басқалар температураны өтейтін Брегг талшықты торларына негізделген диафрагма қысым сенсоры туралы хабарлады. Сенсор сезімтал элемент ретінде радиалды бағытта бетіне екі БТТ бекітілген дөңгелек диафрагманы пайдаланады. Эксперименттік нәтижелер бұл жаңа сенсордың қысым сезімталдығы $1,57 \text{ пм/кПа}$ екенін көрсетеді. Алайда, бұл БТТ қысым датчиктерінің көпшілігі қысымды өлшеу диапазонымен және жұмыс температурасымен шектелді.

Жоғарыда аталған датчиктердің қысымын өлшеу диапазоны 25 МПа -ға дейін, ал қажетті температура 15°C - 50°C . Бұл жылыту кезінде қысымын бақылау қажеттілігін қанағаттандыра алмайтыны анық (жұмыс температурасы: 300°C , қысым диапазоны: 50 МПа). Сонымен қатар, бұл сенсорлардың жоғары сезімталдығына резеңке және алюминий сияқты төмен серпімді модульді материалдар арқылы қол жеткізіледі. Бұл сенсорлар оқ-дәрі жүйесінің қауіпсіздігі мен экологиялық бейімделуін қамтамасыз ету үшін қолданылса, сөзсіз зақымдалады. Осы себептерге байланысты жоғары температура мен қысым датчиктерін зерттеу қажет. Мұнда біз жоғары температура мен қысымды БТТ қысым сенсорын әзірлейміз және ұсынамыз. Біздің алдыңғы жұмысымызда зерттеу тобы бреггтің талшықты торларына негізделген қатты күйдегі қысым сенсорына зерттеулер жүргізді. Бұл

дизайнда сенсордың сезімталдығы дизайн арқылы толығымен жақсарады. Сенсор моделінің жазықтығына перпендикуляр қысым жүктелген кезде, құрылым қысымды екі бекітілген бағанның x бағытында екі деформацияға айналдыра алады. Y және Z бағыттарында екі бекітілген баған бірдей деформацияға ие және салыстырмалы өзгеріссіз. Тор екі бекітілген бағанның арасына жабыстырылған кезде, қысымның өзгеруі радиалды созылуы тек осьтік созылуды тудырады.

Жұмыс принципі және сенсордың дизайны келесідей. БТТ - оптикалық толқын ұзындығының модуляциясының құрамдас бөлігі. Кең жолақты жарық толқынының сәулесі БТТ-ге түскенде, Брегг теңдеуін қанағаттандыратын толқын ұзындығы бар оптикалық толқын Брегг торымен модуляцияланғаннан кейін кері беріліс режиміне ауысады және шағылысқан Брегг толқыны (3.1) үшін Брегг теңдеуін құрайды

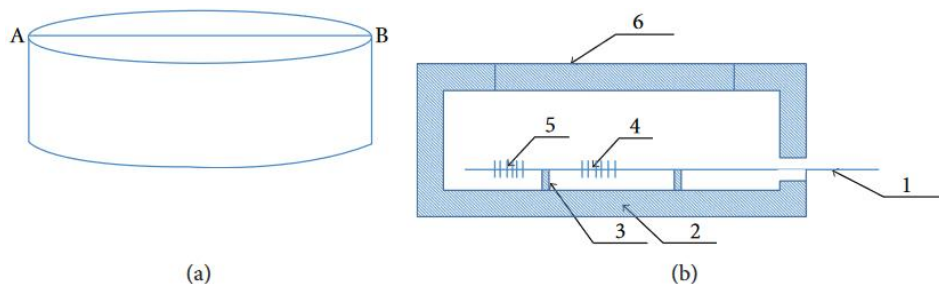
$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda \quad (3.1)$$

Жоғарыдағы формулада, Λ — тор қадамы, ал n_{eff} — оптикалық тордың тиімді сыну көрсеткіші. Λ және n_{eff} сыртқы факторлардың әсерінен өзгереді (температура, деформация, қысым және т.б.), бұл оптикалық тордың шағылысу толқын ұзындығының ығысуын тудырады. БТТ шағылысуының орталық толқын ұзындығы температура мен деформацияға байланысты. Толқын ұзындығының өзгеруі, осьтік деформацияның өзгеруі және температураның реакциясы арасындағы байланыс келесі формуламен анықталады :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\varepsilon \quad (3.2)$$

Бұл формулада, λ — БТТ бастапқы толқын ұзындығы, α_f — термиялық кеңею коэффициенті, ξ — термооптикалық коэффициент, а P_e — тиімді фотоэластикалық коэффициент. Бөлме температурасында тиімді фотоэластикалық коэффициент 0.22 құрайды. Ашық тордың қысымға сезімталдығы төмен және ол оңай бұзылады және қысымға төтеп бере алмайды. Сондықтан ол әдеттегі өлшеулер үшін жарамсыз. Қысымға сезімталдық пен қысуға төзімділік мақсатына жету үшін біз оны корпусқа жабуымыз керек . Қатты күйдегі механика теориясына және қатты күйдегі датчиктерді сәйкестендіру қателерін зерттеудің ағымдағы нәтижелеріне сәйкес, егер сенсор пирог түрінде жасалса, тамаша сынақ нәтижелерін алуға болады. Дизайнда жоғары температураға төзімді оптикалық торлы қысым датчигі дәстүрлі оптикалық торлы датчиктің корпусының құрылымы негізінде беті ыстыққа төзімді материалмен қапталған жоғары температураға төзімді оптикалық торды қолдану арқылы жасалады. Сенсор корпусының дизайн схемасы 3.1-суретте көрсетілген. Оптикалық торлы қатты күйдегі қысым сенсоры қысымға төзімді мембранадан, сенсор корпусынан және тот баспайтын болаттан жасалған жоғарғы қақпақтан тұрады. Осы үш

компоненттің барлығы бірдей негізгі материалдан жасалған. Қысымға төзімді мембрана дөңгелек серпімді мембранадан және бекітілген бағаннан тұрады. Бекітілген баған мен серпімді мембрана, сондай-ақ сенсор корпусы кернеу концентрациясы немесе кернеудің біркелкі концентстігі мәселесін азайту үшін біртұтас түрде қалыптасады. Датчик корпусы мен тот баспайтын болаттан жасалған қақпақ бұрандалы қосылыс арқылы қосылады. Қысым бөлігі серпімді мембрананы сенсордың серпімді құрамдас бөлігі ретінде пайдаланады, ал екі симметриялы бекітілген баған Брегг 1 (БТТ1) индуктивті талшықты торының екі ұшын бекіту үшін қолданылады.



3.1-сурет- Оптикалық торлы қысым датчигінің құрылымдық диаграммасы: (a) сенсордың жалпы көрінісі. (b) АВ позициясындағы құрылымдық профиль. (1) талшық, (2) бекіту бағанасы, (3) қысым диафрагмасы, (4) деформация торы БТТ1, (5) температура компенсация торы БТТ2, (6) тот баспайтын болаттан жасалған қақпақ

Дөңгелек серпімді мембрананың серпімді деформациясы қатты күйдегі қысымды оптикалық тордың өлшенетін деформациясына айналдырады. БТТ2-температураны өтеуге арналған тор. Ол тек температураға ұшырайды және корпусстың пішінінің өзгеруіне әсер етпейді. Ол температураны өтеуді жүзеге асыру үшін қолданылады. Сенсордың R диаметрі 120 мм, қабырға қалыңдығы h 15 мм, екі бекітілген Орталық нүкте арасындағы l қашықтығы 40 мм, бекітілген R бағанының диаметрі 10 мм, ал бекітілген m бағанының биіктігі 10 мм. Сыртқы күш қысымға төтеп беретін мембранаға әсер еткенде, мембрана аздап деформацияны көрсетеді және екі бекітілген баған арасындағы қашықтық артады. Біз торды созамыз және қолданылатын жүктеме туралы ақпаратты одан әрі алу үшін өзгертін шағылысқан сигналды өлшейміз. Сондықтан температура мен қысымның сенсор корпусына әсерін зерттеу осы факторлардың әсерінен бекітілген бағандар арасындағы қашықтықтың өзгеруін зерттеуге бағытталған. Екі бекітілген баған арасындағы қашықтықтың өзгеруіне әсер ететін екі фактор бар: (1) Бекітілген бағандар орналасқан мембрананың көлденеңмещысуы (x осі бойыншамещысу) және (2) бекітілген бағандардың көлденең проекциясы (z осі бойынша деформацияға пропорционалды бағытталған). Осы екі фактордың суперпозициясы екі бекітілген баған арасындағы қашықтықтың өзгеруін анықтайды. Датчик корпусының құрылымына сәйкес белгілі:

$$\Delta l = (\Delta x_r - x_l) + \frac{2m\Delta z}{R} \quad (3.3)$$

3.2 Қысым сынағы және температураны өтеу әдісін моделдеу

Қалыпты температурада сығылатын құрылымды талдау. Датчик корпусының деформацияларының әртүрлі қысымдарда таралуын алу үшін мақала жүктемені ақырлы элементтер әдісімен модельдейді (ANSYS15). 304# маркалы тот баспайтын болаттан жасалған серпімді материал параметрлік модельдеу үшін келесідей қолданылады: Юнг модулі $E = 1\,942 \times 10^{11}$ Па, Пуассон коэффициенті $\mu = 0.28$, және қысым жүетемесі 50 МПа. Модельдеу нәтижелері 3.2-3.5 суреттерде көрсетілген, 3.1-сурет-50 МПа қысымдағы сенсор моделінің жалпы деформация диаграммасы, сәйкесінше 3.4 және 3.5-суреттер 50 МПа қысымдағы X, Y және Z бағыттарындағы сенсор моделінің деформациясының таралуын көрсетеді.

Жоғарыдағы суреттерден қысымды қолданғаннан кейін мембрана төмен қарай аздап деформация көрсететінін көруге болады. Диаметрі $y = 0$ болатын мембрананың ішкі қабырғасына координаттардың басталуына қатысты екі симметриялы бекітілген баған орнатылады. Екі бекітілген баған координаттардың басталуына қатысты симметриялы, сондықтан z осі бойынша орын ауыстыру бірдей, y осі бойынша орын ауыстыру бағыты қарама-қарсы, ал x осі бойынша орын ауыстыру бағыты қарама-қарсы. Осылайша, оптикалық тордың екі ұшы да бекітілген бағанға жабыстырылады, оптикалық тордың радиалды пішінінің өзгеруі жойылады және тек осьтік пішіннің өзгеруі (x осінің бағыты) қалады.

Екі бекітілген бағанды қосқаннан кейін, модельдеу параметрі мен қосылған жүктеме тұрақты болып қалса, сенсор моделінің ішкі деформация диаграммасы 3.6 және 3.7 суреттерде көрсетілген. 6-суретте сенсор ішіндегі жалпы деформация диаграммасы көрсетілген. 3.7-суретте сенсор ішіндегі X осі бойынша деформацияның таралуы көрсетілген.

Жоғарыдағы кестеден сыртқы жүктеме екі бекітілген бағанның орталық нүктелерімен сызықты түрде байланысты екенін және сыртқы жүктемені анықтау үшін тордың екі ұшын бекітілген бағанға жабыстыруға болатынын көруге болады. Сыртқы қысым екі бекітілген баған арасындағы қашықтыққа пропорционалды және қатынас келесідей:

$$P = K_d \Delta l \quad (3.4)$$

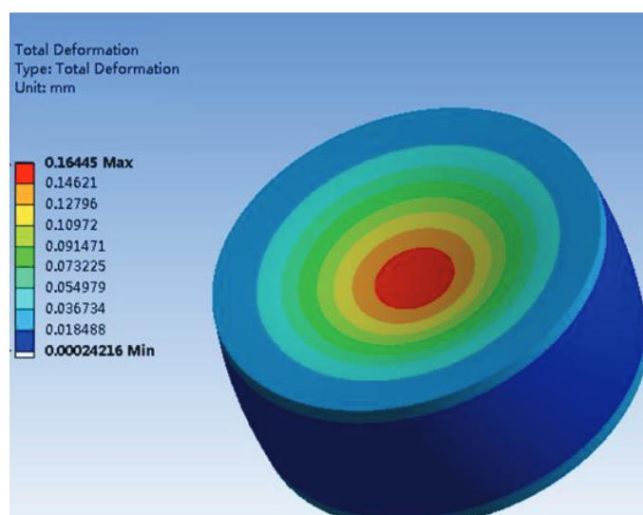
формулада (4), P — сыртқы қысым, Δl — екі бекітілген баған арасындағы қашықтықтың өзгеруі. (3) формуланы (4) формулаға қою арқылы келесі нәтижені аламыз :

$$P = K_d \left((\Delta x_r - \Delta x_l) + \frac{2m\Delta z}{R} \right) \quad (3.5)$$

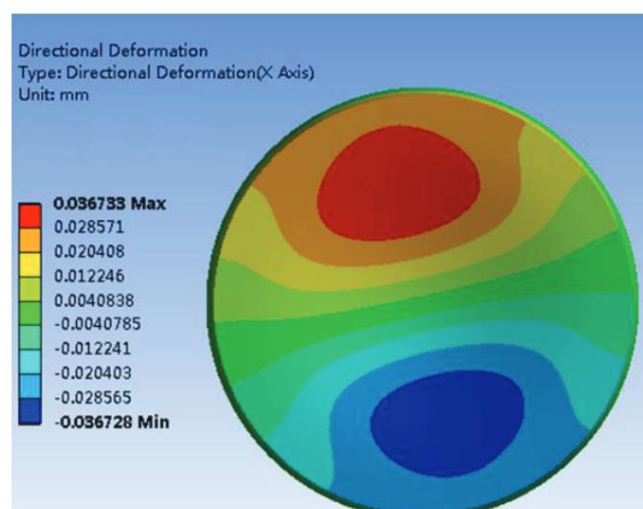
Кесте-3.1 - Әр түрлі қысымдардағы деформация

Қысым МПа	Сол жақтан бекітілген бағандардың x осінің деформациясы (мм)	Оң жақ бекітілген бағандардың x осінің деформациясы (мм)	Ортаның z-осінің деформациясы (мм)
10	5.47E-03	-5.48E-03	3.20E-02
20	1.10E-02	-1.10E-02	6.41E-02
30	1.64E-02	-1.65E-02	9.62E-02
40	2.19E-02	-2.19E-02	1.28E-01
50	2.74E-02	-2.75E-02	0.16056

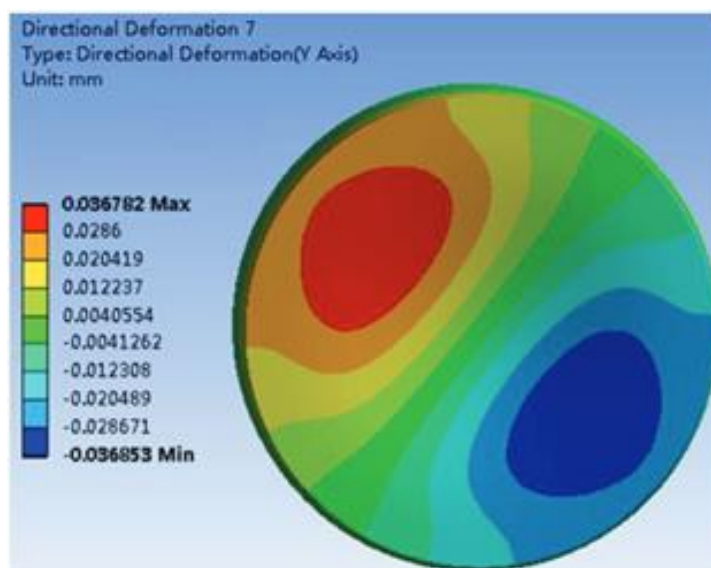
Температураның өзгеруінің қысым сынағына және температураны өтеу әдісіне әсері төмендегідей,



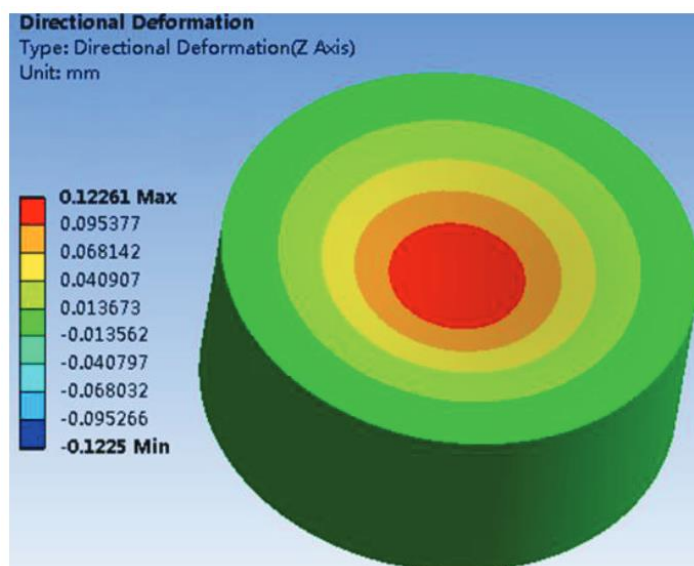
3.2-сурет: сенсордың сыртқы корпусының Жалпы деформациясы



3.3-сурет: сенсордың сыртқы корпусының x осінің деформациясы



3.4-сурет: сенсордың сыртқы корпусының у осінің деформациясы



3.5-сурет: сенсордың сыртқы корпусының z осінің деформациясы

Сенсордың сыртқы моделі әртүрлі температурада ешқандай жүктеме қолданбай модельденеді. Модельдеу параметрі келесідей: жылу өткізгіштік 16.2 Вт/м °с, сызықтық кеңею коэффициенті $17.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, Юнг модулі $E = 1.942 \times 10^{11}$ Па және Пуассон коэффициенті $\mu = 0.28$. Датчик моделінің қысымсыз 300°C жағдайында деформациясы 9-суретте көрсетілген.

Екі бекітілген баған арқылы өтетін мембрананың диаметрі жол ретінде таңдалады. Қысымсыз әр түрлі температурада мембрананың Екі бекітілген бағанының X осі мен Z осі бойынша Деформация деректері 2-кестеде көрсетілген.

Кесте-3.2 - Екі бекітілген бағанының X осі мен Z осі бойынша деформация деректері

Температура (°C)	Сол жақ бекітілген бағандардың x осінің деформациясы (мм)	Оң жақ бекітілген бағандардың x осінің деформациясы (мм)	Орталықтың z-осінің деформациясы (мм)	Қысым деңгейі (Мпа)
20	2.61E-02	-2.79E-02	-3.69E-02	32
100	3.95E-02	-4.22E-02	-5.58E-02	48
150	5.29E-02	-5.65E-02	-7.47E-02	64
200	6.63E-02	-7.08E-02	-9.36E-02	80
250	7.96E-02	-8.51E-02	-0.11249	97
300	9.30E-02	-9.94E-02	-0.13139	110

3.2-кестеден жоғары температурада сенсордың корпусы қызып, кеңейетінін көруге болады, бұл тордың шағылысуының толқын ұзындығының өзгеруіне әкеледі және қысымды өлшеу қателігіне әкеледі. Температураның әсерін бейтараптандыру үшін тиімді температура компенсациясын қолдану қажет.

3.3 Температураны өтеу әдісі

Жоғарыда сипатталған модельді 50 МПа қысымда және 300°C температурада қолдана отырып, материал 304#маркалы болат болып табылады. Модельдеу үшін келесі параметрлер қолданылады: жылу өткізгіштік 16.2 және сызықтық кеңею коэффициенті 17.3 Юнг модулі.

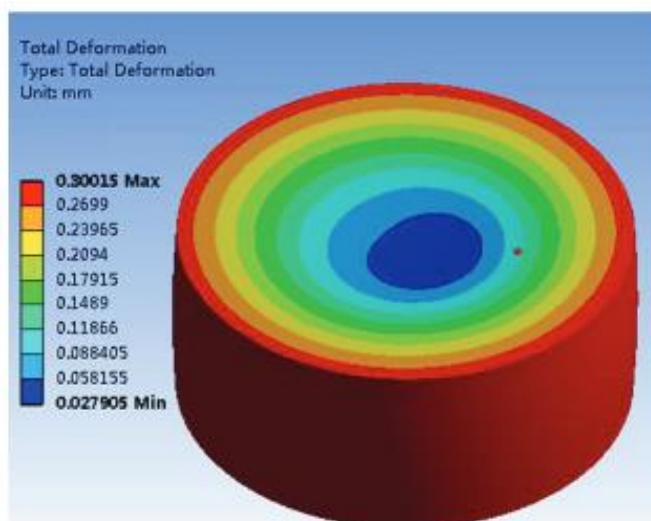
Жол ретінде қысу мембранасындағы екі бекітілген бағанның диаметрі таңдалады. Осы жолдың әрбір нүктесінің деформация деректері 50 Мпа жүктемені қолданғанға дейін және қолданғаннан кейін 300°C температурада 3.3 және 3.5-суреттермен салыстырылады. 3.3-суретте x осінің деформациясы туралы мәліметтер, ал 3.5-суретте z осінің бағытының деформациясы туралы мәліметтер көрсетілген.

Температура компенсацияланған оптикалық тордың толқын ұзындығының өзгеруі арқылы сенсордың температурасы ΔT болатыны көрінеді. ΔT сәйкес біз сәйкес $\Delta \lambda T$ аламыз, ал ағымдағы температурадағы қысым:

$$\Delta P = \frac{(\Delta \lambda_1 - K_{1d} * \Delta T)}{K} = \frac{(\Delta \lambda_1 - K_{1d} * \Delta \lambda_{2T} / K_{2t})}{K} \quad (3.6)$$

(3.6) формулада ΔP -сенсорға жүктелген қысым, $\Delta \lambda_1$ -қысымға сезімтал тордың толқын ұзындығының өлшенген өзгерісі, K -қалыпты температурадағы қысым-толқын ұзындығының коэффициенті, $\Delta \lambda_{2T}$ -температураның компенсацияланған оптикалық торының толқын ұзындығының өзгеруі, K_{2t} -температураның компенсацияланған торының

температуралық коэффициенті, Ал K_{1d} -қысымға сезімтал тордың температуралық коэффициенті. Бұл параметрлерді эксперимент арқылы өлшеуге болады. Осылайша жоғары температурадағы қысым өлшенеді.



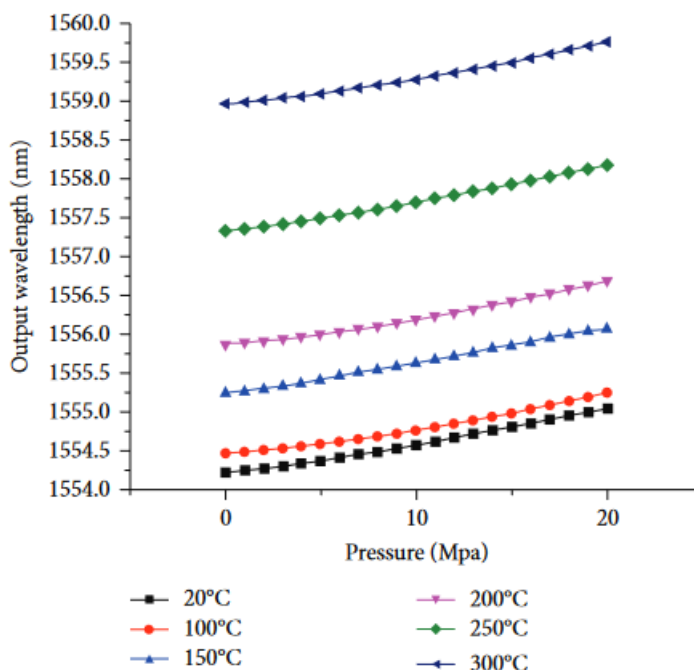
3.6-сурет. 300°C температурада 50 Мпа деформация үлгісі

Сенсор температураны тексеруге арналған қорапқа салынған. Эксперименттің дайындық бөлігі: сенсор 20°C-тан 300°C-қа дейін қызады, содан кейін температура табиғи түрде 300°C-тан 20°C-қа дейін төмендейді. эксперимент үш рет жүргізіледі. Содан кейін сенсордың қысымға сезімтал БТТ шығысы және температура компенсациясы БТТ температура 100°C-тан 300°C-қа дейін көтерілгенде (3.6-сурет), 20°C бірдей аралықпен тіркелді. процесс барысында әрбір температура нүктесі 2 сағат бойы өзгеріссіз сақталуы керек. Сол сияқты, қысымға сезімтал БТТ шығысы және БТТ температурасының компенсациясы әрбір температура нүктесінде 1 сағат температураны сақтай отырып тіркелді. Деректерді талдау мен өңдеуді жалғастыру үшін тексеру мәні ретінде оң және кері диапазондағы температураның өзгеруінен туындаған шығыстың орташа мәнін аламыз. Сенсордың қысымға сезімтал БТТ1 торының және БТТ2 температуралық компенсациялық торының температура реакциясына сезімталдығын алуға болады.

Температура реакциясының қисығы 3.7-суретте көрсетілген. Анықтама ретінде +20°C температурасын қолдана отырып, нөлдік қысым жүктемесі мен температура кезінде температура компенсациясынан кейін қысымға сезімтал тордың (БТТ1) орталық толқын ұзындығы арасындағы қатынастың дрейфтік сипаттамалық қисығына формула процесі арқылы қол жеткізуге болады.

3.4 Температура мен қысымды айқастыру.

Сенсор жоғары температуралы қысымды пешке қойылып, сәйкесінше 100°С, 150°С, 200°С, 250°С және 300°С температурада сыналды. Әр түрлі температура нүктелеріндегі датчиктердің қысым-толқын ұзындығы туралы мәліметтер жазылып, қисықтар сызылды (3.7-Суретте көрсетілген).



3.7-сурет. Әр түрлі температурадағы қысымның шығыс қисықтары

Жоғары температуралы (300 °С дейін) жүйесінің қауіпсіздігі мен бейімделгіштігін анықтау талаптарын қанағаттандыру үшін жоғарыда жоғары температура мен қысым ортасына қолданылатын сенсордың сыртқы қабатының деформациялану моделі ANSYS модельдеу орталығында жасалынды. Бұл жұмыста температуралық компенсация әдісі алға қойылған және модельдеу нәтижесінің дұрыстығы прототипті әзірлеу арқылы тексеруді талап етеді. Бұл әдісті қолдану арқылы негізгі мақсат 50 МПа қысым диапазоны мен 300°С дейінгі ортада салыстырмалы максималды қателіктің төмен болуы прототипті құрастыру арқылы дәлеллеу мақсат етілді және бұл өлшенетін деректерінің дәлдігін айтарлықтай жақсартады деп ойлаймы. Әзірленген сенсор моделінің параметрлері тұтанғыш және жанғыш, электромагниттік кедергі, қару мен жарылғыш заттардың күшті радиация тәрізді қысымын бақылау сияқты әртүрлі жоғары температура мен жоғары қысымды өлшеу жағдайларында кеңірек қолдануға болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Осылайша бұл магистрлік диссертацияда жоғары температуралы ортада қолданылатын қысым сенсорының құрылымы және онда орын алатын процестер қарастырылды. Зерттеу барысында талшықты-оптикалық қысым түрлендіргішінде болатын физикалық процестерге егжей-тегжейлі талдау жүргізілді. Жоғары температуралы ортадағы қысым мен температураның әсерінен талшықтың оптикалық сипаттамалары, атап айтқанда сыну көрсеткіші өзгеретіні анықталды. Бұл өзгерісті талшықты-оптикалық материалдардың сыртқы әсерлерге жоғары сезімталдығының арқасында қысымды өлшеу үшін тиімді пайдалануға болады.

Қорытындылай келе, Жоғары температуралы ортада пайдалану үшін талшықты-оптикалық қысым датчигін модельдеу және зерттеу бойынша орындалған жұмыс мақсатқа жетті деп қорытынды жасауға болады. Әзірленген модель және жүргізілген зерттеулер жоғары температура жағдайында талшықты-оптикалық датчиктерді тиімді қолдану мүмкіндігін растады.

Осы магистрлік диссертацияны орындау барысында келесі негізгі міндеттер шешілді:

Талшықты-оптикалық түрлендіргіште болатын физикалық процестерді зерттеу.

Қысым мен температураның арнайы алынған диапазондағы жарықтың сыну көрсеткішінің өзгеруіне тәуелділігін зерттеу.

ANSYS Engineering бағдарламалық жүйесін пайдалана отырып, Жоғары температуралы ортадағы қысым сенсорының сыртқы қабаты элементінің деформация деңгейін модельдеу.

Қолданылатын материалдардың ыстыққа төзімділігін арттыру, сондай-ақ өлшеулердің дәлдігі мен сенімділігін арттыру үшін сигналдарды өңдеудің жаңа әдістері мен алгоритмдерін әзірлеу бағытында жұмысты жалғастыру ұсынылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ma, S.; Xu, Y.; Pang, Y.; Zhao, X.; Li, Y.; Qin, Z.; Liu, Z.; Lu, P.; Bao, X. Optical Fiber Sensors for High-Temperature Monitoring: A Review. *Sensors* 2022, 22, 5722
2. Shrinkhla G; Rajappa B; Joseph J; Characterization of Fabry Perot Interferometer based Pressure Sensor of Range 100 mbar 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON) | 978-1-7281-6916-3/20/\$31.00 ©2020.
3. Yang, S.; Homa, D.; Heyl, H.; Theis, L.; Beach, J.; Dudding, B.; Acord, G.; Taylor, D.; Pickrell, G.; Wang, A. Application of sapphire-fiber-bragg-grating-based multi-point temperature sensor in boilers at a commercial power plant. *Sensors* 2019, 19, 3211.
4. Бростилов, С.А. Технологический процесс сборки измерительного преобразователя датчика давления на основе оптического туннельного эффекта/С.А. Бростилов, Т.И.Мурашкина, Т.Ю. Бростилова, Е.А. Бадеева//Сборник докладов МНТК «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» «Шляндинские чтения-2010» .- Пенза:Изд-во ПТУ 2010 г, с. 167-170.
5. Pachava V.R. et al. FBG based high sensitive pressure sensor and its low-cost interrogation system with enhanced resolution //Photonic Sensors. – 2015. – Т. 5. – С. 321-329.
6. Численное исследование характеристик оптоволоконного сильфонного датчика давления, Попов Е.С., Гончаров М.М., Трефилов И.А., Юрина А.Д. ВКВО-2023 стендовые.
7. High-temperature fiber optic cubic-zirconia pressure sensor *Optical Engineering* 44_12_, 124402 _December 2015_Wei Peng, MEMBER SPIE* Gary R. Pickrell, MEMBER SPIE Anbo Wang, MEMBER SPIE Virginia Polytechnic Institute
8. Бростилов, С.А., Особенности конструктивного исполнения волоконно- оптического преобразователя микроперемещений/С. А. Бростилов //Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. -2011. - Спец. Выпуск № 2. - с.27-32.
9. Бростилов, С.А. Распространение света в искривленном многомодовом оптическом волноводе / С.А. Бростилов, СИ. Торгашин, Н.К. Юрков// Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. Пенза: Изд-во ПГУ 2012 г., №1. - с.141-150.
10. Патент №2253850 РФ, МПК6 G01 L 11/02, 19/04. Волоко-оптический сенсор давления на основе туннельного эффекта/ Е.А.Бадеева, А.В. Гориш, Т.И.Мурашкина, А.Г. Пивкин; опубл. 10.06.2005. Бюл. № 16
11. Патент №2004124974/28, 16.08.2004. Талшықты-оптикалық қысым сенсоры. Жоғары кәсіптік білім берудің мемлекеттік білім беру мекемесі Санкт-Петербург мемлекеттік тау-кен институты.

12. Волоконно-оптические сенсоры / Окоси Т., Окамато К., Оцу М. И др.; Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. - Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 256 с.

13. Бростилов, С.А. К вопросу о создании и внедрении волоконно-оптических систем и сенсоров давления на изделиях ракетно-космической и авиационной техники/ Т.Ю. Бростилова, С.А. Бростилов // Труды межвузовского сборника Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС 2012. Пенза: Изд-во ЛГУ 2012 г., с.23-28.

14. Мурашкина Т.И., Волчихин В.И. Амплитудные волоконно-оптические сенсоры автономных систем управления: Монография. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1999. - 173 с.

15. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2007. 400 с.

7M06201 – «Телекоммуникация» мамандығының магистранты
Жумагазиев Адилбек Талгатулы
магистрлік диссертациясына
СЫН ПІКІР

Тақырыбы: Жоғары температуралы ортада қолдануға арналған талшықты-оптикалық қысым сенсорын модельдеу және зерттеу.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Диссертациялық жұмыста Жумагазиев Адилбек талшықты-оптика негізіндегі жоғары температуралы ортада қолданылатын қысым сенсорының жұмысындағы оптикалық сәуленің параметрлерін зерттеп және модельдеуді іске асырды. Диссертациялық жұмыс келесі бөлімдерден тұрады:

Бірінші бөлімде талшықты-оптикалық жалпы қысым сенсорлары қазіргі заманғы жәй күйі және параметрлік сипаттамалары мен жұмыс принциптеріне, артықшылықтары мен кемшіліктеріне талдау жасалынып теориялық тұрғыдан зерттелді.

Екінші бөлімде талшықты-оптикалық сенсор түрлендіргішінде орын алатын физикалық процестерді MathCad математикалық модельдеу ортасында модельдеу жүргізілді.

Үшінші бөлімде талшықты-оптикалық қысым сенсорының сыртқы қабаты элементінің жоғары температуралы ортадағы деформациялану деңгейі ANSYS Engineering бағдарламалық жүйесінде модельденді.

Жұмыстың теориялық бөлігінде Жумагазиев Адилбек ғылыми әдебиеттердің кең спектріне сүйене отырып, құрылғыны зерттеу және модельдеу әдістерін таңдауды негіздейді. Дегенмен, жұмысты одан әрі жетілдіру үшін қосымша эксперименталды сынақтар жүргізу және құрылғы жұмысының қателік деңгейін төмендетуге бағытталған ұсыныстарды зерттеп енгізу маңызды болар еді.

Жұмыс бағасы

Магистрлік диссертациялық жұмыс «өте жақсы» (А, 90%) деп бағаланып, магистрант Жумагазиев Адилбек Талгатулы 7M06201 – Телекоммуникация мамандығы бойынша «техника ғылымдарының магистрі» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Сын пікір беруші

PhD доктор, ҚазТБУ ғылым жөніндегі
проректор, қауымдастырылған
профессор

Д.С. Жамангарин
«13» маусым 2024 ж

Ф ҚазҰТЗУ 704-22. Рецензия



ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ШІКІРІ

диссертациялық жұмыс

Жумагазиев Адилбек Талгатулы

7M06201 – «Телекоммуникация»

Тақырыбы: **Жоғары температуралы ортада қолдануға арналған талшықты-оптикалық қысым сенсорын модельдеу және зерттеу.**

Жумагазиев Адилбек Талгатулы диссертациялық жұмысты талшықты-оптика негізіндегі жоғары температуралы ортада қолданылатын қысым сенсорын жұмысын зерделеуге алды. Бұл жұмыстың практикалық бөлімінде оптикалық сәуленің параметрлерін зерттеп және модельдеуді іске асыру үшін бағдарламалық технологияларды, атап айтқанда, ANSYS Engineering, MathCad, Python бағдарламаларында қажетті зерттеулер жүргізіп нәтиже оер алынды.

Диссертациялық жұмыс келесі бөлімдерден тұрады:

Бірінші бөлімде талшықты-оптикалық жалпы қысым сенсорлары қазіргі заманғы жәй күйі және параметрлік сипаттамалары мен жұмыс принциптеріне, артықшылықтары мен кемшіліктеріне талдау жасалынып теориялық тұрғыдан зерттелді.

Екінші бөлімде талшықты-оптикалық сенсор түрлендіргішінде орын алатын физикалық процестерді MathCad математикалық модельдеу ортасында модельдеу жүргізілді.

Үшінші бөлімде талшықты-оптикалық қысым сенсорының сыртқы қабаты элементінің жоғары температуралы ортадағы деформациялану деңгейі ANSYS Engineering бағдарламалық жүйесінде модельденді.

Магистрант Жумагазиев Адилбек диссертациялық жұмысты жазу барысында жетекші нұсқауларымен және өз бетінше жұмыс жасау қабілітін көрсете алды. Диссертациялық жұмыс «өте жақсы» (А, 90%) деп бағаланып, ал магистрант Жумагазиев Адилбек Талгатулы 7M06201 – Телекоммуникация мамандығы бойынша «техника ғылымдарының магистрі» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Ғылыми жетекші
ЭТЖҒТ каф. PhD докторы
қауымдастырылған профессор
Смайлов Н.К.

«5» 2024 ж.



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

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

Автор: Жумагазиев Адилбек Талгатулы

Тақырыбы: Жоғары температуралы ортада қолдануға арналған талшықты- оптикалық қысым сенсорын модельдеу және зерттеу

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 1.8

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.3

Дәйексөз (35): 1.9

Әріптерді ауыстыру: 34

Аралықтар: 4

Шағын кеңістіктер: 2

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:

13.06.2024
Күні

Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Жумагазиев Адилбек Талгатулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Жоғары температуралы ортада қолдануға арналған талшықты- оптикалық қысым сенсорын модельдеу және зерттеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 1.8

Коэффициент Подобия 2: 0.3

Микропробелы: 2

Знаки из других алфавитов: 34

Интервалы: 4

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:

13.06.2024
Дата

Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Жумагазиев Адилбек Талгатулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Жоғары температуралы ортада қолдануға арналған талшықты- оптикалық қысым сенсорын модельдеу және зерттеу

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 1.8

Коэффициент Подобия 2: 0.3

Микропробелы: 2

Знаки из других алфавитов: 34

Интервалы: 4

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:

13.06.2024
Дата


Морисцян С
проверяющий эксперт