

https://doi.org/10.51885/3134-8025_IJCS_2026_2_11

XFTAP 49.46.01

БЕТОН КОНСТРУКЦИЯЛАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ МОНИТОРИНГІ КЕЗІНДЕ ТАЛШЫҚТЫ-ОПТИКАЛЫҚ ДАТЧИКТЕРДІҢ ТАРАЛУЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ПРИ МОНИТОРИНГЕ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

OPTIMIZATION OF FIBER-OPTICAL SENSORS DISTRIBUTION DURING STRUCTURAL MONITORING OF CONCRETE STRUCTURES

Н.К. Смайлов ^{1,2}, А.Е. Куттыбаева ^{1,2*}, А.Ә. Әмір ^{1,2}, А.М. Базарбай ^{1,2},
Б.Н. Секенов ^{1,2}

¹Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты,
Алматы қ., Қазақстан

²Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Куттыбаева Айнур Ермаккалиевна, e-mail: a.kuttybayeva@satbayev.university

Түйінді сөздер:

талшықты-оптикалық
датчик, Брэгг торы,
темірбетон
конструкциялары,
құрылымдық
мониторинг, датчиктерді
орналастыруды
оңтайландыру,
деформациялар, ANSYS.

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл зерттеудің өзектілігі темірбетон конструкцияларының техникалық жағдайын бақылау жүйелерінің тиімділігін арттыру қажеттілігімен байланысты, мұнда талшықты-оптикалық датчиктердің орнын ұтымды анықтау маңызды рөл атқарады. Зерттеудің мақсаты – элементтердің конструктивтік ерекшеліктерін, жүктемелердің сипатын және пайдалану шарттарын ескере отырып, датчиктердің орналасу сызбасын оңтайландыруға арналған әдістемелік ұсынымдар әзірлеу. Жұмыста датчиктердің орналасуына қатысты бар тәсілдерге шолу жасалып, ANSYS бағдарламалық кешенінде темірбетон элементтеріндегі кернеу-деформациялану күйін сандық модельдеу жүргізілді. Модельдеу нәтижелері бойынша датчиктерді орнатуға ең қолайлы кернеу шоғырлану аймақтары анықталды. Лабораториялық үлгілерде жүргізілген тәжірибелік зерттеулер датчиктердің орналасу сызбасы мен бекіту тәсілі өлшеу дәлдігіне айтарлықтай әсер ететінін растады. Сонымен қатар, ұсынылған тәсіл жүйенің ақпараттылығын төмендетпей, қажет датчиктердің санын азайтуға мүмкіндік береді. Зерттеудің ғылыми жаңалығы – конструктивтік параметрлер мен пайдалану шарттарын ескере отырып, талшықты-оптикалық Брэгг торлы датчиктерді орнатудың оңтайлы нүктелерін таңдауға арналған алгоритмді әзірлеу. Практикалық маңыздылығы – ұсынылған тәсілді көпірлер, көпқабатты ғимараттар және гидротехникалық нысандар сияқты құрылыс объектілерін жобалау мен жаңғырту кезінде құрылымдық мониторинг жүйелерінде қолдану мүмкіндігінде.



Ключевые слова:

волоконно-оптический датчик, решётка Брэгга, железобетонные конструкции, мониторинг, оптимизация размещения, деформации, ANSYS.

АННОТАЦИЯ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности систем мониторинга технического состояния железобетонных конструкций, где важную роль играет рациональное размещение волоконно-оптических датчиков. Целью работы является разработка методических рекомендаций по оптимизации схемы их расположения с учётом конструктивных особенностей элементов, характера нагрузок и условий эксплуатации. В работе проведён обзор существующих подходов к размещению волоконно-оптических датчиков и выполнено численное моделирование распределения напряжённо-деформированного состояния железобетонных элементов в программном комплексе ANSYS. На основании результатов моделирования определены зоны концентрации напряжений, наиболее информативные для установки датчиков. Экспериментальные исследования на лабораторных образцах подтвердили, что выбор схемы размещения и способа крепления датчиков существенно влияет на точность измерений и позволяет сократить их количество без снижения информативности системы.

Научная новизна работы заключается в разработке алгоритма выбора оптимальных точек установки волоконно-оптических датчиков, учитывающего конструктивные параметры и условия эксплуатации. Практическая значимость заключается в возможности применения предложенного подхода при проектировании и модернизации систем структурного мониторинга зданий и сооружений, включая мосты, многоэтажные здания и гидротехнические объекты.

keywords:

fiber-optic sensor, fiber Bragg grating, reinforced concrete structures, structural health monitoring, sensor placement optimization, strain, ANSYS.

ABSTRACT

The relevance of this research is driven by the need to improve the efficiency of structural health monitoring systems for reinforced concrete structures, where rational placement of fiber-optic sensors is critical. The aim of the study is to develop methodological recommendations for optimizing sensor layouts considering structural characteristics, load conditions, and operational factors. The paper reviews existing sensor placement approaches and presents numerical modeling of stress-strain behavior in reinforced concrete elements using ANSYS software. Based on the simulation results, stress concentration zones were identified as the most informative locations for sensor installation. Experimental studies on laboratory specimens confirmed that both sensor layout and attachment methods significantly influence measurement accuracy. In addition, layout optimization makes it possible to reduce the number of sensors without loss of monitoring effectiveness. The scientific novelty of the work lies in the development of an algorithm for selecting optimal installation points for fiber Bragg grating sensors, while the practical significance is demonstrated by its applicability to the design and modernization of monitoring systems for civil engineering structures.

КІРІСПЕ

Заманауи құрылыс құрылымдары, әсіресе көпірлер, гидротехникалық құрылыстар, көпқабатты үйлер, жол айрықтары және өндірістік кешендер сияқты маңызды инфрақұрылымдық нысандар сенімділік пен ұзақ мерзімділікке жоғары талаптар қояды. Мұндай объектілердің тұтастығын бұзу елеулі экономикалық шығындарға, адамдардың қауіпсіздігіне қатерлерге және экологиялық зардаптарға

әкелуі мүмкін. Сондықтан соңғы онжылдықтарда құрылымдардың техникалық жай-күйін олардың бүкіл өмірлік циклі бойына үздіксіз немесе мерзімді бақылауға мүмкіндік беретін Structural Health Monitoring (SHM) жүйелеріне ерекше назар аударылды (Alzyoud & Ziadat, 2018; Coetzee et al., 2015).

SHM саласындағы ең перспективалы бағыттардың бірі талшықты-оптикалық сенсорларды, атап айтқанда, талшықты Брэгг торларына (FBG) негізделген сенсорларды пайдалану болып табылады. Мұндай датчиктер дәстүрлі электрлік тензометрлерге қарағанда бірқатар артықшылықтарға ие: өлшеудің жоғары дәлдігі, электромагниттік кедергілерге төзімділігі, ықшам өлшемі, бір сызық бойымен көп нүктелі өлшеулерді орындау мүмкіндігі және агрессивті ортада (жоғары ылғалдылық, химиялық әсер ету, температураның өзгеруі) жұмыс істеу мүмкіндігі. Бұл қасиеттер қиын климаттық және эксплуатациялық жағдайларда жұмыс істейтін құрылыс құрылымдарында пайдалану үшін FBG әсіресе тартымды етеді (Bremer et al., 2019).

Темірбетон конструкцияларының жағдайын бақылау олардың күрделі ішкі құрылымымен байланысты бірқатар ерекшеліктерге ие. Арматура торының болуы, жүктемені біркелкі бөлу, шөгу және температуралық деформациялар, сондай-ақ микрожарықтардың пайда болуы күрделі кернеу-деформация жағдайын жасайды, бұл деректерді дәл түсіндіруді қиындатады. Кез келген бақылау жүйесінің тиімділігін анықтайтын негізгі факторлардың бірі сенсорды орнату нүктелерін дұрыс таңдау болып табылады (Chen et al., 2020; Halim et al., 2019). Датчиктерді дұрыс орналастырмау кернеу үлгісінің бұрмалануына, жүйенің сезімталдығының жергілікті «бұзылуына» және өлшеу арналары санының негізсіз ұлғаюына әкелуі мүмкін, бұл жабдық құнының өсуіне және оған техникалық қызмет көрсетудің күрделілігіне әкеледі (Huang et al., 2020; Neftissov et al., 2024).

Темірбетон конструкцияларында талшықты-оптикалық датчиктердің орналасуын оңтайландыру бірден бірнеше мәселені шешуге мүмкіндік береді: өлшемдердің дәлдігі мен сенімділігін арттыру, ақпарат мазмұнының қажетті деңгейін сақтай отырып, датчиктердің санын азайту, күрделі және пайдалану шығындарын азайту, сондай-ақ бақылаудың бүкіл жүйесінің қызмет ету мерзімін арттыру (Bado & Casas, 2021). Сонымен қатар, дұрыс жобаланған орналастыру схемасы жоғары жүктеме аймақтарын, крекингтің ерте белгілерін және басқа да ақауларды тиімдірек анықтауға мүмкіндік береді, бұл әсіресе құрылымдардың қалған қызмет мерзімін бағалау кезінде маңызды.

Жаһандық тәжірибеде талшықты-оптикалық сенсорлары бар Structural Health Monitoring (SHM) жүйелерін енгізу өз тиімділігін дәлелдеді (Bao & Chen, 2012). Осылайша, Қытай мен Жапонияда мұндай жүйелер сейсмикалық қауіпті аймақтардағы аспалы көпірлер мен көпқабатты үйлердің жағдайын бақылау үшін, Канада мен АҚШ-та – гидротехникалық құрылыстар мен көпір өткелдерін бақылау үшін, ал ЕО елдерінде – көлік инфрақұрылымының темірбетон элементтерінің беріктігін бағалау үшін қолданылады. Зерттеулер талшықты Брэгг торы бар датчиктерді олардың орналасуын оңтайландырумен үйлестіре пайдалану құрылымдық бұзылу ықтималдығын 20-40 % төмендетуге және диагностикалық шығындарды 30 %-ға дейін төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетеді [Alustiza et al., 2022; Smailov et al., 2024]. Бұл халықаралық тәжірибе сенсорларды орналастыру схемасын оңтайландыру тиімді және үнемді мониторинг жүйелерін құру жолындағы негізгі қадам болып табылатынын растайды, бұл бұл тақырыпты Қазақстанның құрылыс индустриясында қолдану үшін өте өзекті етеді (Banerji et al., 2011).

МАТЕРИАЛДАР ЖӘНЕ ӘДІСТЕРІ

Зерттеу диаметрі 10 мм А500 болаттан жасалған арматуралық қаңқасы бар 150×150×150 мм темірбетон арқалықтардың және 1000×500×100 мм плиталардың үлгілерінде жүргізілді, деформацияларды өлшеу үшін орталық толқын ұзындығы 1550 нм

және арматураға бекітілген 1,07 нм тор қадамы бар талшықты Брэгг торлары (FBG) қолданылды, бетон құрылымның ішінде орнатылған (1 сурет). Оптикалық сигналды интеррогатор 1 пм ажыратымдылығымен және 1 Гц сауалнама жиілігімен тіркеді. Сенсорларды орналастырудың үш схемасы қарастырылды: сызықтық, диагональды және аралас. Сынақтар статикалық және циклдік режимдерде максималды жүктемесі 200 кН болатын гидравликалық прессте жүргізілді, жүктеме жүктеме ұяшықтарымен бекітілді, ал талшықты Брэгг торы (FBG) деректері анықтамалық электр датчиктерінің көрсеткіштерімен салыстырылды. Деформацияның таралуын болжау үшін ANSYS нақты арматуралық геометриямен ақырлы элементтік модельдеу қолданылды. Деформациялар формула бойынша есептелді (Choi et al., 2014):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (1)$$

мұндағы ε – салыстырмалы деформация мәні;

ΔL – талшық бөлігінің ұзындығының өзгеруі;

L – бастапқы ұзындығы, FBG орталық толқын ұзындығының ығысуы тәуелділікпен анықталды:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_e)\varepsilon + \lambda_B \alpha \Delta T, \quad (2)$$

мұндағы λ_B – бастапқы толқын ұзындығы;

ρ_e – тиімді фотосерпімді коэффициент;

α – температура сезімталдық коэффициенті;

ΔT – температураның өзгеру мәні. Өлшеу қатесі келесідей есептелді:

$$\delta = \frac{|\varepsilon_{FBG} - \varepsilon_{\text{эталон}}|}{\varepsilon_{\text{эталон}}} \times 100\% \quad (3)$$

және дәлдік критерийлері, датчиктердің минималды саны және сыртқы кедергілерге төзімділік бойынша сенсорларды орнату схемаларын салыстырмалы бағалау үшін пайдаланылды.



1-сурет. Бетон конструкциясын дайындау барысы

Ескерту – авторлар дайындаған бетон үлгісі

Зерттеу нәтижелерінің дәлдігін арттыру мақсатында талшықты-оптикалық датчиктерді калибрлеу эталондық электрлік тензодатчиктердің көрсеткіштерімен салыстыру арқылы жүргізілді. Өлшеу қателігі салыстырмалы қателік және орташа квадраттық ауытқу көрсеткіштері негізінде бағаланып, датчиктерді орналастырудың әртүрлі схемаларын сандық тұрғыдан салыстыруға мүмкіндік берді.

Эксперименттердің қайталануын қамтамасыз ету үшін әрбір сынақ кемінде үш рет жүргізіліп, нәтижесінде деформация мәндерінің орташа көрсеткіштері есептелді. Сонымен қатар, температураның ауытқуы мен вибрациялық әсерлер сияқты сыртқы факторлар ескеріліп, мониторинг жүйесінің нақты пайдалану жағдайларындағы тұрақтылығы бағаланды.

ANSYS бағдарламалық кешенінде жүргізілген сандық модельдеу нақты шекаралық шарттар мен материалдардың сипаттамаларын ескере отырып құрылған үшөлшемді ақырлы элементтік модель негізінде орындалды. Бұл тәсіл модельдеу нәтижелерін эксперименттік деректермен сәйкестендіруге мүмкіндік берді.

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ТАЛҚЫЛАУЛАР

Өткізілген тәжірибелік сынақтар мен сандық модельдеу талшықты-оптикалық сенсордың орналасуын таңдау деформацияны өлшеудің дәлдігіне, датчиктердің қажетті санына және жүйенің сыртқы кедергілерге төзімділігіне айтарлықтай әсер ететінін көрсетті (Ye, Su & Han, 2014). Сызықтық орнату схемасы кезінде датчиктер конструкцияның созылу аймағында арматуралық жолақтардың бойымен орналасқанда орташа өлшеу қателігі $\delta_{орт} = 4,5 \%$, диагональды схемамен – $6,2 \%$, және аралас орналастыруда – $3,1 \%$, дәлдіктің жақсаруына сәйкес келеді бұл:

$$\Delta\delta = \frac{\delta_{сызықтық} - \delta_{аралас}}{\varepsilon_{сызықтық}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\Delta\delta = \frac{4,5 - 3,1}{4,5} \times 100\% \approx 31,1\% \quad (5)$$

Бақылау аймақтарында деформацияны толық бақылау үшін қажетті датчиктердің саны сызықтық, диагональды және аралас схемалар үшін сәйкесінше 6, 8 және 5 болды, бұл жоғары дәлдікті сақтай отырып, аралас нұсқаның экономикалық тиімділігін көрсетеді. ANSYS модельдеу максималды деформациялар аймақтары аралас схемадағы датчиктердің орналасуымен сәйкес келетінін және кернеудің таралуы Гук заңын қолданатын теориялық есептеулерге сәйкес келетінін растады олай болса [Umar et al., 2021; Udd & Spillman, 2011]:

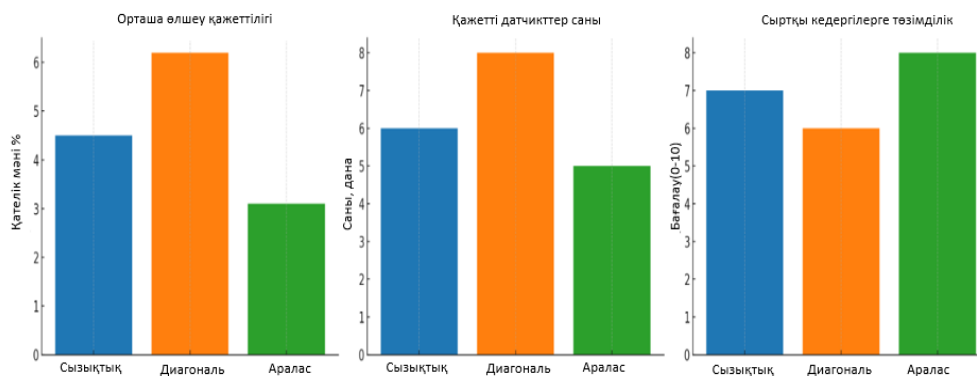
$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (6)$$

мұндағы E – материалдың серпімділік модулі;

ε – салыстырмалы деформация. Температураның тұрақтылығын талдау көрсеткендей, температура әсерінің орнын толтыру кезінде формуланы пайдаланады:

$$\varepsilon_{корр} = \varepsilon_{өзгер} - \alpha \cdot \Delta T \quad (7)$$

қате орташа есеппен $0,8-1,2 \%$ төмендеді, бұл температураның айтарлықтай тәуліктік ауытқуы жағдайында жұмыс істегенде өте маңызды.



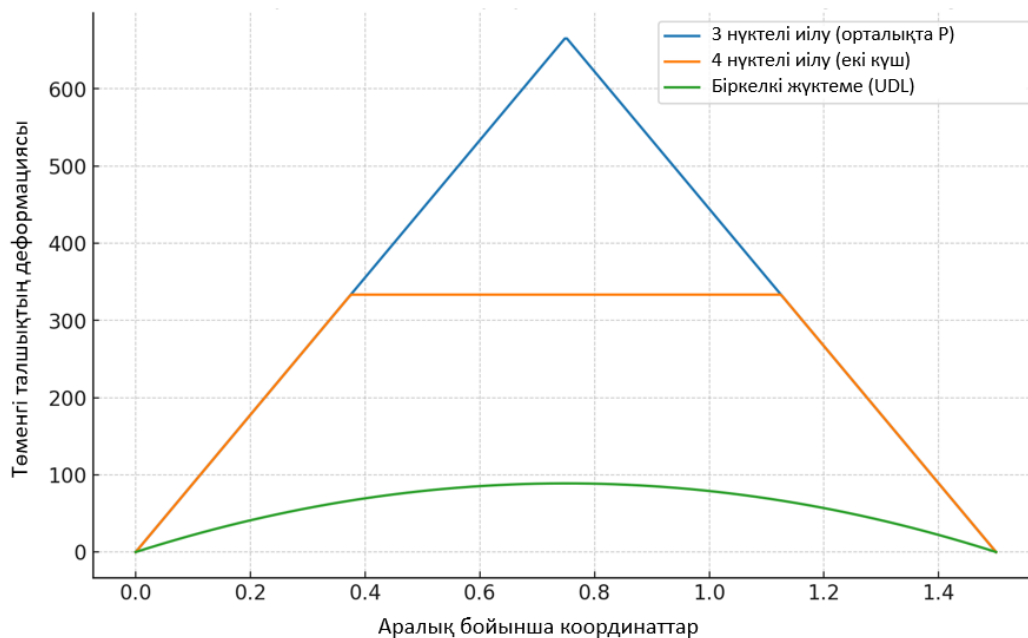
2-сурет. Темірбетон конструкциядағы талшықты-оптикалық датчиктерді орналыстыру жүйесін салыстыру

Ескерту – авторлар дайындаған мәліметтер (Куттыбаева, 2025)

Қатенің төмендеуі сенсорлардың аралас орналасуымен бойлық және ығысу деформацияларын бір уақытта басқаруға болатындығына байланысты, бұл деректердің толықтығын арттырады (Bravo et al., 2012).

Экономикалық тиімділік критерийі бойынша аралас схема да жақсы нәтиже көрсетті: сызықтық және диагональды схемаларда 6-ға қарсы құрылымның негізгі аймақтарын жабу үшін тек 5 сенсор қажет болады. Датчиктер санының 16-37 %-ға төмендеуі жүйенің құнын төмендетеді, егер дәлдік сақталса немесе тіпті жақсарса.

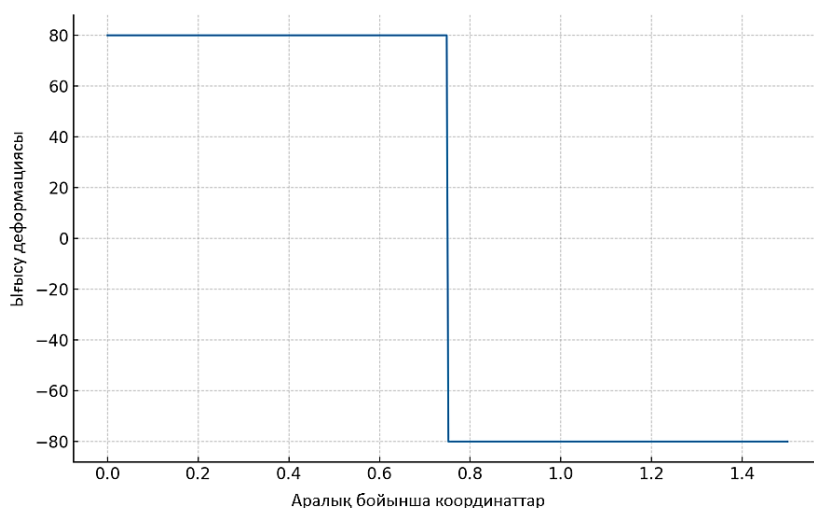
Сыртқы кедергілерге төзімділік (температураның ауытқуы, діріл, ылғалдылық) сынақ жағдайлары өзгерген кезде қайталанатын өлшеулер негізінде 10 балдық шкала бойынша бағаланды. Аралас схема ең жақсы нәтиже көрсетті — сызықтық 7-ге қарсы 8 ұпай және диагональ бойынша 6 ұпай. Тұрақтылықтың жоғарылауы сенсорлардың әртүрлі жылу және механикалық жүктемелері бар құрылымдық аймақтарға таралуымен түсіндіріледі, бұл жергілікті бұзылуларды ішінара өтеуге мүмкіндік береді (2-сурет).



3-сурет. Өріс бойлық сәуленің төменгі талшығы бойымен деформациялар
Ескерту – авторлар дайындаған мәліметтер (Куттыбаева 2025)

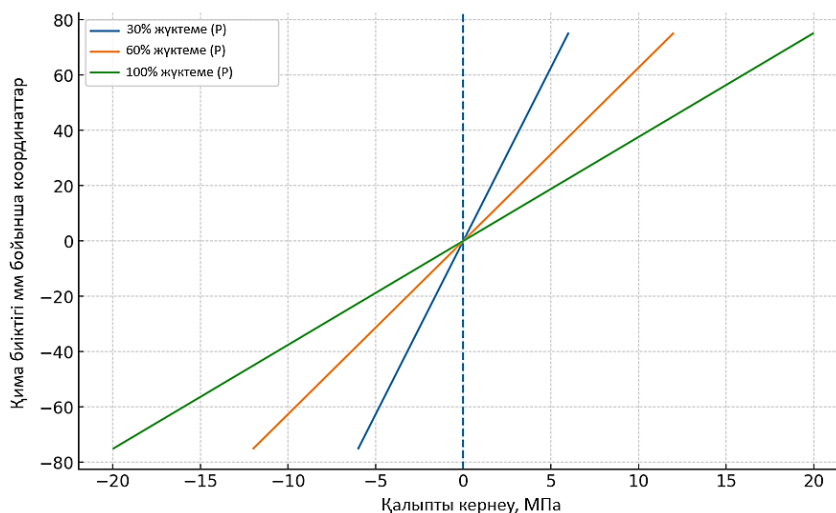
Диаграмма максималды бойлық деформациялар орталық шоғырланған жүктеме кезінде аралықтың ортасында пайда болатындығын көрсетеді (3 нүктелік схема), ал біркелкі жүктеме кезінде деформацияның таралуы тегіс және ұзартылады. 4 нүктелі иілу кезінде аралықтың ортасындағы біркелкі деформация аймағы кеңейтіледі, бұл ығысу аймақтарының әсерінсіз таза иілуді өлшеу үшін сенсорларды калибрлеу кезінде пайдалы болуы мүмкін (Islam et al., 2015; Zhang & Ansari, 2005). Бұл сенсорларды орналастыру схемасын пайдалану жүктемелерінің түріне бейімдеу қажеттілігін растайды (3-сурет).

Ең үлкен көлденең күштер әрекет ететін тіректердің жанында максималды ығысу деформациялары байқалады. Аралықтың орталық бөлігінде $\gamma_{xz} \approx 0$, ол таза иілу аймағына сәйкес келеді (Senkans et al., 2023). Осы деректер ығысу кернеулерін бақылау үшін датчиктер тіректерге жақынырақ орнатылуы керек екенін негіздейді, ал иілу деформацияларын өлшеу үшін орталық аймақтарға артықшылық беріледі (4-сурет).



4-сурет. γ_{xz} 3 нүктелі иілу кезінде арқалық бойымен таралуы

Ескерту – авторлар дайындаған мәліметтер (Қуттыбаева, 2025)

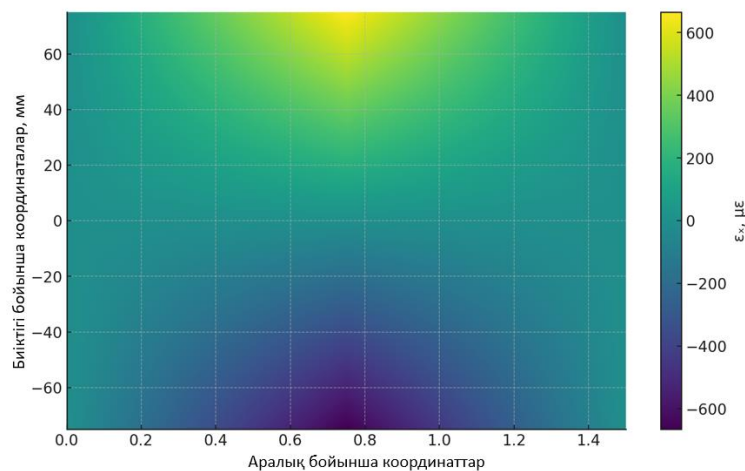


5-сурет. Орташа аралықтағы қима биіктігі бойынша профиль

Ескерту – авторлар дайындаған мәліметтер (Қуттыбаева, 2025)

Қалыпты кернеу профилі әртүрлі жүктеме деңгейлерінде аралық биіктікте көлденең қиманың биіктігі бойынша σ_x сызықтық таралуы жалпақ қималар Заңына сәйкес келеді (Эйлер–Бернулли теориясы), мұнда созылған талшықтар қиманың төменгі жағында, ал қысылған талшықтар жоғарғы жағында орналасқан (Farhat et al., 2024; Varyshchuk & Bobitski, 2016; Kengesbayeva et al., 2024). Жүктеме ұлғайған кезде кернеулердің абсолютті мәні пропорционалды түрде артады, бұл модельдеудің дұрыстығын және сенсорлардың калибрлеу коэффициенттерін есептеу үшін алынған тәуелділіктерді пайдалану мүмкіндігін көрсетеді (5-сурет).

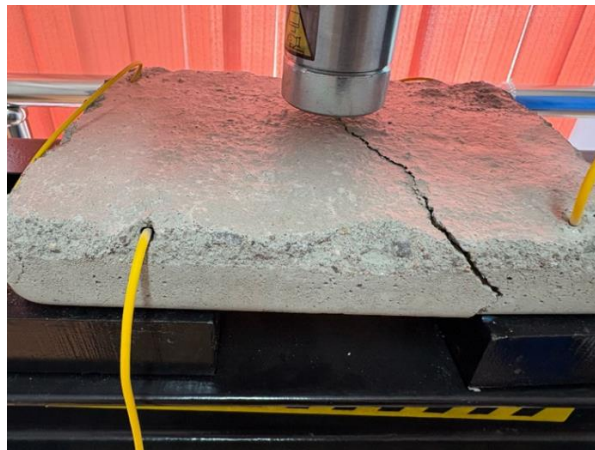
Жылу картасында созылу (аралықтың ортасындағы қиманың төменгі бөлігі) және қысу (қиманың жоғарғы бөлігі) аймақтары айқын көрінеді (6 сурет). Бейтарап ось арқылы өтудің тегіс градиенті деформациялардың биіктігі бойынша біркелкі таралуын көрсетеді. Бұл деректер талшықты-оптикалық сенсорлардың орналасуын оңтайландыруға мүмкіндік береді, осылайша олар сенсорлардың ең аз санында ең үлкен деформацияларды түсіреді, сонымен қатар дизайн ресурсын болжауға көмектеседі (Camas-Anzueto et al., 2023).



6-сурет. 3 нүктелі иілу кезіндегі қиманың ұзындығы мен биіктігі бойынша бойлық деформацияның жылу картасы ϵ_x
Ескерту – авторлар дайындаған мәліметтер ANSYS бағдарламасы (Қуттыбаева, 2025)

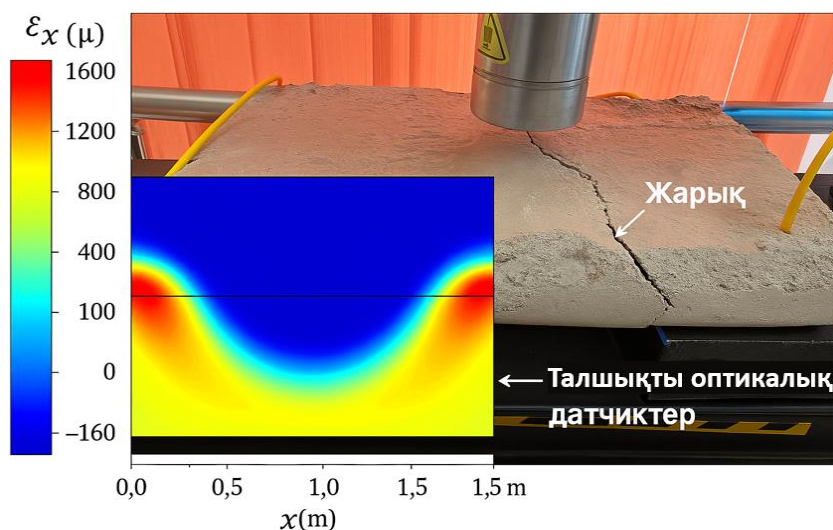
Гидравликалық прессте зертханалық сынақтар кезінде темірбетон плита үлгісінде негізгі жарықшақтың пайда болу сәті тіркелді (7-сурет). 142 кН жүктемеге жеткенде басталды, бұл орталық бөлікте шамамен 1,8 мм ауытқуға сәйкес келеді. Бастапқыда төменгі бетон қабатының созылған аймағында микрожарықтар байқалды, олар салыстырмалы деформациядағы күрт секіру ретінде талшықты-оптикалық датчиктер арқылы тіркелді.

Бір жазу қадамында 18–22 мк. Жүктеме ұлғайған сайын жарықшақ кесінді бойымен жоғары қарай таралып, датчиктердің бірінің орналасқан жерін кесіп өтті, бұл FBG шағылысу толқын ұзындығының одан әрі күрт өзгеруін тудырды және белсенді бұзылу фазасының басталуының белгісі болды (Zhang, Liu & He, 2019; Smailov et al., 2024).



7-сурет. Оптикалық талшықты датчиктермен сынау кезінде темірбетон тақтасындағы жарықтар

Талшықты-оптикалық сенсорлар бір өлшеу циклінің (1 Гц) дәлдігімен жарықшақтардың пайда болу сәтін жазуға мүмкіндік берді, бұл олардың ақауларды ерте анықтауға жарамдылығын растайды. Бұл нәтиже ANSYS модельдеу деректерімен сәйкес келеді, мұнда кернеу аймағындағы максималды деформация мәндері жарықшықтың таралуының нақты траекториясымен сәйкес келеді.



8-сурет. Эксперименттік зерттеу нәтижесі ANSYS бағдарламасында
Ескерту – авторлар дайындаған мәліметтер ANSYS бағдарламасы (Куттыбаева, 2025)

Сынаудан кейінгі үлгінің нақты фотосуретімен үш нүктелі иілу кезінде темірбетон тақтасындағы бойлық деформациялардың таралуын сандық модельдеу нәтижелерінің комбинациясы көрсетілген. Кескіннің сол жақ бөлігінде ANSYS бағдарламасында алынған деформацияның таралу картасы көрсетілген, мұнда максималды мәндер (қызыл аймақ) плитаның төменгі жағындағы созылу аймақтарында шоғырланған. Оң жақ бөлік бұзылудан кейінгі үлгінің нақты күйін көрсетеді: негізгі жарықшақтың бағыты мен пішіні модель ең жоғары созылу кернеулерін болжаған аймаққа сәйкес келеді.

Эксперименттік және есептелген мәліметтердің мұндай сәйкестігі пайдаланылған модельдің және таңдалған шекаралық шарттардың дұрыстығын растайды. Ол сондай-ақ құрылыс құрылымдарының жағдайын бақылау үшін маңызды болып табылатын темірбетон элементтеріндегі жарықтардың басталу және даму сәтін тіркеу үшін талшықты-оптикалық сенсорларды қолданудың тиімділігін көрсетеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген тәжірибелік және сандық зерттеулер нәтижесінде талшықты-оптикалық сенсорды орналастыру схемасы өлшеу дәлдігіне, жүйенің сыртқы әсерлерге төзімділігіне және темірбетон конструкцияларының жағдайын бақылаудың экономикалық тиімділігіне айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Датчиктердің сызықтық және диагональды орналасуын біріктіретін аралас схема ең жақсы нәтиже көрсетті: дәстүрлі сызықтық схемамен салыстырғанда өлшеудің орташа қателігі 31,1%-ға төмендеді, датчиктер саны ақпарат мазмұнын жоғалтпай 16-37%-ға қысқарды, шуға қарсы тұру 10 балдық шкала бойынша 8 баллға жетті. ANSYS-те модельдеу ұсынылған схемадағы сенсорды орнату орындарымен максималды деформация аймақтарының сәйкестігін растады, бұл жүйенің сенімділігі мен ұзақ мерзімділігін арттырады. Модельде анықталған максималды созылу кернеулерінің аудандары сызаттардың нақты басталу аймақтарымен сәйкес келді. Талшықты-оптикалық сенсордың орналасуын оңтайландыру бір өлшеу циклінің дәлдігімен жарықшақтардың пайда болу сәтін тіркей отырып, бақылау жүйесінің сезімталдығын айтарлықтай арттыруы мүмкін. Талшықты Брэгг торларына негізделген сенсорларды пайдалану электромагниттік кедергілер, агрессивті орталар және айнымалы температура жағдайында тұрақты жұмысты қамтамасыз етеді, бұл оларды құрылыс құрылымдарын ұзақ мерзімді бақылау үшін перспективалы етеді.

Нәтижелер сенсорларды орнату нүктелерін дұрыс таңдау арқылы ақпараттық мазмұнды жоғалтпай пайдаланылатын датчиктер санын азайтуға, сол арқылы мониторинг жүйесінің күрделі және операциялық шығындарын азайтуға болатынын көрсетті. Талшықты-оптикалық датчиктері бар SHM жүйелерін пайдаланудың халықаралық тәжірибесі осы жұмыстардың нәтижелерімен біріктірілгенде, оларды орналастыру схемасын оңтайландыру темірбетон конструкцияларының жағдайын бақылаудың сенімділігі мен экономикалық тиімділігін арттырудың негізгі факторы болып табылатынын растайды.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл мақала ғылыми және (немесе) ғылыми-техникалық жобалар бойынша гранттық қаржыландырылған (Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі) AP26197553 «Құрылыс конструкцияларының деформацияларын бақылау үшін талшықты-оптикалық датчиктердің сезімталдығын оңтайландыру» жобасы аясында дайындалды.

ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКА КОМИТЕТІНІҢ ҚОРЫТЫНДЫСЫ: Қолданылмайды.

ЕРІКТІ КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Қолданылмайды.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы техникалық зерттеудің нәтижелерін растайтын деректерді тиісті сұраныс бойынша жауапты автордан алуға болады.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Жоқ.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Жоқ.

ӨДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Alustiza, D. H., Russo, N. A., Mineo, M., López, A., & Villagrán Zaccardi, Y. A. (2022). Packaging design assessment for an experimental fiber optic humidity sensor embeddable in concrete structures. In 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON) (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ARGENCON55245.2022.9939756>
- Alzyoud, S., & Ziadat, A. (2018). Effect of fibers on concrete fresh, mechanical and transport properties. In 2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET) (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICASET.2018.8376772>
- Bado, M., & Casas, J. (2021). A review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring. *Sensors*, 21, Article 1818, 1–83.
- Banerji, P., Chikermane, S., Grattan, K., Tong, S., Surre, F., & Scott, R. (2011). Application of fiber-optic strain sensors for monitoring of a pre-stressed concrete box girder bridge. In *SENSORS*, 2011 IEEE (pp. 1345–1348). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2011.6127255>
- Bao, X., & Chen, L. (2012). Recent progress in distributed fiber optic sensors. *Sensors*, 12(7), 8601–8639.
- Bravo, M., Saenz, J., Bravo-Navas, M., & Lopez-Amo, M. (2012). Concrete beam bending test monitorization using a high strain fiber optic sensor. *Journal of Lightwave Technology*, 30(8), 1085–1089. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2169233>
- Bremer, K., Alwis, L. S. M., Weigand, F., Kuhne, M., Heibig, R., & Roth, B. (2019). Functionalized carbon reinforcement structures with optical fibre sensors for carbon concrete composites. In 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC) (p. 1). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8872285>

- Camas-Anzueto, J. L., et al. (2023). Simple configuration of a fiber optic sensor for measuring deflection in concrete beams. *IEEE Sensors Journal*, 23(7), 6840–6848. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3242584>
- Chen, M., Li, B., Masoudi, A., Bull, D., & Barton, J. M. (2020). Distributed optical fibre sensor for strain measurement of reinforced concrete beams. In *2020 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)* (pp. 102–107). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICITBS49701.2020.00030>
- Choi, H. S., Jo, H., Cho, S., Mechitov, K. A., Kim, R. E., Li, J., & Spencer, B. F. (2014). Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using wireless smart sensor technology: Data analyses. *Smart Structures and Systems*, 13(5), 901–919.
- Coetzee, W. Z., Van Eck, S., Grobler, M. F., Vannucci, M. J., Manuel, R. M., & Bester, J. (2015). Embedded fibre Bragg gratings to measure shrinkage during the early age of concrete. In *AFRICON 2015* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AFRCON.2015.7331957>
- Farhat, M., Yassin, M. H., Nahas, M., & Bilal, A. (2024). Fiber Bragg grating sensors vs strain gauges for static bridge monitoring system. In *2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/I2MTC60896.2024.10560727>
- Halim, M. I., Mbata, M., Bester, J., & Grobler, M. (2019). Implementation of an optical fiber sensor system to monitor the response of reinforced concrete due to formwork removal. In *2019 IEEE AFRICON* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AFRICON46755.2019.9133856>
- Huang, L., Li, Y., Chen, S., Zhang, Q., Song, Y., Zhang, J., & Wang, M. (2020). Building safety monitoring based on extreme gradient boosting in distributed optical fiber sensing. *Optical Fiber Technology*, 55, Article 102149.
- Islam, M. R., Bagherifaez, M., Ali, M. M., Chai, H. K., Lim, K.-S., & Ahmad, H. (2015). Tilted fiber Bragg grating sensors for reinforcement corrosion measurement in marine concrete structure. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(12), 3510–3516. <https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2459511>
- Kengesbayeva, S., Smailov, N., Tashtay, Y., Kiesewetter, D., Malyugin, V., & Amir, A. (2024). Research of deformation of concrete structures using fiber optic sensors and Bragg gratings. In *International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech* (pp. 15–18). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EExPolytech62224.2024.10755828>
- Neftissov, A., Kirichenko, L., Kazambayev, I., Zvontsov, A., Lisnevskiy, V., & Kassenov, K. (2024). Development of a prototype of fiber-optic health monitoring of the system of extended reinforced concrete facilities. In *2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)* (pp. 536–541). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIST61555.2024.10629443>
- Senkans, U., Braunfelds, J., Spolitis, S., Bobrovs, V., & Porins, J. (2023). Analysis of FBG based sensing for infrastructure structural health monitoring applications. In *2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)* (pp. 744–753). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PIERS59004.2023.10221324>
- Smailov, N., Koshkinbayev, S., Aidana, B., Kuttybayeva, A., Tashtay, Y., Aziskhan, A., Arseniev, D., Kiesewetter, D., Krivosheev, S., Magazinov, S., et al. (2024). Simulation and measurement of strain waveform under vibration using fiber Bragg gratings. *Sensors*, 24, Article 6194. <https://doi.org/10.3390/s24196194>
- Smailov, N., Zhadiger, T., Tashtay, Y., Abdykadyrov, A., & Amir, A. (2024). Fiber laser-based two-wavelength sensors for detecting temperature and strain on concrete structures. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 7(4), 1693–1710. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v7i4.3481>
- Udd, E., & Spillman, W. B. (2011). *Fiber optic sensors: An introduction for engineers and scientists* (3rd ed.). Wiley.

- Umar, A., Muoka, A., Amuda, A. G., Sanusi, A., Dayyabu, A., & Mambo, A. D. (2021). Mechanical influence of steel binding wires as fiber reinforcement in concrete. In 2021 1st International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS) (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMEAS52683.2021.9692379>
- Varyshchuk, V., & Bobitski, Y. (2016). An experimental study of utilizing multimode polymer fiber for load detection. In 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET) (pp. 399–401). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TCSET.2016.7452069>
- Ye, X. W., Su, Y. H., & Han, J. P. (2014). Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review. The Scientific World Journal, Article 652329, 11 p.
- Zhang, S., Liu, B., & He, J. (2019). Pipeline deformation monitoring using distributed fiber optical sensor. Measurement, 133, 208–213.
- Zhang, Y., & Ansari, F. (2005). Mechanics of bond and interface shear transfer in concrete structures instrumented with embedded optical fibers. Journal of Engineering Mechanics, 131(4), 377–387.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Смайлов Нуржигит Куралбаевич – Ph.D. докторы, Академик
Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану
институты, Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу
университеті, Алматы, Қазақстан

Смайлов Нуржигит Куралбаевич – Доктор Ph.D, академик
О.А.Джолдасбеков Институт механики и машинного обучения
Казахского национального исследовательского университета
имени К.И.Сатпаева, Алматы, Казахстан

Smailov Nurzhigit Kuralbaevich – Ph.D, Academician O.A.
Zholdasbekov Institute of Mechanics and Machine Learning,
K.I.Satbayev Kazakh National Research University, Almaty,
Kazakhstan

e-mail: n.smailov@satbayev.university

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>



Куттыбаева Айнур Еремеккалиевна – экономика
ғылымдарының кандидаты, Академик Ө.А. Жолдасбеков
атындағы Механика және машинатану институты, Қ.И.Сәтбаев
атындағы Қазақ ұлттық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

Куттыбаева Айнур Еремеккалиевна – кандидат экономических
наук, академик О.А.Джолдасбеков Институт механики и
машинного обучения, Казахский национальный исследова-
тельский университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

Kuttybayeva Ainur Ermekkaliyevna – Candidate of Economic
Sciences, Academician O.A. Zholdasbekov Institute of Mechanics and
Machine Learning, K.I.Satbayev Kazakh National Research
University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: a.kuttybayeva@satbayev.university

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7281-3690>



Әмір Азисхан Әшімханұлы – техника технологиялар бакалавры, Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

Әмір Азисхан Әшімханұлы – бакалавр техники технологий, Институт механики и машинного обучения имени академика О.А.Джолдасбекова, Казахский национальный исследовательский университет имени К.И.Сатпаева, Алматы, Казахстан

Amir Aziskhan Ashimkhanuly – bachelor of Engineering Technology, Academician O.A. Zholdasbekov Institute of Mechanics and Machine Learning, K.I.Satbayev Kazakh National Research University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: aziskhan.amir@satbayev.university

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4001-3745>



Базарбай Айдана Мұратқызы – экономика ғылымдарының кандидаты, Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

Базарбай Айдана Муратқызы – кандидат экономических наук, академик О.А. Джолдасбеков Институт механики и машинного обучения Казахского национального исследовательского университета имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

Bazarbay Aidana Muratkyzy – Candidate of Economic Sciences, Academician O.A. Zholdasbekov Institute of Mechanics and Machine Learning, K.I. Satbayev Kazakh National Research University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: a.bazarbay@satbayev.university

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8366-0060>



Секенов Бейбарыс Нұртайұлы – техника ғылымдарының магистрі, Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

Секенов Бейбарыс Нуртайұлы – магистр технических наук академик О.А.Джолдасбеков Институт механики и машинного обучения Казахского национального исследовательского университета имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

Sekenov Beibarys Nurtayuly – Master of Engineering Sciences, Academician O.A. Zholdasbekov Institute of Mechanics and Machine Learning K.I.Satbayev Kazakh National Research University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: b.sekenov@satbayev.university

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8161-7900>