

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

Диханбек Гүлнәз Талғатқызы

«Бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін Бриллюэн әдісін  
зерттеу және қолдану»

**ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС**

6B07112 – Electronic and Electrical Engineering

Алматы 2024

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  
техн.ғыл.кан  
Е.Таштай  
« 14 » 05 2024 ж.

**ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС**

«Бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін Бриллюэн әдісін  
зерттеу және қолдану»

6B07112 – Electronic and Electrical Engineering

Орындаған:

Г.Т. Диханбек

Пікір беруші

ҚазҰАЗУ

қауымдастырылған профессор т.ғ.к

А.Б. Гокмолдаев

« 30 » 05 2024 ж.

Ғылыми жетекші

ЭТжҒТ каф.

профессор PhD

Н.К.Смайлов

« 30 » 05 2024 ж.

Алматы 2024

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыш технологиялар кафедрасы

6B07112 – Electronic and Electrical Engineering

**БЕКІТЕМІН**  
ЭТжҒТ кафедра меңгерушісі  
техн.ғыл.кан  
Е.Таштай  
« 05 » 12 2023ж



**Дипломдық жұмыс орындауға  
ТАПСЫРМА**

Білім алушы: Диханбек Гүлнәз Талғатқызы

Тақырыбы: «Бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін Бриллюэн әдісін зерттеу және қолдану».

Университет ректорының « 4 » 12 2023ж. № 548 П/Ө бұйрығымен бекітілген Аяқталған жобаны тапсыру мерізімі \_\_ 30 \_\_ \_\_ 04 \_\_ 2024 ж.

Жұмыстың бастапқы мәліметтері: МЕМСТ 5379-20-21 Талшықты-оптикалық технологиялар

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:





- а) Бриллюэн әдісі материалдың деформациясы кезінде оның оптикалық қасиеттерінің өзгеруін зерттеу.
  - б) Бриллюэн әдісімен бетонның қандай параметрлері мен қасиеттерін өлшеуге болатынын анықтау.
  - в) Бриллюэн әдісімен деформацияларды өлшеуге арналған тәжірибелік жұмыстарға шолу
  - г) Деформацияны бақылауда Бриллюэн әдісінің тиімділігін тексеру үшін бетон үлгілеріне немесе нақты құрылымдарға эксперименттер жүргізу
- Сызбалық материалдар 15 слайдпен ppt форматында көрсетілген.

Ұсынылатын негізгі әдебиет:

1. A. Sebastian, S. Trebaol and P. Besnard, "Intracavity Brillouin Gain Characterization," 2018 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), Toulouse, France, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWP.2018.8552907.
2. J. P. Van't Hof and D. D. Stancil, "Eigenfrequencies of a Truncated Conical Resonator via the Classical and Wentzel–Kramers–Brillouin Methods," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 8, pp. 1909-1916, Aug. 2008, doi: 10.1109/TMTT.2008.927408
3. A. Theodosiou, P. Savva, E. Mendoza, M. F. Petrou and K. Kalli, "In-Situ Relative Humidity Sensing for Ultra-High-Performance Concrete Using Polymer Fiber Bragg Gratings," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 14, pp. 16086-16092, 15 July 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3075609.
4. L. Shaobin, Z. Tao, L. Meilin and H. Wei, "Wentzel-Kramer-Brillouin and finite-difference time-domain analysis of Terahertz band electromagnetic characteristics of target coated with unmagnetized plasma," in *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 19, no. 1, pp. 15-20, Feb. 2008, doi: 10.1016/S1004-4132(08)60039-0.
5. A. Lopez-Gil, X. Angulo-Vinuesa, A. Dominguez-Lopez, S. Martin-Lopez and M. Gonzalez-Herraez, "Simple Baseband Method for the Distributed Analysis of Brillouin Phase-Shift Spectra," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 13, pp. 1379-1382, 1 July 2016, doi: 10.1109/LPT.2016.2541699.




Дипломдық жұмысты дайындау

КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерізімі	Ескерту
Бриллюэн әдісі материалдың деформациясы кезінде оның оптикалық қасиеттерінің өзгеруін зерттеуге негізделген. Бетон конструкциялары үшін бұл әдіс материал ішіндегі деформацияларды өлшеу үшін пайдаланылуы мүмкін.	07.02.2024	
Бриллюэн әдісімен бетонның қандай параметрлері мен қасиеттерін өлшеуге болатынын анықтау қажет, мысалы, бетонның өз ішіндегі деформациялар немесе бетон қабаттары мен арматура арасындағы деформациялар.	24.03.2024	
Бриллюэн әдісімен деформацияларды өлшеуге арналған тәжірибелік жұмыстарға шолу	20.04.2024	
Деформацияны бақылауда Бриллюэн әдісінің тиімділігін тексеру үшін бетон үлгілеріне немесе нақты құрылымдарға эксперименттер жүргізу. Бұл сынақ стендтерін жасауды, үлгілерді немесе нақты құрылымдарды жүктеуді және Бриллюэн әдісін пайдаланып штамм деректерін жинауды қамтуы мүмкін.	26.04.2024	

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	Ғылыми жетекші ЭТЖҒТ каф. профессоры, PhD Н.К.Смайлов	12.12.2023	
Теориялық ақпарат	Ғылыми жетекші ЭТЖҒТ каф. профессоры, PhD Н.К.Смайлов	27.03.2024	
Норма бақылау	ЭТЖҒТ каф. оқытушысы, П.Б. Ақылжан	31.05.2024	

Ғылыми жетекшісі PhD докторы  Н.К. Смайлов

(колы)

Тапсырманы орындауға алған білім алушы  Г.Т. Диханбек

(колы)

Күні «31» 05 2024 ж.

## **АНДАТПА**

Дипломдық жұмыста қазіргі әлемдік ғалымдардың зерттеулеріне сүйене отырып талшықты-оптикалық сенсорлардың бетон конструкциялары мен интеграциялануын зерттеу. Жұмыс нәтижесінде Бриллюэн әдісінің негізгі принциптері мен талаптарын сақтай отырып қарастырылды. Алынған нәтижелер арқылы оптикалық байланыс кабелінің жаңа тұстарын зерделеу қарастырылды. Нәтижелердің нақты ақпарат алу үшін эксперименттік жұмыстар жүргізілген. OptiSystem бағдарламасы пайдалана отырып Бриллюэн шашырауының жаңа нәтижелерге қол жеткізу мен зерттеу бөлімінде қарастырылады.

## **АННОТАЦИЯ**

Дипломной работой является исследование бетонных конструкций и интеграция волоконно-оптических датчиков на основе исследований современных мировых ученых. В результате работы были рассмотрены основные принципы и требования метода Бриллюэна. На основе полученных результатов было рассмотрено исследование новых аспектов оптического кабеля связи. Для получения точной информации о результатах была проведена экспериментальная работа. В разделе исследований обсуждаются новые результаты рассеяния Бриллюэна с использованием программы OptiSystem.

## **ANNOTATION**

The diploma work is the study of concrete structures and the integration of fiber-optic sensors based on the research of modern world scientists. As a result of the work, the basic principles and requirements of the Brillouin method were considered. Based on the results obtained, the study of new aspects of optical communication cable was considered. Experimental work was carried out to obtain accurate information about the results. The research section discusses new Brillouin scattering results using the OptiSystem program.

## МАЗМҰНЫ

Кіріспе		
1	Оптикалық сенсорлардың дамуы	8
1.1	Оптикалық талшықтың шашырау түрлері және сенсорлар	10
1.2	Бетон конструкцияларының деформациясымен күресу әдістері	9
1.3	Бриллюэн әдісінің негізгі принциптері мен тарихы	10
1.4	Әдістің физикалық принциптері	12
2	Бриллюэн әдісінің мүмкіндіктері мен шектеулері	14
2.1	Деформацияны бағалау үшін математикалық модельдеу	15
3	Бетон конструкцияларының деформациясын практикалық объектілердің мысалында бақылау	18
3.1	Бетонға негізделген Бриллюэн әдісінің артықшылықтары мен кемшіліктері	19
3.2	Құрылыста Бриллюэн әдісін қолдану бойынша практикалық ұсыныстар	20
3.3	OptiSystem бағдарламасы арқылы Бриллюэн әдісін модельдеу	21
4	Болашақ зерттеулер мен бағыттары	22
	Қорытынды	39
	Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	40



## КІРІСПЕ

Бетон конструкциялары заманауи құрылыстың ажырамас бөлігі болып табылады. Олар жоғары беріктік пен беріктікке ие, бірақ сонымен бірге деформацияның әртүрлі түрлеріне сезімтал. Бетон конструкцияларының деформацияларын бақылау маңызды міндет болып табылады, оны шешу ғимараттар мен құрылыстардың қауіпсіздігі мен сенімділігін қамтамасыз етеді.

Серпімді толқындардың әсерінен ортада жарықтың шашырау құбылысына негізделген Бриллюэн әдісі материалдардың механикалық қасиеттерін микроскопиялық деңгейде зерттеудің қуатты құралы болып табылады. Бұл әдіс материалдағы дыбыс жылдамдығын өлшеуге мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде оның серпімділік қасиеттері туралы ақпарат береді.

Бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін Бриллюэн әдісін қолдану құрылыс саласында жаңа мүмкіндіктер ашады. Бұл әдіс бетонның сапасын бұзбай тексеруге, оның деформациялану дәрежесін анықтауға және ықтимал ақауларды болжауға мүмкіндік береді.

Әлемдік ғалымдардың зерттеуі бойынша бетон конструкциясындағы коррозияның әсерінен иілу әсерін зерттеді. Қытай ғалымдарының зерттеуі бойынша жергілікті коррозиядан зақымдануының арқалықтардың майысуына әсерін талдап, беріктік сипаттамалары мен арқалықтардың қаттылығының төмендеу дәрежесі темірдің құрылымын бұзылу орнына байланысты екенін анықтады. Коррозиясы арқалықтардың шаршау мерзімін айтарлықтай қысқартуы мүмкін екенін көрсетті, ал ортаңғы аралық ауытқу шаршау циклдерінің бірдей саны үшін іс жүзінде өзгеріссіз қалады. Физикалық күш және т.б. статикалық жүктеме сынақтарын жүргізді. Темір арматурасының коррозия жылдамдығының жоғарылауымен арқалықтардың шаршау мерзімі азаяды, бұл сынғыш бұзылу режиміне әкеледі деп ұсынды. Сонымен қатар, тот басқан темір үзілу кезіндегі максималды созылу және аққыштық беріктігінің арақатынасы шаршау кернеуі деңгейінің жоғарылауымен төмендейтіні атап өтілген.

Осы тараптан қарайтын болсақ барлық артықшылықтар мен кемшіліктерге қарасақ, Бриллюэн әдісі құрылыс тәжірибесінде әлі кең тараған жоқ. Бұл осы тақырып бойынша жеткілікті зерттеулердің болмауына, сондай-ақ өлшеулерді жүргізуге қажетті жабдықтың жоғары құнына байланысты болуы мүмкін.

Осыған байланысты, бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін Бриллюэн әдісін зерттеу және қолдану ғылыми зерттеулердің өзекті және перспективалық бағыты болып табылады. Мұндай зерттеулердің нәтижелері бетон конструкцияларының қауіпсіздігі мен сенімділігін арттыруға, сондай-ақ оларды өндіру және пайдалану процестерін оңтайландыруға көмектеседі.

## 1 Оптикалық сенсорлардың дамуы

Соңғы онжылдықта талшықты-оптикалық технология телекоммуникацияда айтарлықтай өзгерістерге ұшырады, бұл алыс қашықтықтарда байланыс құралдарын тиімдірек және арзанырақ жасауға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, талшықты-оптикалық технология материалдарды дәл белгілеу және кесу, қуатты лазерлік сәулелену көздерін жасау, визуализация жүйелерін дамыту және жету қиын жерлерді жарықтандыру сияқты басқа салаларда қолдануды тапты. Мысалы, тіпті ғылыми-зерттеу зертханаларында жасанды шыршаларды жасау эксперименттерін көруге болады, бірақ олардың сыртқы түрі олардың эстетикалық тартымдылығына күмән тудыруы мүмкін.

Өнеркәсіпте автоматтандырылған бақылау және басқару жүйелерінің дамуымен температура, қысым, үдеу, ток сияқты физикалық параметрлерді өлшейтін сенсорларға сұраныс артуда. Бұл сенсорлардың дәл, сенімді, тұрақты, кедергілерге төзімді, берік және микроконтроллерлерді басқару жүйелеріне оңай біріктірілуі маңызды. Бұл әсіресе авиация, металлургия, автоэлектроника, жылу техникасы, энергетика, медициналық техника және қару-жарақ жүйелері сияқты салалар үшін маңызды. Осы тұрғыда талшықты-оптикалық сенсорлар (FOS) бірегей сипаттамаларымен ерекшеленеді.

Авиация, әскери және мамандандырылған техника саласында жаңа пайдалану және техникалық сипаттамаларды әзірлеу стратегиялық маңызды міндет болып табылады. Бұл саладағы негізгі бағыттар инновациялық материалдар мен технологияларды, оның ішінде «смарт» құрылымдарды, полимерлі композициялық материалдарды, пішінді есте сақтайтын материалдарды әзірлеу, сондай-ақ материалдар мен құрылымдардың қасиеттерін модельдеудің математикалық әдістерін қолдану болып табылады. Композиттік материалдарды, әсіресе авиация және ғарыш өнеркәсібінде, сондай-ақ құрылымдардың сенімділігін арттыру қажет басқа салаларда, мысалы, мұнай өндіруде және құрылыста пайдалану құрылымдардың денсаулығын бақылау міндетінің өзектілігін көрсетеді SHM технологиясы смарт материалдарды, соның ішінде бейімделгіш қасиеттері бар материалдарды пайдалану, сонымен қатар дизайндағы ақауларды анықтай алатын, оларға жауап беретін және тиісті ұсыныстар бере алатын жетілдірілген бақылау жүйелерін қажет етеді.

Мониторинг жүйесінің құрамдас бөліктері ретінде талшықты-оптикалық сенсорларды пайдалану ең перспективалы тәсілдердің бірі болып табылады. Классикалық сенсорлармен салыстырғанда талшықты-оптикалық сенсорлар бірқатар маңызды артықшылықтарға ие: салмағы аз, жоғары сезімталдық, электромагниттік үйлесімділік, желіге қосылу және мультиплекстеу мүмкіндігі, сондай-ақ полимерлі композиттік материалдардан (ПКМ) жасалған құрылымдармен үйлесімділік. Олар сонымен қатар деформацияны, қысымды, күшті, электр және магнит өрістерін, дыбыс пен дірілді, әртүрлі параметрлерді өлшеуге, сондай-ақ биологиялық молекулаларды, бактерияларды және басқа аспектілерді анықтауға қабілетті.

## 1.1 Оптикалық талшықтың шашырау түрлері және сенсорлар

Талшықты-оптикалық сенсорлардың бірнеше түрлерін қарастырып кетсек болады:

Интерферометрияға негізделген сенсорлар типтері: Мах-Цендер интерферометрі Фабри-Перо интерферометрі сонымен қатар Майкельсон интерферометрі және Саньяк интерферометрі.

Торлы негізіндегі сенсорлар типтеріне: Брэгг торы (FBG), Ұзақ мерзімді талшықты тор; Көлденең талшықты Брэгг торы.

Таратылған талшықты-оптикалық сенсорлар: Бриллюэн шашырауы, Раман шашырауы және Релей шашырауы жатады.

Таратылған талшықты-оптикалық сенсорлар таратылған зондтау әдісін пайдаланады, онда талшықты-оптикалық кабельдің өзі бөлінген сезгіш элемент, яғни сенсор ретінде әрекет етеді. Бұл әдіс қабылдау аппаратурасы арқылы анықталатын ынталандырылған Раман шашырауын анықтауға негізделген.



1.1-сурет – Талшықты-оптикалық сенсор жүйесі

Бөлінген сенсорды пайдаланған кезде, Релей шашырауын (OTDR) пайдаланатын оптикалық уақыт рефлексометриясы, Раман шашырауына (ROTDR) негізделген оптикалық уақыт рефлексометриясы және Бриллюэн шашырауына (BOTDR) негізделген оптикалық уақыт рефлексометриясы сияқты әртүрлі сигналдарды өңдеу әдістері қолданылады.

Бриллюэн шашырауы құбылысына негізделген (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry - BOTDR) әдісі басқа әдістердегі сияқты шашыраңқы жарықтың жиілігін талдау арқылы оптикалық талшықтың деформациясы мен температурасын бағалауға мүмкіндік береді.

## 1.2 Бетон конструкцияларының деформациясымен күресу әдістері

Құрылымдардағы ішкі механикалық жүктемелерді бақылау көбінесе талшықты-оптикалық сенсорлар арқылы жүзеге асырылады, бұл әдеттегі тәжірибе. Талшықты Брэгг торларына негізделген сенсорлар қазіргі уақытта ең қолжетімді болып табылады. Олардың жұмыс істеу принципі деформация және температура сияқты сыртқы факторлардың әсерінен торлы кезенді өзгерту болып табылады. Деформацияны дәл бағалау үшін температураның өзгеруін

есепке алу қажет. Бұған қол жеткізу үшін әртүрлі әдістерді қолдануға болады, мысалы, штамм мен температураға жауап ретінде әртүрлі сипаттамаларға ие талшықты Брэгг торларын немесе сенсорларды пайдалану. Сенсордың бұл түрі көпірлер, бөгеттер, ғимараттар, құбырлар, мұнай және газ ұңғымалары және электр желілері сияқты әртүрлі құрылымдардың жағдайын бақылау үшін кеңінен қолданылады. Материалға ендірілген талшықты Брэгг торлы сенсорларын пайдалану белгілі бір қиындықтарды тудырады, әсіресе нәтижесінде алынған тор деформациясы осьтік және радиалды құрамдастарды қамтиды.

Қалыпты жұмыс жағдайында, егер жүктеме жобалық мәндерден аспаса, бетон қоспасының құрылымы тұрақты болып қалады. Жүктемелердің жоғарылауы микрожарықтардың пайда болуына әкелуі мүмкін. Бұл микрожарықтарға әртүрлі факторлардың әсері пластикалық деформацияны тудыруы мүмкін, бұл ақыр соңында құрылымның бұзылуына әкелуі мүмкін.

Темір арматуралы оның бетонмен арасындағы теңдестірілген жүктемені бөлу арматураны бірге бетон қоспасының деформациясы мәселелерін шешуге көмектеседі. Жобалау процесінде бұл бетон құрылымы бойынша кернеудің таралуын дәл анықтауға мүмкіндік береді.

Деформацияны тудыруы мүмкін бірнеше факторлар бар, соның ішінде ылғалдылық пен температураның өзгеруі, сондай-ақ динамикалық және статикалық жүктемелердің тұтастай құрылымға әсері. Сонымен қатар, материалдың қатаю процесі деформацияның пайда болуына ықпал етеді.

Темір бетон конструкцияларының әдетте рұқсат етілген кернеулерге негізделмейді, өйткені бетондағы кернеу мен деформация арасындағы байланыс сызықты емес. Сондықтан олар шекті күйлерді ескере отырып жобаланады, мұнда қысу аймағындағы кернеулер шекті мәндерге тең деп есептеледі, ал кернеу аймағында. Егер жарықтар болса, арматураның коррозиясын болдырмау шаралары қабылданған жағдайда ғана рұқсат етіледі. Бетондағы жарықшақтың ұшына жақын жерде бұзылу критерийін анықтауға болады:

$$\frac{\delta}{d} = 8(1 - \nu^2) \frac{R_{bt}}{E_b}, \quad (1.1)$$

осы жерде,  $E_b$  - Бетонның серпімділігі;

$\delta$  – ұзындығына байланысты  $d$  болатын микро немесе макро жарылу;

Осыған байланысты  $\delta/d = tg\varphi$ , мұндағы  $\varphi$  созылу кернеуі диаграммасының көлбеу бұрышы болады. Ал осыған сәйкес арматура коэффициенті былай анықталады:

$$\mu = \frac{A_s}{(n-a)_b}, \quad (1.2)$$

осы жерде,  $A_s$  – арматураның көлемі;

$\delta$  – қиманың қалыңдығы;

$n$  – биіктігі;

$a$  – анықтау жағдайы;

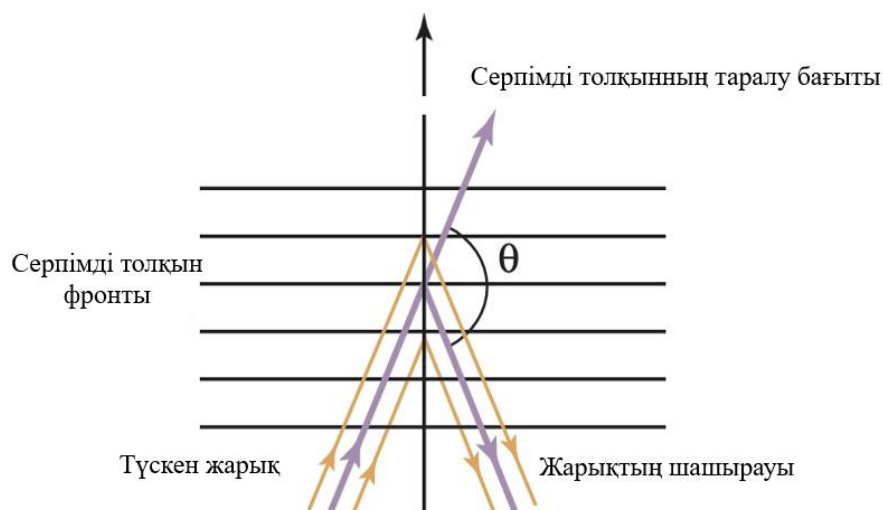
$$a \geq \left[ \frac{1+(d_s/2a)^2}{1-(d_s/2a)^2} \nu_s \frac{E_B N}{E_S R_{Bt}} \right], \quad (1.3)$$

мұндағы,  $d_s$  – арматураның диаметрі;  
 $\nu$  – Пуассондық бетон коэффициенті;  
 $E_s$  – арматураның беріктігі.

### 1.3 Бриллюэн әдісінің негізгі принциптері мен тарихы

Конденсацияланған ортаның тығыздығының адиабаталық ауытқуы нәтижесінде олардың жиілігі өзгертін жарық толқындарының шашырауы Мандельштам - Бриллюэн шашырауы деп аталады. Түскен және шашыраңқы толқындардың жиіліктерінің айырмашылығы ортадағы жылу серпімді толқындардың жиілігіне байланысты. Бұл әсерді Л.И.Мандельштам 1918 жылы мен Л. Бриллюэн 1922 жылы бір-бірінен тәуелсіз болжап, Г.С.Ландсберг пен Мандельштам кристалдарда және сұйықтықтарда Э.Ф.Гросс тәжірибе жүзінде ашты.

Мандельштам-Бриллюэннің классикалық интерпретациясы молекулалардың хаотикалық жылулық қозғалысы нәтижесінде ортада пайда болатын тығыздық тербелістерін кездейсоқ амплитудалары мен фазалары бар және барлық мүмкін бағыттарда таралатын әртүрлі жиіліктегі серпімді толқындардың суперпозициясы (интерференциясы) нәтижесінде көрсетуге болады. Әрбір серпімді толқын дыбыс жылдамдығымен таралатын дифракциялық торды құра отырып, ортаның диэлектрлік өтімділігін модуляциялайды. Бұл тығыздығы жоғары жерлерде сыну көрсеткіші сирек кездесетін аймақтарға қарағанда жоғары болғандықтан орын алады. Мұндай торда жиілігі  $\omega$  және толқын векторы  $k$  болатын жазық жарық толқынының дифракциясы түскен толқынға бұрышпен таралатын және жиілігі  $\omega$ -ден өзгеше шашыраған толқынның пайда болуына әкеледі (1.2-сурет).



1.2-сурет – Жарықтың серпімді толқынға шашырауы

Бриллюэннің шашырауы тіпті төмен оптикалық қуатта да орын алуы мүмкін, бұл жылу өрісінің фотондарының кездейсоқ пайда болуын тудырады. Жоғары оптикалық қуаттарда бұл әсерді активті етуге болады, яғни оптикалық өрістер фотондардың өндірісіне қатты әсер етеді. Белгілі бір қуат шегінен жоғары, ортаға бағытталған жарық сәулесі түскен сәуленің қуатының көп бөлігін көрсете алатын Бриллюэн шашырауын белсендіреді. Бұл процесс шағылысқан толқындардың күшті сызықты емес оптикалық күшейтуін қамтиды: бастапқыда әлсіз қарсы таралатын толқын дұрыс оптикалық жиілікпен айтарлықтай күшейтілуі мүмкін. Осылайша, екі қарсы таралатын толқын тордың ауыспалы сыну көрсеткішін жасайды. Шағылған толқынның күші неғұрлым жоғары болса, тордың сыну көрсеткіші соғұрлым жоғары болады және соның салдарынан шағылысу тиімділігі жоғары болады.

$$v_B = \frac{2nv_A}{\lambda}, \quad (1.4)$$

Бриллюэн жиілігінің ығысуы материалдың белгілі бір дәрежеде қоршаған ортаның температурасы мен қысымымен анықталады. Бұл қасиет талшықты-оптикалық сенсорларда қолданылады. Бриллюэн активті шашырауының тағы бір маңызды қолданбасы оптикалық фазалық құлыптау болып табылады.

Оптикалық күшейткіште тар жолақты оптикалық сигнал күшейтілгенде немесе пассивті талшықтар бойымен таралатын кезде активті Бриллюэн шашырауы жиі байқалады. Сызықты емес коэффициенттердің, мысалы, кварцта, өте жоғары емес екеніне қарамастан, бұл материал, әдетте, шағын тиімді көлденең режим аймағына және ұзын таралу ұзындығына ие, бұл сызықты емес әсерлердің пайда болуына ықпал етеді. Кварц талшықтары үшін Бриллюэн жиілігінің ығысуы шамамен 10-20 ГГц құрайды. Әдетте, Бриллюэн күшейту 50-100 МГц өткізу жолағына тән, ол күшті акустикалық сіңірумен фотонның төмен қызмет ету мерзімі анықталады. Бриллюэн спектрінің күшеюі жарықтың

көлденең фазалық жылдамдықтарының айырмашылығы акустикалық фазалық жылдамдықтар немесе температураның өзгеруі сияқты әртүрлі әсерлер арқылы ұлыңғырлануы мүмкін. Тиісінше, жоғары ынталандырылған Бриллюэн шашырау шегінің арқасында максималды кірісті айтарлықтай азайтуға болады.

Тар жолақты үздіксіз толқынды жарық сигналы үшін оптикалық талшықтардағы Бриллюэн шегі әдетте шамамен 90 дБ сәйкес келеді. Бұл шекті белсенді талшықтардағы қосымша лазерлік күшейту арқылы төмендетуге болады. Ультра қысқа импульстарды генерациялау кезінде ынталандырылған Бриллюэн шашырау шегі ең жоғары қуатпен емес, сипатталған қуат спектрлік тығыздығымен анықталады.

Активті Бриллюэн шашырауы - талшықтағы тар жолақты оптикалық сигналды күшейту немесе пассивті тарату үшін қуатты қатаң шектеу. Бриллюэн шегін арттыру үшін радиация өткізу жолағын арттыруға және күшейту жолағынан шығуға, талшық ұзындығын азайтуға, әртүрлі жиілік ығысулары бар талшықтарды біріктіруге немесе жоғары қуатты талшықты құрылғылар үшін бойлық температураның өзгеруін қолдануға болады. Сондай-ақ, негізгі оптикалық және акустикалық толқындардың қабаттасуын азайтуға немесе акустикалық толқынның жолында айтарлықтай жоғалтуларды жасауға болады. Белгілі бір дәрежеде ынталандырылған Бриллюэн шашырау проблемаларын негізгі күшейткіштің өзгеруі арқылы азайтуға болады, мысалы, қосымша режимнің көлденең қимасының ауданын өзгерту немесе таралу бағытын өзгерту.

Екінші жағынан, күшейткіштің талшықты лазерін басқару үшін пайдалануға болады. Мұндай құрылғылар жиі сақиналы резонаторы бар лазер ретінде жүзеге асырылады. Төмен қуыс шығындарына байланысты олар салыстырмалы түрде төмен өте тар спектрлік сызыққа ие болуы мүмкін.

#### **1.4 Әдістің физикалық принциптері**

Дипольдық және молекулалық шашырау Бриллюэн шашырауының негізінде жатқан негізгі физикалық механизмдер болып табылады. Дипольдық шашырауда жарықтың электромагниттік өрісі ортадағы бөлшектердің зарядтарында тербеліс тудырады, бұл барлық бағытта екінші реттік электромагниттік толқындардың шығуына әкеледі. Бұл толқындар шашыраңқы жарықты құрайды. Молекулалық шашырауда шашырау ортасының дипольдік моменттері болады, олар сыртқы электромагниттік өрістің әсерінен өзгеруі мүмкін.

Бриллюэн шашырауының маңызды сипаттамаларының бірі шашыраған жарықтың толқын ұзындығының түскен сәулелің толқын ұзындығына тәуелділігі болып табылады. Толқын санының ығысуы немесе Раманның ығысуы деп аталатын бұл әсер оң стокс ығысуы немесе теріс антистокс болуы мүмкін. Стокс ығысуы шашырау ортасының сәулелену энергиясын жұтуына, ал антистокс ығысуы энергияның ортадан сәулеленуге ауысуына сәйкес келеді.

Стокс шашырауы:

Стокстың шашырауы радиациялық энергияны шашырау ортасына жұтқанда пайда болады. Бұл жағдайда шашыраған жарықтың интенсивтілігінің формуласы:

$$I_s = I_i \times |x_s(\omega)|^2 \quad (1.5)$$

мұндағы,  $I_s$  – стокстың шашыраған сәулесінің қарқындылығы,  $I_i$  - түскен жарықтың қарқындылығы,  $x_s(\omega)$  - стокс шашырауы үшін ортаның статикалық поляризациялануы.

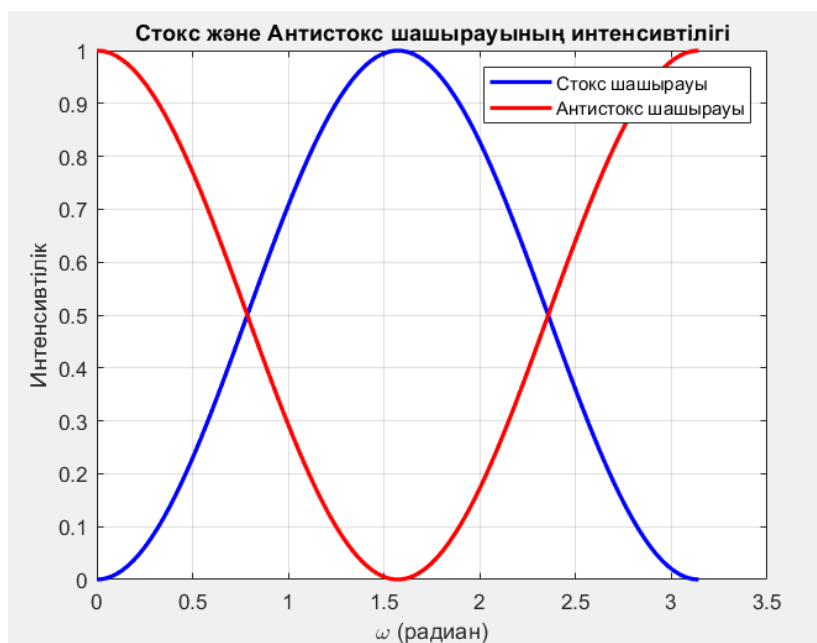
Антистокс шашырауы:

Антистокс шашырауы энергия шашырау ортасынан сәулеленуге ауысқанда пайда болады. Бұл жағдайда шашыраған жарықтың интенсивтілігінің формуласы:

$$I_{as} = I_i \times |x_{as}(\omega)|^2 \quad (1.6)$$

мұндағы,  $I_{as}$  – антистокстың шашыраған сәулесінің қарқындылығы,  $I_i$  - түскен жарықтың қарқындылығы,  $x_{as}(\omega)$  - антистокс шашырауы үшін ортаның статикалық поляризациялануы.

Осылайша, Бриллюэн шашырауы өзінің бірегей физикалық негізі қуатты интенсивтілігінің радианға қатысын келесі графиктен байқай аламыз, яғни бұл аналитикалық процесс болып табылады.



1.3-сурет – Стокс және Антистокс шашырауының интенсивтілігі



## 2 Бриллюэн әдісінің мүмкіндіктері мен шектеулері

Бриллюэн шашырауы әртүрлі салаларында қолданбалы қуатты талдау әдісі болып табылады.

Бриллюэн әдісінің мүмкіндіктері:

Бриллюэн шашырауы заттардың молекулалық құрылымы мен құрамын, оның ішінде органикалық және бейорганикалық қосылыстарды, полимерлер, биомолекулалар және т.б. зерттеуге мүмкіндік береді. Бұл әдісті молекулалардағы байланыс түрлерін анықтау үшін қолдануға болады. Молекулалардың конформациясы, қоспалардағы әртүрлі компоненттердің концентрациясы.

Фазалық ауысуларды зерттеу Бриллюэн шашырауы фазалық ауысуларды және температура, қысым және т.б. сияқты сыртқы жағдайлардың әсерінен материалдың құрылымындағы өзгерістерді бақылауға мүмкіндік береді. Бұл материалдардың физикалық және химиялық қасиеттерін түсіну үшін маңызды.

Биомедициналық диагностика Бриллюэн шашырауы биологиялық жасушаларды және сұйықтықтарды талдау үшін қолданылады. Бұл белоктардың, липидтердің, нуклеин қышқылдарының және басқа да биомолекулалардың құрылымын зерттеуге мүмкіндік береді, бұл ауруларды диагностикалау және бақылау үшін маңызды.

Нақты уақыттағы көру Бриллюэн шашырауын нақты уақытта процестердің динамикасын зерттеу үшін қарастырсақ болады. Бұл химиялық реакциялар, диффузия және т.б. сияқты жылдам физикалық және химиялық процестерді бақылауға мүмкіндік алады.

Шектеулер:

Төмен сезімталдық байланысты флуоресценттік спектроскопия немесе масс-спектрометрия сияқты кейбір басқа аналитикалық әдістермен салыстырғанда Бриллюэн шашырауының сезімталдығы салыстырмалы түрде төмен. Бұл сұйылтылған немесе төмен концентрациялы үлгілерді талдау кезінде қиындық тудырады.

Үлгі гетерогенділігі біртекті еместердің болуы шашыраңқы спектрде бұрмалануларға әкелуі мүмкін, бұл нәтижелерді түсіндіруді қиындатады.

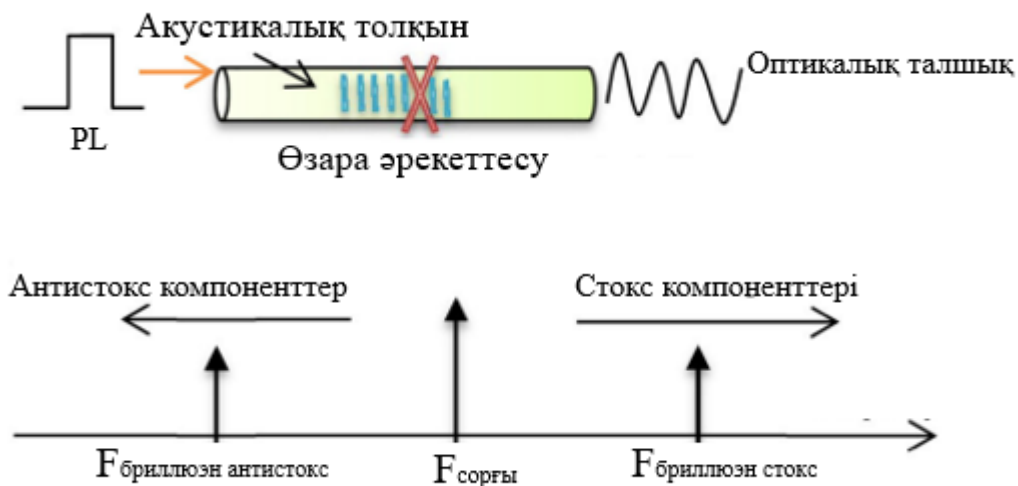
Бриллюэн шашырауы күрделі жабдықты қажет етеді оны басқару және деректерді түсіндіру үшін арнайы жабдық пен жоғары оқытылған қызметкерлерді қажет етеді. Бұл әдістің кейбір зертханаларда немесе мекемелерде қолжетімділігін шектетіледі.

Бриллюэн шашырауы шектеулері үлгілер мен заттардың барлық түрлеріне жарамайды. Мысалы, көптеген сұйық және газ үлгілері талдау үшін арнайы ұяшықты немесе кюветаны қажет етеді, бұл тәжірибені қиындатады.

Әлем зерттеушілері жаңа апаттардың пайда болу проблемасына басты назарда ұстайды. Бұл жүйе үшін Бриллюэн сенсорлары температура мен қысымды бір уақытта бақылау үшін қолданылады. Қоршаған ортадағы температура мен қысымның өзгеруіне байланысты кез келген ықтимал апаттарды болжауға және бағалауға қабілетті жүйені қарастырады. Біз қысымды, деформацияны және температураны бақылау үшін бөлінген оптикалық

Бриллюэн сенсорын және гибриді жергілікті оптикалық уақытты бөлу Бриллюэн талдауын (BOTDA) пайдалануды ұсынады. Оптикалық сенсорларды пайдаланып бір мезгілде өлшеу принципін талқылаймыз, содан кейін осы сенсорлардың қасиеттерін теориялық нәтижелермен тексереміз. Табиғи апаттарды және су тасқыны, өрт, жер сілкінісі және көшкін сияқты апаттардың әртүрлі түрлерін анықтауға арналған жүйені қарастырамыз. Бриллюэн оптикалық сенсорларының, әсіресе Бриллюэн оптикалық уақытты бөлу сенсорларының (BOTDR) және BOTDA ғылыми принциптерін енгіземіз. Температураның, қысымның және деформацияның бір уақыттағы өзгерістерін анықтау үшін BOTDA қолданамыз.

Әдеттегі бекіткіштерді анықтау қабілетімізді жақсарту үшін біз Бриллюэн сенсорларын қолданамыз. Әсіресе халықаралық аймақтарда жойылу мен қорғау элементтерін болдырмаудың бірнеше тәсілдері қабылданды. Мысалы үлкен тереңдіктегі апаттарды анықтау үшін пайдаланылатын инновациялық жерге енетін радиолокациялық жүйе сипаттауға болады. Өздігінен бекітпелердің әзірленген жүйесі жерасты жағдайында пайдалануға бейімделген, бұл үлкен тереңдікте қауіпті анықтауға және кеншілердің жұмысы кезінде қауіпсіздікті қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Бұл тәсілдер жер сілкінісі мен бұзылуларды және олардың зақымдалуын бақылау үшін қолданылады. Оптикалық сенсорлар жер сілкінісі мен көшкіндерді анықтауда жақсы нәтиже береді. Сондықтан апат жүйелерін, әсіресе адамдар қауіпті аймақтарда пайдалану керек. Оптикалық сенсорлардың электрлік және импульстік сенсорларға қарағанда бірқатар артықшылықтары бар, олардың ішінде жинақылық, пассивті жұмыс, электромагниттік импульсті, шуға төзімділік, тиімді және т.б.

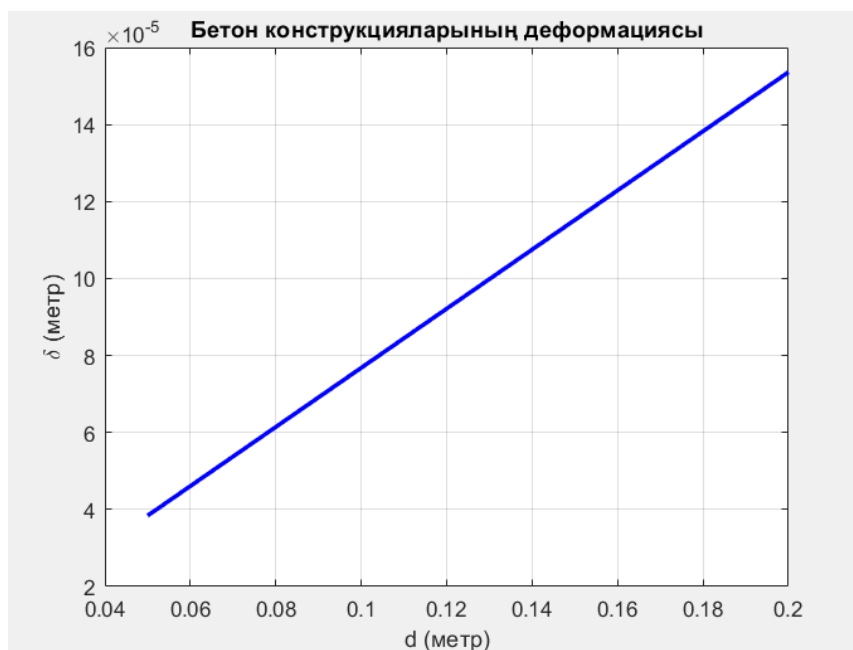


2.1-сурет – Кездейсоқ Бриллюэн шашырау схемасы

## 2.1 Деформацияны бағалау үшін математикалық модельдеу

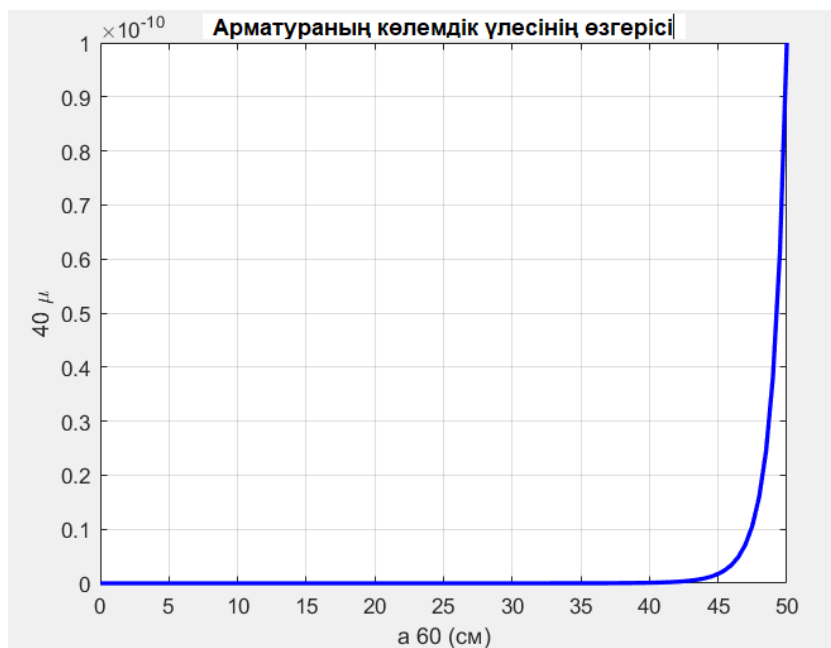
Матлабда бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін жоғарыда аталған (1.1) теңдеу бойынша график құру үшін толық ақпараттарды жазып қарастырамыз. Бұл графиктен біз  $d$  параметрінің ауқымын өзгертіп, соған сәйкес  $\delta$  мәндерін есептейміз және мәнін шығарамыз.

$E_B = 30$  ГПа,  $\nu = 0.2$ ,  $R_{Bt} = 3$  МПа, және  $d = 0.1$  м. Бұл параметрлерді пайдаланып,  $\delta$  қандай өзгерістерге ұшырағанын график арқылы көрсете аламыз.



2.2-сурет – Деформация ұзындығына байланысты болатын микро немесе макро жарылу

Бетонның деформациясына байланысты пайда болатын микро және макро жарылулары бұл материалдың ішкі құрылымының өзгеруіне байланысты туындайтын феномендер. Бұл жарылулардың пайда болуы материалдың механикалық күштерге немесе табиғат жағдайынан туындайтын бетон құрылымдарының ішкі және сыртқы төзімділігіне үлкен әсер етеді және олардың түсіндірілуі өте маңызды.



2.3-сурет – Бетонға интеграцияланған арматураның көлемдік үлесінің өзгерісі

Бұл график эксперименттік модельге байланысты арматураға бойынша  $a$  анықтау жағдайының өзгеруіне байланысты  $\mu$  көлемдік үлесінің қалай өзгертетінін көре аламыз. Қалыңдығы биіктікпен бірдей болған жағдайда  $\mu$  мәні жылдам азаяды, бұл арматураның көлемдік үлесі өте сезімтал екенін көрсетеді.

### 3 Бетон конструкцияларының деформациясын практикалық объектілердің мысалында бақылау

Бетон бүгінде тұрғын үйлердің де, инфрақұрылымдық нысандардың да құрылысында маңызды рөл атқарады. Оның коррозияға жоғары төзімділігі маңызды артықшылық болып табылады, өйткені ол бетон жабынының қолданылуын минимумға дейін азайтуға мүмкіндік береді, негізінен тек адгезия талаптарымен шектеледі. Темір конструкцияларның беріктігін қамтамасыз ету маңызды, бетон үшін бұл жағдай маңызды емес. Бұл құрылыс мүмкіндіктерін кеңейтіп, тегіс және иілген жұқа элементтер мен құрылымдарды жасауға мүмкіндік береді. Бұл ғимараттардың эстетикалық көрінісін жақсартып қана қоймайды, сонымен қатар тұрақты дизайн стратегияларында маңызды рөл атқаратын материалды тұтынуды айтарлықтай азайтады. Дегенмен, бетон жамылғысын азайту кезінде оның беріктігі мен беріктігін қамтамасыз ету үшін оның ішінде арматураның дәл орналасуын қамтамасыз ету маңызды.



3.1-сурет – Монолитті құрылыс кешені

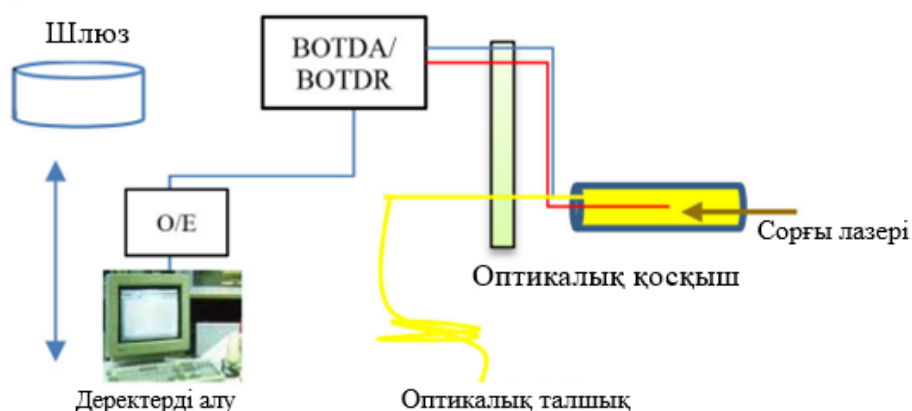
Монолитті бетон - бұл нақты жобаға қажетті пішін мен құрылымды жасау үшін бетон қоспасын қалыпқа құю арқылы тікелей жасалған құрылыс материалы. Бетон табиғи орта жағдайында орнында қатып қалады және оны тасымалдаудың қажеті жоқ. Сол себепті табиғи апаттық жағдайларда барынша тұрғын үйлерді бастысы адам өміріне қауіп төндірмейтіндей жағдай жасау қажетті болып табылады.

Көп ғалымдардың басты мәселесі табиғи апаттардан келген жағдайларды алдын алу мәселесін басты назарда ұстайды. Осы тектес оптикалық талшықты сенсорларды құрылыс саласында қолдану оларға қойылатын талаптарға сәйкес келетін сенсорлар бірнеше сенсорлар жүйелері қалыптастырылған. Сенсорларға қойылатын талаптар экономикалық жағынан тиімді болуы, жеңіл салмақ, орналастыру жағынан ыңғайлы болуы шарт.

Осыған сәйкес Бриллюэн шашырау эффектісін пайдаланатын оптикалық Бриллюэн сенсоры оптикалық талшық бойындағы температура, діріл және деформация сияқты әртүрлі параметрлерді бақылау және анықтау мүмкіндігіне ие. Бұл әсер оптикалық талшықтағы фотондар арасындағы өзара әрекеттесу нәтижесінде пайда болады, бұл фотондық ығысу деп аталатын жиілік ығысуын тудырады. Фотондық сәулелену сорғы сигналының бағытымен салыстырғанда карама-қарсы бағытта таралады. Фотонның ауытқуы оптикалық талшықтың температурасы мен деформациясына байланысты. Сигналды дұрыс модуляциялау арқылы бөлінген сенсорды жасауға болады. Сигнал әдетте әлсіз болғандықтан, кері шашырау BFS спектрі екі стокс және антистоксқа қарсы компоненттер арасында орын алады.

Екі белгілі оптикалық Бриллюэн сенсорлары бар. Біріншісі - Бриллюэн оптикалық уақыт доменінің рефлектометрі (BOTDR). Бриллюэн шашырау эффектісі арқасында BOTDR штамм мен температураны өлшей алады. Екіншісі - BOTDA. Ол активті Бриллюэн шашырауын пайдаланады. Сондықтан, BOTDR немесе BOTDA еркін талшық бөліктері бойынша бөлінген деформация мен температураны бақылау үшін пайдаланылуы мүмкін. Деформация және температура арасындағы сызықтық байланыс келесідей жеңілдетілген.

BOTDA жүйесі ұзақ мерзімді температураның өзгеруі мен деформациясын болжау үшін қолданылады. Бұл жүйелерде сорғы мен зонд толқындарының көмегімен сыну көрсеткішінің сызықты емес өзгерісін анықтайды. BOTDA кернеу мен температураның өзгеруін анықтай алатын электро-оптикалық модулятормен жабдықталған. BOTDA Бриллюэн шашырау құбылысының модельдеуін пайдаланады және сорғы лазері арқылы зондтау әдісі болып табылады.



3.2-сурет – Бриллюэн шашырау BOTDA және BOTDR эффектісі бар оптикалық жалпы схема

BOTDA негізіндегі сенсорлық жүйе мүмкін апаттардың алдын алу үшін температура мен кернеудің өзгеруін бақылау үшін қолданылады. Сезімдеу негізінен температураның немесе дірілдің кенеттен өзгеруін анықтау үшін

талшықты бетонға біріктіруді қамтиды. Сорғы сигналы мен деректерді алу сигналы арасындағы жиілік айырмашылығын бақылау керек, бұл әр жолы талданатын Бриллюэн спектрін жаңғыртуға мүмкіндік береді. BOTDR сенсорының жиілік ауытқуы оптикалық талшықтағы жергілікті температура мен кернеуге байланысты.

### **3.1 Бетонға негізделген Бриллюэн әдісінің артықшылықтары мен кемшіліктері**

Бриллюэн әдісінің басқа әдістерімен негізгі артықшылықтарын қарастыратын болсақ ол зақымдануды ерте анықтау. Бриллюэн әдісін бетонға енгізудің негізгі артықшылықтарының бірі оның құрылымдағы ықтимал зақымдануды немесе деформацияны ерте анықтау мүмкіндігі болып табылады. Бұл жағдайдың нашарлауына жол бермеу және уақытында жөндеу жұмыстарын жүргізу үшін шаралар қабылдауға мүмкіндік береді, ғимараттың жалпы ұзақ мерзімділігі мен қауіпсіздігіне ықпал етеді.

Осынған байланысты ғимараттардың ұзақ мерзімді бақылау кезіндегі Бриллюэн сенсорлары бетон конструкцияларының жағдайын үздіксіз және ұзақ мерзімді бақылауды қамтамасыз етеді. Бұл қоршаған орта параметрлерінің немесе құрылымның өзінде болмашы өзгерістерді тіркеуге мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде проблемаларды ерте анықтауға және елеулі зақымдануды болдырмау жолдарынға мәселелерді шешеді.

Бриллюэн сенсорлары бетон конструкцияларда негізделген сенсорлар өте жоғары сезімталдыққа ие. Бриллюэн әдісі температураның, деформацияның және басқа параметрлердің өзгеруіне өте сезімтал, бұл тіпті ең кішкентай ауытқуларды анықтауға өте ыңғайлы етеді. Бұл қиын жағдайлардың дамуын болдырмауға және жазатайым оқиғалардың қаупін азайтуға көмектеседі. Ал бұл тек артықшылық жағдайларымен қатар біршама кемшіліктерін байқай аламыз.

Бриллюэн әдісінің басқа әдістерімен негізгі кемшіліктеріне тоқталсақ, орнату және күту қиын. Бетонға Бриллюэн сенсорларын орнату және техникалық қызмет көрсету күрделі және экономикалық жағынан қымбат процесс болуы арнайы жабдық пен дағдыларды қажет етуін талап етеді. Сигналды тарату барысында жоғары шығындардың болуы. Бриллюэн сенсорлары жоғары технологиялары мен арнайы сипаттамаларына байланысты басқа бақылау әдістеріне қарағанда орнату және қызмет көрсету қымбатырақ болуы.

Байланыс талаптарына сай шектеулі дәлдік пен толық ақпараттың бермеуі басты мәселесі болып табылады. Оптикалық талшық ұзындығы, қоршаған орта жағдайлары және жабдықтың техникалық шектеулері сияқты бірнеше факторлар өлшемдердің дәлдігі мен сенімділігіне әсер етуі мүмкін. Оңтайлы нәтижелерге қол жеткізу үшін жабдықты жиі калибрлеу және реттеу қажеттілігін талап етеді.

### 3.2 Құрылыста Бриллюэн әдісін қолдану бойынша практикалық ұсыныстар

VOTDR нысандардағы деформацияны, температураны және қысымды өзгертуді бағалау үшін қолданылады. Бұл әдіс дәйекті деп саналады, себебі ол бөлінген жарықтың шашырауына негізделген. Оның мәні талшық фотондармен әрекеттескенде брилуеннің шашырауы пайда болады. Осылайша, VOTDR бір импульстің кездейсоқ Бриллюэн шашырауына негізделген, шашыраңқы жарықтың аз ғана бөлігі. Сондықтан VOTDR сигнал қарқындылығы VOTDA жүйесіне қарағанда сезімталырақ, себебі VOTDA сигналды күшейтетін активті Бриллюэн шашырауын пайдаланады. Ол келесідей формула бойынша есептеледі:

$$\vartheta_B = \frac{2\eta\vartheta_a}{\lambda_p}, \quad (3.1)$$

мұндағы  $\eta$  – сыну көрсеткіші;

$\lambda_p$  – сорғы толқынның ұзындығы;

$\vartheta_a$  – акустикалық жылдамдық.

Оптикалық сенсорлар әдетте бірнеше сантиметрді ғана қамтитын шектеулі өлшеу аймағына ие. Дегенмен, Бриллюэн шашырауын қолданатын бөлінген зондтау технологиясы (DST) ұзақ қашықтықтағы апаттарды бақылау үшін тиімдірек болып саналады. VOTDA және VOTDR көмегімен біз бір уақытта талшықты-оптикалық кабель бойымен температура мен кернеуді өлшей аламыз, бұл VOTDA мен VOTDR арасындағы салыстыруға мүмкіндік береді.

VOTDA және VOTDR сияқты оптикалық Бриллюэн сенсорларының екі түрін салыстыруды олардың функционалдығы, қолданбалары және сипаттамалары негізінде жасауға болады:

Функционалдык:

VOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) талшықты-оптикалық кабель бойындағы температура мен кернеуді өлшеу үшін қолданылады. Ол қысымның өзгеруін де анықтай алады.

VOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) сонымен қатар талшықты-оптикалық кабель бойымен температура мен кернеуді өлшеуге арналған, бірақ оның негізгі функциясы шағылысқан сигналдарды талдау болып табылады.

Қолдану саласы:

VOTDA әдетте инфрақұрылымды бақылау немесе табиғи апаттарды анықтау сияқты ұзақ қашықтықтарда жоғары сезімталдық пен өлшеу дәлдігін қажет ететін қолданбаларда қолданылады.

VOTDR байланыс желілерін бақылау немесе кабельдердегі ақауларды анықтау сияқты талшықты-оптикалық желілердегі өзгерістерді жылдам анықтауды және локализациялауды қажет ететін қолданбаларда жиі қолданылады.

Сипаттамалары бойынша:



BOTDA әдетте BOTDR-мен салыстырғанда жоғары сезімталдық пен ажыратымдылыққа ие. Дегенмен, бұл күрделірек деректерді өңдеумен және жоғары аппараттық шығындары бар.

BOTDR, екінші жағынан, байланыс желілерін бақылау немесе талшықты-оптикалық кабельдердегі ағып кету нүктелерін анықтау сияқты белгілі бір пайдалану жағдайларында жылдамырақ және дәлірек нәтижелерді қамтамасыз ете алады.

Кесте 3.1 - BOTDA және BOTDR негізгі сипаттамалары

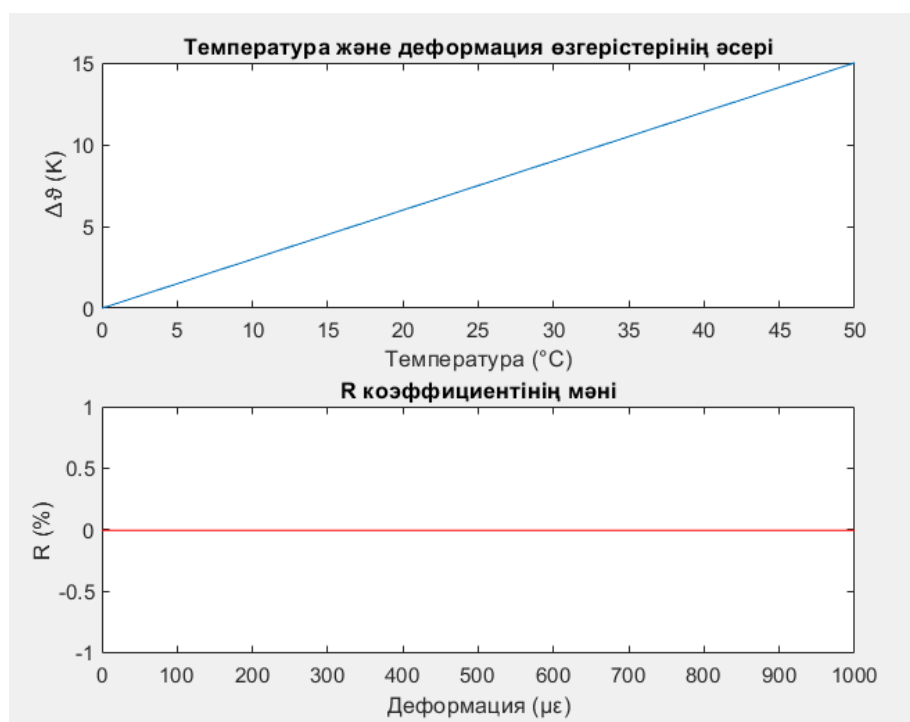
	BOTDA	BOTDR
Уақыт бойынша	2-5 минут	1-2 секунд
Температура	3-4 °C	0,1 °C
Максималды температура	500 °C	2100 °C
Анықтау аймағы	когеренттік	тікелей
Бриллюэн шашырауы бойынша	кездейсоқ	активті
Максималды қамтамасыз ету талшық ұзындығы	60-70 км	150-160 км
Температура және деформация	Мультимодалы	Мультимодалы және бірмодалы

Экспериментті бастау үшін біз активті өзгерісін шығару BFS әдісін қолданамыз. Бірінші кезеңде 25°C бекітілген температурада 520-дан 2250 мкс-қа дейінгі деформация диапазонында BFS өзгерістерін тіркейміз. BFS өзгерістерінің айқын болатынын және деформациядан гөрі температураның өзгеруіне көбірек тәуелді екенін ескереміз. BOTDA сенсорларын пайдаланғаннан кейін, BFS қосылғанда, келесі теңдеулермен анықталатын температура мен деформацияның өзгеруі орын алады:

$$\Delta\vartheta(T, \varepsilon) = C_T T + C_\varepsilon \varepsilon, \quad (3.2)$$

$$R = C_{p\varepsilon} \times C_{\vartheta\varepsilon} - C_{\vartheta T} \times C_{\vartheta T}, \quad (3.3)$$

$$R = 0,329\% \text{ KMHz}/\mu\varepsilon, \quad (3.4)$$



3.3-сурет – Бриллюэн шашырау кезіндегі BFS әдісін бойынша температура мен деформацияның өзгеруі

Мұнда температураның өзгеруі әртүрлі деформация мәндерінде [100, 500 және 1000 мкс] 50°C аспайтыны атап өтілген. Біздің эксперименттеріміздің нәтижелері BOTDA жүйесі арқылы алынған, содан кейін бұл нәтижелер математикалық модельде қолданылады.

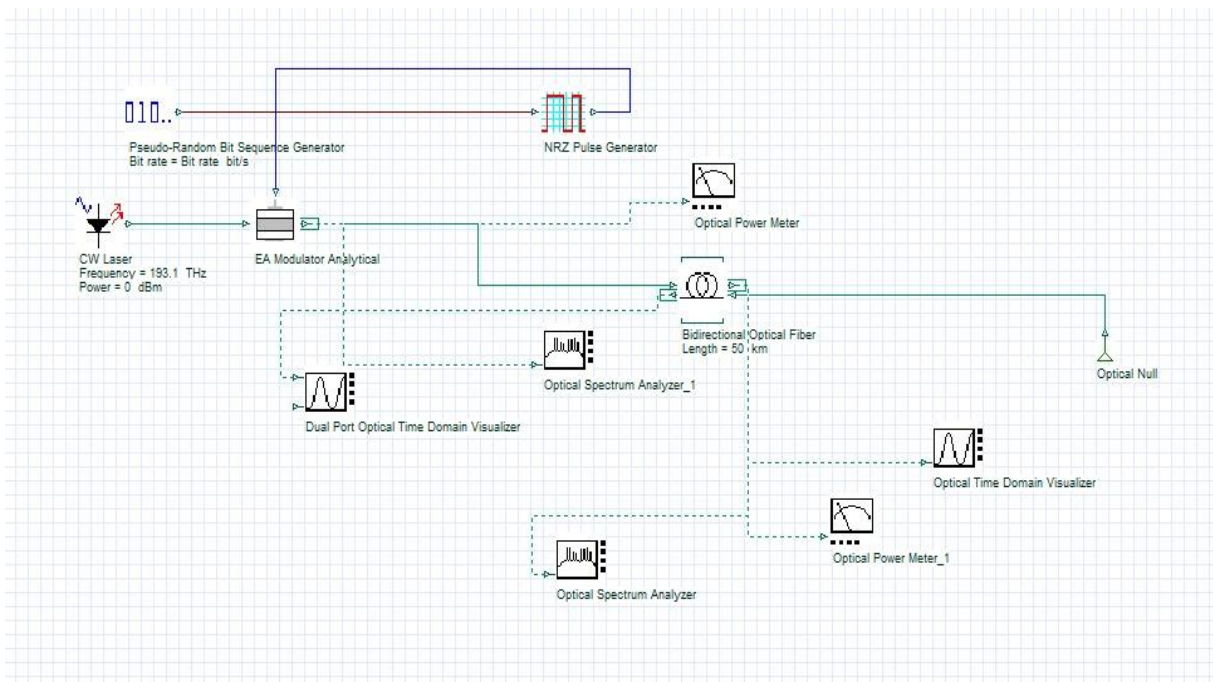
Келесі эксперименттік жұмысты жалғастыра отырып біз BOTDR жүйесін жобалап зерттеу болып табылады.

### 3.3 OptiSystem бағдарламасы арқылы Бриллюэн әдісін модельдеу

Бұл дипломдық жұмыста талдау бойынша оптикалық байланыс жүйелерін, сондай-ақ күрделілігіне қарамастан олардың жеке компоненттерін зерттеуге, жобалауға және модельдеуге мамандандырылған OptiSystem бағдарламасын Бриллюэн әдісін зерттеу болып табылады.

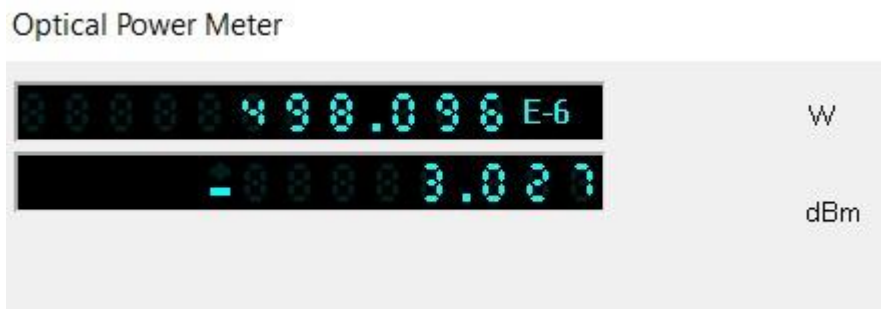
OptiSystem бағдарламасы қазірге уақыттағы оптикалық байланыс жүйесін модельдеу барысында алдыңғы орында келеді.

OptiSystem бағдарламасында Бриллюэн әдісін жобалау үшін бізге келесі элементтер жиынтығы қажет:

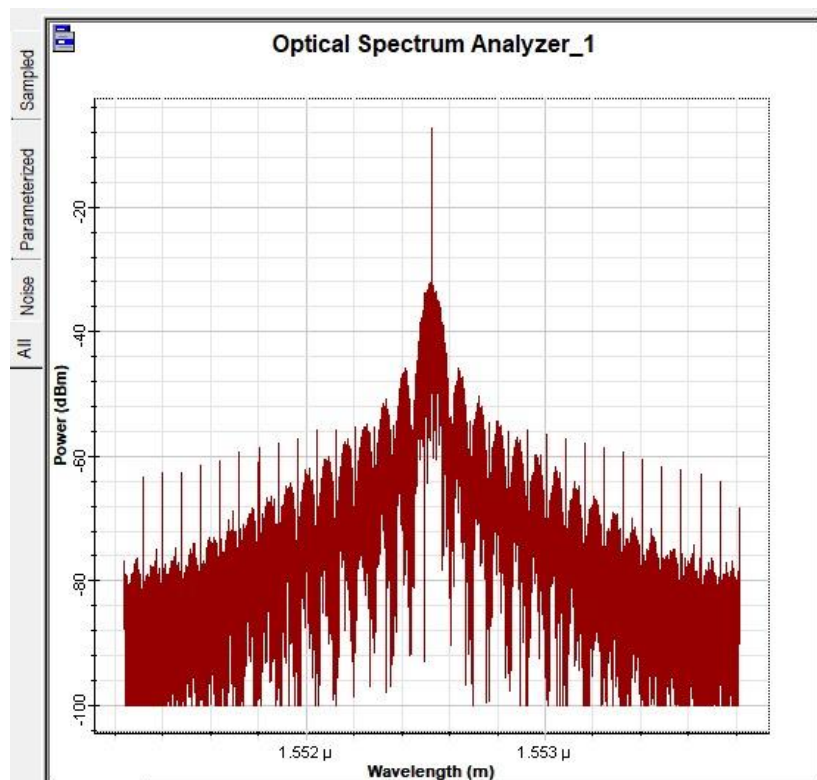


3.4-сурет – Бриллюэн шашырау кезіндегі BOTDA әдісі бойынша зерделеу

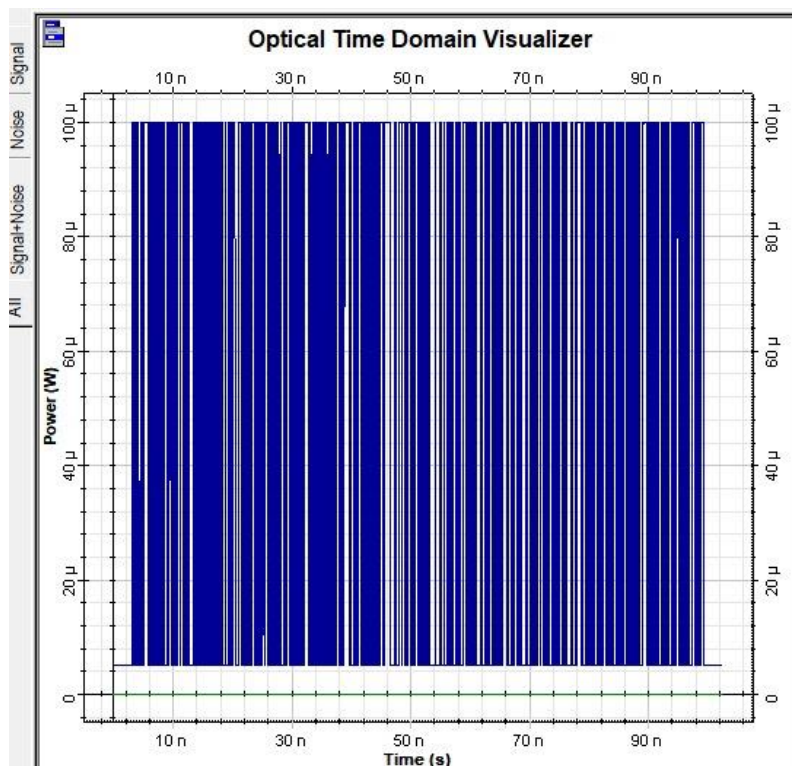
BOTDA әдісі талшықты-оптикалық жүйелердегі ұзақ мерзімді температура өзгерістері мен штамдарын болжау үшін кеңінен қолданылады. BOTDA талшықтың сыну көрсеткіші мен толқындарды арқылы өзгерту үшін электр-оптикалық модуляторды пайдаланады, бұл деформация мен температураның өзгеруін анықтауға мүмкіндік береді.



3.5-сурет – Бриллюэн шашырау кезіндегі оптикалық қуаттың мәні



3.6-сурет – Бриллюэн шашырау кезіндегі оптикалық спектр анализаторы



3.7-сурет – Оптикалық уақыт доменінің визуализаторы

Main   Disper...   PMD   Nonline...   <b>Enhanced</b>   Numerical   Graphs   Simulation   Noise   Random ...   Custom ...				
Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Rayleigh scattering	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Rayleigh data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Rayleigh backscattering	50.000000000000001e-006	1/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Rayleigh vs. wavelength	Rayleigh.dat		Normal
<input type="checkbox"/>	Brillouin scattering	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Brillouin gain data	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Brillouin gain constant	46.000000000000001e-012	m/W	Normal
<input type="checkbox"/>	Brillouin gain file name	Brillouin.dat		Normal
<input type="checkbox"/>	Brillouin linewidth	31.7	MHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Frequency shift	1	GHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Max. power reference	50	mW	Normal
<input type="checkbox"/>	Min. power reference	0.1	mW	Normal

3.8-сурет – Бриллюэн шашырау кезіндегі алынған нәтижелер

## ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл дипломдық жұмыста бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін Бриллюэн әдісін зерттеу және қолдану жүргізілді. Зерттеу нәтижелері Бриллюэн әдісінің бетон конструкцияларындағы деформацияларды анықтау және бақылаудағы тиімділігін растайды.

Алынған мәліметтерге сүйене отырып, келесі қорытындылауға болады Бриллюэн әдісі бетон конструкцияларының деформациясын бақылаудың тиімді құралы болып табылады. Бұл нақты уақытта және ұзақ қашықтықта деформацияларды бақылауға мүмкіндік береді.

Бриллюэн әдісін қолдану деформацияларды бастапқы кезеңде анықтауға және бетон конструкцияларының ықтимал зақымдалуын болдырмауға мүмкіндік береді, бұл олардың беріктігі мен пайдалану қауіпсіздігін арттырады.

Бұл саладағы одан әрі зерттеулер нақтырақ және сенімді деректерді талдау әдістерін әзірлеуді, сондай-ақ бетон конструкцияларының басқа параметрлерін бақылау үшін Бриллюэн әдісінің қолдану аясын кеңейтуді қамтуы қарастыруға болады. OptiSystem бағдарламасы бойынша Бриллюэн шашырауының тиімді әдісі бойынша BOTDA әдісі талшықты-оптикалық жүйелердегі нақты нәтижелерге қол жеткізілді.

Жалпы алғанда, осы зерттеудің нәтижелері бетон конструкцияларының деформациясын бақылауға арналған Бриллюэн әдісінің болашағы мен маңыздылығын және оның инфрақұрылым объектілерінің қауіпсіздігі мен сенімділігін қамтамасыз етудегі мүмкіндіктерін көрсетеді.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Lv, H., Zhao, X., Zhan, Y., et al.: 'Damage evaluation of concrete based on Brillouin corrosion expansion sensor', *Constr. Build. Mater.*, 2017, 143, pp. 387–394
- 2 Tahar Ezzedine, Amira Zrelli, 'Efficient measurement of temperature, humidity and strain variation by modeling reflection Bragg grating spectrum in WSN, *Optik*, Volume 135, 2017, Pages 454-462, ISSN 0030-4026, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.01.061>.
- 3 Cheng-Yu Hong, Yi-Fan Zhang, Guo-Wei Li, Meng-Xi Zhang, Zi-Xiong Liu, Recent progress of using Brillouin distributed fiber optic sensors for geotechnical health monitoring, *Sensors and Actuators A: Physical*, Pages 131-145, ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.03.017>.
- 4 Jin, Jing & Zhang, Haoshi & Liu, Jixun & Li, Ya. (2016). Distributed Temperature Sensing Based on Rayleigh Scattering in Irradiated Optical Fiber. *IEEE Sensors Journal*. PP. 1-1. 10.1109/JSEN.2016.2615945.
- 5 Luo, Jianbin & Hao, Yanpeng & ye, Qing & Hao, Yunqi & Li, Licheng. (2013). Development of Optical Fiber Sensors Based on Brillouin Scattering and FBG for On-Line Monitoring in Overhead Transmission Lines. *Journal of Lightwave Technology*. 31. 1559-1565. 10.1109/JLT.2013.2252882.
- 6 Wei, Heming & Zhao, Xuefeng & Kong, Xianglong & Zhang, Pinglei & Cui, Yanjun & Sun, Changsen. (2013). The Performance Analysis of Distributed Brillouin Corrosion Sensors for Steel Reinforced Concrete Structures. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 14. 431-42. 10.3390/s140100431.
- 7 Wu F, Sheng W, Zhang G, et al. Research on the deformation and settlement characteristics of tunnel lining structures based on distributed fibre optic sensing technology. *Advances in Structural Engineering*. 2024;27(6):912-939.
- 8 BeatrizMartín-PérezB. Martín-Pérez, AmreDeifA. Deif, BrunoCousinB. Cousin, ChunshuZhangC. Zhang, XiaoyiBaoX. Bao, and WenhaiLiW. Li. 2010. Strain monitoring in a reinforced concrete slab sustaining service loads by distributed Brillouin fibre optic sensors. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 37(10): 1341-1349.
- 9 A. Sebastian, S. Trebaol and P. Besnard, "Intracavity Brillouin Gain Characterization," 2018 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), Toulouse, France, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWP.2018.8552907.
- 10 J. P. Van't Hof and D. D. Stancil, "Eigenfrequencies of a Truncated Conical Resonator via the Classical and Wentzel–Kramers–Brillouin Methods," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 8, pp. 1909-1916, Aug. 2008, doi: 10.1109/TMTT.2008.927408
- 11 A. Theodosiou, P. Savva, E. Mendoza, M. F. Petrou and K. Kalli, "In-Situ Relative Humidity Sensing for Ultra-High-Performance Concrete Using Polymer Fiber Bragg Gratings," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 14, pp. 16086-16092, 15 July 15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3075609.
- 12 L. Shaobin, Z. Tao, L. Meilin and H. Wei, "Wentzel-Kramer-Brillouin and finite-difference time-domain analysis of Terahertz band electromagnetic

characteristics of target coated with unmagnetized plasma," in *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 19, no. 1, pp. 15-20, Feb. 2008, doi: 10.1016/S1004-4132(08)60039-0.

13 A. Lopez-Gil, X. Angulo-Vinuesa, A. Dominguez-Lopez, S. Martin-Lopez and M. Gonzalez-Herraez, "Simple Baseband Method for the Distributed Analysis of Brillouin Phase-Shift Spectra," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 13, pp. 1379-1382, 1 July1, 2016, doi: 10.1109/LPT.2016.2541699.

14 Zhao X, Gong P, Qiao G, Lu J, Lv X, Ou J. Brillouin corrosion expansion sensors for steel reinforced concrete structures using a fiber optic coil winding method. *Sensors (Basel)*. 2011;11(11):10798-819. doi: 10.3390/s111110798.

15 Behrad Madjdabadi, Benoît Valley, Maurice B. Dusseault, Peter K. Kaiser, Experimental evaluation of a distributed Brillouin sensing system for measuring extensional and shear deformation in rock, Volume 77, 2016, Pages 54-66, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.040>.

16 Li J, Shen B, Wang J. A Combined Positioning Method Used for Identification of Concrete Cracks. *Micromachines (Basel)*. 2021 Nov 29;12(12):1479. doi: 10.3390/mi12121479.

17 Gao, Lei, Chuan Han, Zhongquan Xu, Yingjie Jin, and Jianqiang Yan. 2019. "Experimental Study on Deformation Monitoring of Bored Pile Based on BOTDR" *Applied Sciences* 9, no. 12: 2435. <https://doi.org/10.3390/app9122435>

18 Yu Liu, Wenping Li, Jianghui He, Shaowei Liu, Liyong Cai, Gang Cheng, Application of Brillouin optical time domain reflectometry to dynamic monitoring of overburden deformation and failure caused by underground mining, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 106, 2018, Pages 133-143, ISSN 1365-1609, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.030>.

19 Sountharajah A, Wong L, Nguyen N, Bui HH, Kodikara J. Evaluation of flexural behaviour of cemented pavement material beams using distributed fibre optic sensors. *Construct Build Mater*. 2017; 156: 965–75.

20 Q. Yuan, J. Chai, D. Zhang, J. Liu, Y. Li and G. Yin, "Monitoring and Characterization of Mining-Induced Overburden Deformation in Physical Modeling with Distributed Optical Fiber Sensing Technology," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 4, pp. 881-888, 15 Feb.15, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2918414

21 K. Salwik, Ł. Śliwczyński and P. Krehlik, "Detection of Stimulated Brillouin Scattering in Bi-directional Fiber-optic Links," 2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Paris, France, 2022, pp. 1-2, doi: 10.1109/EFTF/IFCS54560.2022.9850513.

22 Y. Mizuno, N. Hayashi and K. Nakamura, "Brillouin scattering in plastic optical fibers: Fundamental properties and sensing applications," 2012 Photonics Global Conference (PGC), Singapore, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/PGC.2012.6458123.



## ҒЫЛЫМИ ЖЕКТЕКШІНІҢ ШҚІРІ

дипломдық жұмыс

Диханбек Гүлнәз Талғатқызы

6B07112 – Electronic and Electrical Engineering

### Тақырыбы: «Бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін Бриллюэн әдісін зерттеу және қолдану»

Дипломдық жұмыс бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін Бриллюэн әдісін зерттеу және қолдану Брэгг торларының дамуы мен өнімділігін талдауды қарастырды. Кез келген температураны анықтауға және деректерді өңдеу алгоритмдеріне ерекше назар аударылған, бұл деформацияны өлшеудің дәлдігін жақсартып жақсы нәтижелерге қол жеткізген.

Диханбек Гүлнәз Талғатқызы дипломдық жұмыста Брэгг торлары бар сенсорлары практикалық қолдану бойынша ұсыныстармен аяқталады, оның ішінде орнату және техникалық қызмет көрсету стандарттарын әзірлеу, сондай-ақ деректерді талдау және интерпретациялау жүйелерді пайдалану.

Бұл зерттеу құрылыс индустриясы үшін жаңа мүмкіндіктер ашатын бетон конструкцияларының қауіпсіздігі мен ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ету үшін Брэгг торларын пайдаланудың маңызды әлеуетін көрсетеді.

Диханбек Гүлнәз Талғатқызы дипломдық жұмыс жазуда және болашақта ғылым саласында өздігінен жұмыс істей алу қабілетін толығымен көрсете алды.

Жазылған дипломдық жұмысқа "өте жақсы" (92%) деген баға, ал студент Диханбек Гүлнәз Талғатқызы 6B07112 – Electronic and Electrical Engineering білім беру бағдарламасының бакалавр академиялық дәрежесіне лайықты деп есептеймін.

**Ғылыми жетекші:**

ЭТЖҒТ каф.  
профессор PhD



« 30 » 05

Смайлов Н.Қ.

2024 ж.



Дипломдық жұмысқа

## СЫН – ПІКІР

Диханбек Гүлнәз Талғатқызы

«6B07112 – Electronic and Electrical Engineering мамандығы»

Тақырыбы: «Бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін  
Бриллюэн әдісін зерттеу және қолдану»

- а) графикалық бөлімі 15 бет;  
б) түсіндірме жазбасы 37 бет.

## ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ ЖАСАУ

Бұл дипломдық жұмыста қазіргі әлемдік ғалымдардың зерттеулеріне сүйене отырып талшықты-оптикалық сенсорлардың бетон конструкциялары мен интеграциялануын зерттелінді. Алынған нәтижелер арқылы оптикалық байланыс кабелінің жаңа тұстарын зерделеу қарастырылған.

Нәтижелердің нақты ақпарат алу үшін эксперименттік жұмыстар жүргізілген. OptiSystem бағдарламасы пайдалана отырып Бриллюэн шашырауының жаңа нәтижелерге қол жеткізу мен зерттеу бөлімінде қарастырылаған.

Диханбек Гүлнәз Талғатқызы дипломдық жұмыс нәтижесінде Бриллюэн әдісінің негізгі принциптері мен талаптарын сақтай отырып қарастырылып талдау жасалған.

Диханбек Гүлнәз Талғатқызы осы зерттеу барысында құрылыс индустриясы үшін жаңа мүмкіндіктер ашатынын көрсете алған, дегенмен бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін Бриллюэн әдісін зерттеу және қолданудың маңызды әлеуетін толық аша алған.

Диханбек Гүлнәз Талғатқызы дипломдық жұмысты жазу барысында білім және ғылым саласында өздігінен жұмыс істеуге қабілетті.

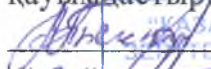




## ЖҰМЫС БАҒАСЫ

Дипломдық жұмысқа "өте жақсы" (92%) деген баға, ал студент Диханбек Гүлнәз Талғатқызы 6B07112 – Electronic and Electrical Engineering білім беру бағдарламасының бакалавр академиялық дәрежесіне толық сай келеді.

### Сын-пікір беруші:

ҚазҰАЗУ

қауымдастырылған профессор т.ғ.к

  
А.Б. Токмолдаев  
«31»  2024 ж.  
«31»   
«31»   
«31» 

**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: Диханбек Гүлнәз Талғатқызы**

**Тақырыбы: Бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін Бриллюэн әдісін зерттеу және қолдану**

**Жетекшісі: Нуржигит Смайлов**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 4.8**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 0**

**Дәйексөз (35): 1.7**

**Әріптерді ауыстыру: 2**

**Аралықтар: 0**

**Шағын кеңістіктер: 15**

**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:**

Күні 31.05.2024

Кафедра меңгерушісі



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Диханбек Гүлнәз Талғатқызы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** Бетон конструкцияларының деформациясын бақылау үшін Бриллюэн әдісін зерттеу және қолдану

**Научный руководитель:** Нуржигит Смайлов

**Коэффициент Подобия 1:** 4.8

**Коэффициент Подобия 2:** 0

**Микропробелы:** 15

**Знаки из здругих алфавитов:** 2

**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:

Дата 31.05, 2024

Заведующий кафедрой



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Кыстаубаев Нурлан Садыкович

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Дипломная работа

**Название работы:** RGB светодиодтарын колдану арқылы көпқабатты голографиялық дисплейді әзірлеу

**Научный руководитель:** Сұңғат Марксұлы

**Коэффициент Подобия 1:** 14.6

**Коэффициент Подобия 2:** 2.8

**Микропробелы:** 0

**Знаки из здругих алфавитов:** 0

**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:

Дата 31.05.2024

  
Морисун С  
проверяющий эксперт