

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

ISSN 1680-080X (print)
2788-6948 (online)

**Қазақ бас сәулет-құрылыс
академиясының
ХАБАРШЫСЫ**

№3 (93) 2024

**BULLETIN
of Kazakh Leading
Academy of Architecture
and Construction**

**ВЕСТНИК
Казахской головной
архитектурно-
строительной
академии**

Журнал 2001 жылдан бастап шығады
Journal has been publishing since 2001
Журнал издается с 2001 года

Жылына 4 рет шығады
Quarterly journal
Выходит 4 раза в год

Алматы, 2024

РЕДКОЛЛЕГИЯ / EDITORIAL BOARD

Бектурганова Н.Е. / N.Y. Bekturganova / Бектурганова Н.Е. – Бас редактор / Editor-in-Chief/
Главный редактор

Химия ғылымдарының кандидаты, құрылыс технологиялары, инфрақұрылым және менеджмент факультетінің профессоры, жоғарғы оқу орнынан кейінгі білім беру департаментінің директоры, ХБК, Алматы, Қазақстан / Candidate of Chemical Sciences, Professor of Faculty of Construction Technologies Infrastructure and Management, Director of the Department of Postgraduate Education, ИЕС, Алматы, Kazakhstan / Кандидат химических наук, профессор факультета строительных технологий, инфраструктуры и менеджмента, директор департамента послевузовского образования, МОК, Алматы, Казахстан
<https://orcid.org/0000-0003-3062-3340>, e-mail: n.bekturganova@mok.kz

Абдрасилова Г.С. / G.S. Abdrassilova / Абдрасилова Г.С. – Сәулет бөлімінің ғылыми редакторы / Scientific Editor of architecture section / Научный редактор раздела архитектуры
Сәулет докторы, сәулет факультетінің зерттеуші профессоры, ХБК, Алматы, Қазақстан / Doctor of Architecture, Academic Professor, Faculty of Architecture, ИЕС, Алматы, Kazakhstan / Доктор архитектуры, профессор-исследователь факультета архитектуры, МОК, Алматы, Казахстан
<https://orcid.org/0000-0002-3828-9220>, e-mail: g.abdrassilova@kazgasa.kz

Молдамуратов Ж.Н. / Zh.N. Moldamuratov / Молдамуратов Ж.Н. – Құрылыс бөлімінің ғылыми редакторы / Scientific Editor of the Civil Engineering Section / Научный редактор раздела строительства
PhD, қауымдастырылған профессор, жалпы құрылыс факультетінің деканы, ХБК, Алматы, Қазақстан / PhD, Associate Professor, Dean of Faculty of General Construction, ИЕС, Алматы, Kazakhstan / PhD, ассоциированный профессор, декан факультета общего строительства, МОК, Алматы, Казахстан
<https://orcid.org/0000-0002-4573-1179>, e-mail: zhanga_m_n@mail.ru

Құлтаева Ш.М. / S. Kultayeva / Құлтаева Ш.М. – Материалтану бөлімінің ғылыми редакторы / Scientific Editor of the Materials Science Section / Научный редактор раздела материаловедения
PhD, Жоғарғы оқу орнынан кейінгі білім беру департаментінің үйлестірушісі, ХБК, Алматы, Қазақстан / PhD, coordinator of the Department for Science, ИЕС, Алматы, Kazakhstan / PhD, Координатор департамента послевузовского образования, МОК, Алматы, Казахстан
<https://orcid.org/0000-0002-2409-1184>, e-mail: mk1610sh@gmail.com

Есімханова А.Е. / A.E. Yesimkhanova / Есімханова А.Е. – Техникалық редактор / Technical Editor / Технический редактор
«Құрылыс және сәулет» баспасының редакторы, ХБК, Қазақстан / Editor of the publishing house «Construction and Architecture», ИЕС, Алматы, Kazakhstan / редактор издательства «Строительство и Архитектура», МОК, Алматы, Казахстан
e-mail: idmok_777@mail.ru

Ким Е.В. / Y.-W. Kim / Ким Е.В.

PhD, Сеул Университетінің профессоры, Сеул, Оңтүстік Корея / PhD, professor of the University of Seoul (UOS), Seoul, South Korea / PhD, профессор Университета Сеул, Сеул, Южная Корея
<https://orcid.org/0000-0001-6275-0323>, e-mail: ywkim@uos.ac.kr

Ватин Н.И. / N.I. Vatin / Ватин Н.И.

Т.ғ.д., профессор, С-Петербург политехникалық университеті Құрылыс институтының директоры, Ресей / Doctor of Technical Sciences, professor, director of the Institute of Construction, Russia / д.т.н., профессор, директор Института строительства, С-Петербургский политехнический университет, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-1196-8004>, e-mail: vatin_ni@spbstu.ru

Амандықова Д.А. / D.A. Amandykova / Амандықова Д.А.

Сәулет кандидаты, Дизайн факультетінің деканы, ХБК, Қазақстан / Candidate of Arch., Dean of the Faculty of Disegn, IEC, Kazakhstan / к.арх., декан факультета Дизайна, МОК, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0003-2322-8430>, e-mail: abilmazhin.dina@mail.ru

Куц С. / S. Kuc / Куц С.

Сәулет докторы, Краков технологиялық университетінің профессоры, Польша / Doctor of Architecture, Professor, Krakow University of Technology, Poland / д.арх., профессор Краковского технологического университета, Польша

<https://orcid.org/0000-0002-8106-9215>, e-mail: kuc.sabina@team.busko.pl

Байтенов Э.М. / E. Baitenov / Байтенов Э.М.

Сәулет докторы, Сәулет факультетінің қауымдастырылған профессоры, ХБК, Қазақстан / Doctor of Arch., Associate Professor of the Faculty of Architecture, IEC, Kazakhstan / д.арх., ассоциированный профессор факультета Архитектуры, МОК, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0003-0509-8396>, e-mail: bajte@mail.ru

Әділова Д.Ә. / D. A. Adilova / Адилова Д.А.

Э.ғ.к., ҚТИЖМ факультетінің қауымдастырылған профессоры, ХБК, Қазақстан / Candidate of economic science, Associate Professor of faculty of СТИМ, IEC, Kazakhstan / К.э.н., ассоциированный профессор факультета СТИИМ, МОК, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0001-9904-0464>, e-mail: dadilova65@mail.ru

Бесімбаев Е.Т. / Ye.T. Bessimbayev/ Бесимбаев Е.Т.

Т.ғ.д., Сәтпаев Университетінің профессоры, Қазақстан / Doctor of Technical Sciences, Professor of the Satpayev University, Kazakhstan / д.т.н., профессор Сатпаев Университета, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0002-0869-3513>, e-mail: eric.bessimbaev@mail.ru

Ыбраимбаева Г.Б. / G.B. Ibraimbayeva / Ибраимбаева Г.Б.

Т.ғ.к., ҚТИЖМ факультетінің қауымдастырылған профессоры, «Құрылыстағы материалдар технологиясы және менеджмент» кафедрасының меңгерушісі, ХБК, Қазақстан / Candidate of technical science, Associate Professor of the Faculty of СТИМ, Head of the Department «Materials Technology and Management in Construction», IEC, Kazakhstan / к.т.н., ассоциированный профессор факультета СТИМ, заведующий кафедрой «Технология материалов и менеджмент в строительстве», МОК, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0002-4778-5664>, e-mail: gulnazik1971@mail.ru

Глаудинова М.Б. / M.B. Glaudinova / Глаудинова М.Б.

Сәулет докторы, Сәулет факультетінің профессоры, "ЮНЕСКО" кафедрасының меңгерушісі, ХБК, Қазақстан / Doctor of architecture, Professor of Faculty of Architecture, Head of the «UNESCO» Department, IEC, Kazakhstan / Доктор архитектуры, профессор факультета архитектуры, заведующий кафедрой «ЮНЕСКО», МОК, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0002-5848-3100>, e-mail: mehris@mail.ru

Туяқаева А.К. / А.К. Tuayakayeva / Туяқаева А.К.

Сәулет кандидаты, Сәулет факультетінің қауымдастырылған профессоры, ХБК, Қазақстан / Candidate Arch., Associate Professor, ИЕС, Kazakhstan / к.арх., ассоциированный профессор факультета Архитектуры, МОК, Казахстан
<https://orcid.org/0000-0003-2322-8430>, e-mail: tainagul@yandex.ru

Хомяков В.А. / V.A. Khomyakov / Хомяков В.А.

Т.ғ.д, «ҚазҚСҒЗИ» АҚ-нің қауымдастырылған профессоры, ХБК, Қазақстан / Doctor of technical science, Associate Professor of JSC “KazSRDICA”, Kazakhstan / Д.т.н., ассоциированный профессор АО «КазНИИСА», МОК, Казахстан
<https://orcid.org/0000-0003-0384-7170>, e-mail: khomyakov57@list.ru

Шокбаров Е.М. / Y.M. Shokbarov / Шокбаров Е.М.

Т.ғ.к., АҚ «ҚазҚСҒЗИ» өндіріс директоры, Қазақстан / Candidate of technical science, Director of Production in JSC “KazSRDICA”, Kazakhstan / К.т.н., директор по производству АО «КазНИИСА», Казахстан
<https://orcid.org/0000-0003-1188-430X>, e-mail: eshokbarov@kazniisa.kz

Жакипбаев Б.Е. / B.Y. Zhakipbayev / Жакипбаев Б.Е.

PhD, Мұхтар Әуезов атындағы ОҚУ қауымдастырылған профессоры, Қазақстан / PhD, Associate Professor of the Auezov University, Kazakhstan / PhD, ассоциированный профессор ЮКУ имени Мухтара Ауезова, Казахстан
<https://orcid.org/0000-0002-1412-7796>, e-mail: bibol_8484@mail.ru

Талал Аввад / Talal Awwad / Талал Аввад

PhD, Император Александр I Петербург Мемлекеттік байланыс жолдары университетінің профессоры, Ресей / PhD, Professor of the St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, Russia / PhD, профессор Петербургский Государственный Университет путей сообщения Императора Александра I, Россия
<https://orcid.org/0000-0002-6487-2428>, e-mail: dr.awwad.gfce@gmail.com, dr.awwad@ymail.com

Сабри Моханад Муяд Сабри / Sabri Mohanad Muayad Sabri / Сабри Моханад Муяд Сабри

Т.ғ.к., Санкт-Петербург политехникалық университеті, Ресей / Candidate of technical science, St. Petersburg Polytechnic University, Russia / К.т.н., Санкт-Петербургский политехнический университет, Россия
<https://orcid.org/0000-0003-3154-8207>, e-mail: sabri_mm@spbstu.ru

Пьентек Бартош / Piątek, Bartosz / Пьентек Бартош

PhD, И. Лукасевич атындағы Ресув политехникалық университетінің профессоры / PhD, Professor of the Rzeszow University of Technology, Poland / PhD, профессор Жешувского политехнического университета им. И. Лукасевича, Польша
<https://orcid.org/0000-0001-5824-1892>, e-mail: piatek@prz.edu.pl

Жұмағұлова Р.Е. / R.E. Zhumagulova / Жұмағұлова Р.Е.

Т.ғ.к., ҚТИЖМ факультетінің қауымдастырылған профессоры, ХБК, Қазақстан / Candidate of technical science, Associate Professor of the Faculty of CTIM, ИЕС, Kazakhstan / к.т.н., ассоциированный профессор факультета СТИИМ, МОК, Казахстан
<https://orcid.org/0000-0003-4889-5477>, e-mail: roza_j@mail.ru

Саламзаде Э.А. / E. Salamzade / Саламзаде Э.А.

Өнертану докторы, профессор, Әзірбайжан ҰҒА корреспондент-мүшесі, Әзірбайжан ҰҒА сәулет және өнер институтының директоры / Doctor in art history, Professor, Corresponding Member of NAS of Azerbaijan, Director of Institute of architecture and art of NAS of Azerbaijan / доктор искусствоведения, профессор, член-корреспондент НАН Азербайджана, директор Института архитектуры и искусства НАН Азербайджана
e-mail: ertegin@baku.ab.az

Уйма А. / A.Ujma / Уйма А.

PhD, Ченстохов технологиялық университетінің профессоры, Польша/ Ph.D., Professor of Czestochowa University of technology, Czestochowa / Ph.D., профессор Ченстоховского технологического университета, Польша
<https://orcid.org/0000-0001-5331-6808>, e-mail: adam.ujma@pcz.pl

Шубин И.Л. / I.L. Shubin / Шубин И.Л.

Т.ғ.д., Құрылыс физика ҒЗИ директоры, Ресей сәулет және құрылыс ғылымдары академиясының корреспондент-мүшесі, Ресей / Doctor of Technical Sciences, Director of the Research Institute of Construction Physics, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Russia / д.т.н., директор НИИ строительной физики, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук, Россия
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55353536300>, e-mail: niisf@niisf.ru

Редакция мекенжайы:

«Халықаралық білім беру корпорациясы» ЖШС
050043, Алматы қ-сы, Рысқұлбеков к-сі, 28
Tel. 8(727) 220-81-03, ішкі 1179
Email: science@kazgasa.kz
<https://vestnik.mok.kz/>

Editorial office address:

«International Educational Corporation» LLP
050043, Almaty, Ryskulbekov str. 28
Tel. 8 (727) 220-81-03, ext. 1179
e-mail: science@kazgasa.kz
<https://vestnik.mok.kz/>

Адрес редакции:

ТОО «Международная образовательная корпорация»
050043, г. Алматы, ул. Рысқұлбекова, 28
Tel. 8 (727) 355 10 56, внутр. 1135
e-mail: science@kazgasa.kz
<https://vestnik.mok.kz/>

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА

G.S. Abdrasilova, L.M. Aukhadiyeva Priority directions for the development of regional architecture in Kazakhstan in the 21st century	7
А.А. Корнилова, А.М. Есенбаев Прототипологические аспекты эволюции жилища	23
I.I. Ostapenko, A.A. Bryantsev Prospects for the development of agro-tourism on the territory of the Republic of Kazakhstan	36

СТРОИТЕЛЬСТВО

Ә.Н. Амангелді, А.Н. Мағзум, Т.П. Пентаев, Д.Н. Сулейменова Алматы қаласындағы көпқабатты құрылыстың деформациялану үдерісін зерттеу	50
A.A. Bryantsev, I.I. Ostapenko Analysis of i-beam with corrugated web and technological perforations under static load	62
S.R. Girnis, V.N. Ukrainets, Z.O. Otarbaev, L.V. Gorshkova The impact of tunnel lining on the reaction of the ground surface under the influence of transport loads.....	79
S.Zh. Jumadilova Injection of two-component geopolymer resin for strengthening sandy soils.....	95
Б.К. Дүйсенбеков, Б.Т. Ерімбетов, Б.М. Чалабаев, Я.Б. Құнанбаева, Ф.Х. Аубакирова Шекаралық элементтер әдісімен доғал қабықшаларды есептеу	107
Ж.К. Канатова, С.Ж. Джумадилова, Ф.Б. Темирбекова, И.О. Алиев Исследования влияния армирования геосинтетическими материалами на прочность грунтов в условиях трехосного сжатия и одноплоскостного среза	121
С.Е. Ниетбай, Е.Т. Бесимбаев, Т. Аввад, А.М. Қуанышбай Сәулет ескерткіштерін қорғау үшін топырақ силикатынан геотехникалық сейсмикалық оқшаулауғыштарды қолдану перспективасы	139
А.Н. Хамит, С.С. Үдербаев, К. Байгасов, Г.Б. Ибраимбаева, Ш.М. Култаева ЖЭО күлін күйдірілген күлді малта тас өндірісінде қолдану мүмкіндігін зерттеу	150
S. Kultayeva, E.V. Kurmanbekova Tuning the thermal conductivity of porous silicon carbide ceramics: a review.....	160

UDC 72.036
IRSTI 67.07.03
RESEARCH ARTICLE

PRIORITY DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF REGIONAL ARCHITECTURE IN KAZAKHSTAN IN THE 21ST CENTURY

G.S. Abdrassilova¹, L.M. Aukhadiyeva^{1,*}

¹International Educational Corporation, 050043, Almaty, Kazakhstan

Abstract. *The article offers an in-depth analysis of the key directions in the development of regional architecture in Kazakhstan in the 21st century. Modern architecture evolves under various factors, including environmental conditions, technological advancements, socio-economic realities, and cultural-historical contexts. The late 20th and early 21st centuries have also brought global challenges such as globalisation, environmental crises, technological and anthropogenic disasters, and military conflicts. This research, with its comprehensive approach, plays a crucial role in identifying the factors influencing contemporary architecture in Kazakhstan and determining the future directions for its development. The methodology included comparative analysis, systematisation of information from literary sources, project modelling, and surveys, ensuring the robustness and reliability of the findings. The primary data sources were the works of leading architecture specialists, complemented by an analysis of governmental policy documents, which provided insights into the main state policy directions in architecture. The study identified several critical directions in the development of architecture in Kazakhstan: sustainable development and “green” architecture, the digitalisation of the architectural and construction sector, the adaptive reuse and repurposing of existing buildings, participatory design, and the strengthening of architectural identity, which is crucial in the context of growing globalism. The findings of this research can serve as a foundation for developing new theoretical concepts in regional architecture and can be integrated into architectural educational programmes. These results will also benefit projects related to preserving and restoring architectural monuments, conserving cultural heritage, and adapting it to contemporary needs, enhancing both these objects’ functional appeal and economic value.*

Keywords: *sustainable development, digitalisation of architecture, adaptive architecture, participatory design, architectural identity*

***Corresponding author**

Laura Aukhadiyeva, e-mail: laukhadiyeva@gmail.com

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-01>

Received 10 May 2024; Revised 15 July 2024; Accepted 26 August 2024

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ХХІ ҒАСЫРДАҒЫ ӨңІРЛІК СӘУЛЕТІН ДАМУДЫҢ БАСЫМ БАҒЫТТАРЫ

Г.С. Абдрасилова¹, Л.М. Аухадиева^{1,*}

¹Халықаралық білім беру корпорациясы, 050043, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа. Мақалада ХХІ ғасырдағы Қазақстанның өңірлік сәулетін дамытудағы негізгі бағыттардың талдауы жүргізіледі. Заманауи сәулет, бұрынғыдай, көптеген факторлардың, соның ішінде табиғи-климаттық жағдайлардың, технологиялық жетістіктердің, әлеуметтік-экономикалық шындықтардың және мәдени-тарихи контекстің әсерінен үздіксіз дамып келеді. ХХ ғасырдың аяғы мен ХХІ ғасырдың басында адамзат жаңа сын-қатерлерге тап болды: жаһандану, экологиялық мәселелер, техногендік және антропогендік апаттар, әскери қақтығыстар. Мақаланың мақсаты – заманауи сәулетті сипаттайтын факторларды анықтау және оның әрі қарайғы даму жолдарын белгілеу. Бұл мақсатқа жету үшін салыстырмалы талдау, әдеби дереккөздерді жүйелеу, жобаларды модельдеу және сауалнамалар жүргізуді қамтитын кешенді тәсіл қолданылды. Негізгі дереккөз ретінде сәулет саласындағы жетекші мамандардың ғылыми еңбектері пайдаланылды. Сонымен қатар, мемлекеттік сәулет саласындағы мемлекеттік саясаттың негізгі бағыттарын анықтауға мүмкіндік берген бағдарламалық құжаттар талданды. Зерттеу нәтижелері ХХІ ғасырдағы Қазақстан сәулетінің дамуының бірнеше негізгі бағыттарын анықтауға мүмкіндік берді. Олардың ішінде тұрақты даму және «жасыл» сәулет, сәулеттік-құрылыс саласын цифрландыру, қолданыстағы ғимараттарды бейімдеп қайта пайдалану және қайта бейімдеу, партисипативті жобалау, сондай-ақ жаһандану жағдайында сәулеттік бірегейлікті нығайту сынды маңызды бағыттар ерекше орын алады. Алынған нәтижелер «Сәулет» білім беру бағдарламасы бойынша оқу пәндеріне интеграциялануы мүмкін. Нәтижелер сәулеттік ескерткіштерді қорғау және қалпына келтіру, мәдени мұраны сақтау және оны қоғамның қазіргі қажеттіліктеріне бейімдеу бойынша жобаларда пайдалы болады, бұл нысандардың функционалдық тартымдылығы мен экономикалық құндылығын арттыруға ықпал етеді.

Түйін сөздер: тұрақты даму, сәулетті цифрландыру, бейімделген сәулет, бірлескен дизайн, сәулеттік сәйкестік.

*Автор-корреспондент

Лаура Аухадиева, e-mail: laukhadiyeva@gmail.com

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-01>

Алынды 10 мамыр 2024; Қайта қаралды 15 шілде 2024; Қабылданды 26 тамыз 2024

УДК 72.036
МРНТИ 67.07.03
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ КАЗАХСТАНА В XXI ВЕКЕ

Г.С. Абдрасилова¹, Л.М. Аухадиева^{1,*}

¹Международная образовательная корпорация, 050043, Алматы, Казахстан

Аннотация. В статье проводится анализ ключевых направлений развития региональной архитектуры Казахстана в XXI веке. Современная архитектура, как и прежде, непрерывно эволюционирует под влиянием множества факторов, включая природно-климатические условия, достижения технического прогресса, социально-экономические реалии и культурно-исторический контекст. Конец XX – начало XXI века поставили человечество перед лицом новых вызовов: глобализация, экологические проблемы, техногенные и антропогенные катастрофы, военные конфликты. Цель статьи – выявить факторы, сопровождающие современную архитектуру и обозначить траектории ее дальнейшего развития. Для достижения поставленной цели использовался комплексный подход, включающий сравнительный анализ, систематизацию информации из литературных источников, моделирование проектов и анкетирование. В качестве основного источника данных использовались научные труды ведущих специалистов в области архитектуры. Дополнительно были проанализированы государственные программные документы, которые позволили выявить основные направления государственной политики в области архитектуры. Результаты исследования позволили выделить несколько ключевых направлений в развитии архитектуры Казахстана в XXI веке. Среди них можно выделить устойчивое развитие и «зелёную» архитектуру, цифровизацию архитектурно-строительной сферы, адаптивное повторное использование и перепрофилирование существующих зданий, партисипативное проектирование, а также укрепление архитектурной идентичности, что особенно важно в условиях нарастающего глобализма. Полученные результаты могут быть интегрированы в учебные дисциплины по образовательной программе «Архитектура». Результаты будут полезны в проектах, связанных с охраной и реконструкцией памятников архитектуры, сохранением культурного наследия и его адаптацией к современным потребностям общества, что способствует повышению функциональной привлекательности и экономической ценности объектов.

Ключевые слова: устойчивое развитие, цифровизация архитектуры, адаптивная архитектура, соучастующее проектирование, архитектурная идентичность.

* Автор-корреспондент
Лаура Аухадиева, e-mail: laukhadiyeva@gmail.com

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-01>

Поступило 10 мая 2024 г.; Пересмотрено 15 июля 2024 г.; Принято 26 августа 2024 г.

1 INTRODUCTION

The development trends of regional architecture in Kazakhstan during the second half of the 20th century and the early 21st century were shaped by significant changes brought about by globalisation. Globalisation, encompassing economic, political, cultural, and religious aspects, has led to worldwide integration and uniformity, posing a threat to the unique architectural identity of Kazakhstan. In a multipolar world, it is crucial to identify the directions for developing Kazakhstan's architecture as part of Central Asia to preserve its national characteristics. The "Strategic Development Plan of the Republic of Kazakhstan until 2025" forecasts that the country's spatial development will focus on increasing economic and demographic density and strengthening internal connectivity by creating "economic corridors". These measures are intended to ensure the sustainable development of architecture while preserving its regional distinctiveness. (**The Strategic Development Plan until 2025, 2021**). Table 1 demonstrates that Kazakhstan's spatial development policy until 2025 aims to create a resilient settlement framework based on strategically essential directions.

Table 1

The Main Directions of Spatial Development Policy in Kazakhstan until 2025.

Key Directions	Description
Focus on "Growth Points"	Emphasis on urban agglomerations, large cities (regional centres), mono-towns with a population of over 50,000 people, small towns near large cities and border areas, and key rural settlements.
Formation of "Economic Corridors"	Development of industrial potential in the country's northern, southern, and southeastern regions.
Unleashing the Industrial Potential of Regions	Development of industrial potential in the country's northern, southern, and southeastern regions.
Reformatting Industry	The transition from resource-based to processing industries in the western, central, and central-eastern regions for sustainable economic development.

A strategically sound and systematic urban development policy will undoubtedly enhance living environments and the material space of settlements in Kazakhstan. As a crucial component of the material environment, architecture encompasses buildings, structures, infrastructural facilities, and their complexes, which play a pivotal role in shaping the urban landscape. Throughout history, architects have aspired to forecast the future, designing "ideal" cities and creating unique structures incorporating the latest technologies. When analysing the trends in regional architecture in Kazakhstan, it is impossible to overlook the connection with the concepts of region, regionalism, and regionality, as well as their opposite phenomena, such as globalisation and the emergence of a new global order. These processes, unfolding in the early 21st century, inevitably influence the formation of global architecture, reflecting new forms of interaction between local and global contexts (**Beck, 1999**).

In contemporary globalisation, many local cultures strive to revive and preserve their traditions, emphasising their uniqueness and distinctiveness. This serves as a counter-reaction to globalisation, which often leads to the levelling and unification of cultural characteristics. The paradox of mass culture lies in the fact that, as standardisation processes intensify, interest in ethnic specificity grows. Thus, ethnocultural elements become tools for preserving identity and valuable resources in the global economy, illustrating society's desire to maintain uniqueness in an increasingly globalised world (**Malinovsky, 2013**).

2 LITERATURE REVIEW

The current state of global architecture is significantly shaped by the prognostic research of leading scholars. This work draws on the contributions of contemporary authors who comprehensively understand current architectural trends and concepts.

One critical source is Jakub Wuek's "Myths and Utopias of 20th Century Architecture" (1990). In it, the author analyses architectural concepts and trends in the 20th century, establishing parallels with the sociocultural changes that influenced these practices.

N.A. Saprykina's monograph "Foundations of Dynamic Form Formation in Architecture" (2005) analyses contemporary trends in architecture related to the adaptability of architectural forms to societal demands. The author examines both historical and modern examples of architectural projects capable of adapting to environmental conditions through dynamic spatial adaptation. The work also identifies key features of dynamic form creation and approaches to organising artificial environments using the latest technological innovations.

The works examine the development pathways of residential architecture, considering typology and socio-economic requirements (**Generalov, 2009**).

The document "Forecast for the Development of Fundamental Research in the Field of Architecture, Urban Planning, and Construction Sciences until 2030", was published by RAASN and developed with the participation of leading specialists in architecture (**Illichev et al., 2009; Rappoport et al., 1990; Khan-Magomedov, 2009**), outlines the main directions for fundamental research in architecture and urban planning. The document also proposes solutions to global ecological and energy problems through the application of architectural and urban planning systems.

A significant contribution to understanding contemporary problems and trends in architecture has been made in the works of Esaulov G.V., particularly in the article "Contemporary Problems and Trends in Architecture" (**Esaulov, 2013**), the author addresses issues such as the development of new typologies and the creation of humane environments, the construction of new types of buildings for various population groups, the transition to rating systems for assessing building quality, project management technologies, the formation of service systems for the population, heritage conservation, the enhancement of energy efficiency and environmental sustainability of buildings, as well as the impact of computers as a design tool on architectural creativity.

The article, which focuses on the image characteristics of architecture under innovative technological solutions, provides a detailed analysis of contemporary architectural constructions, including examples from both foreign and domestic authorial architecture (**Issabayev, 2022**). The work emphasises the unique features and innovative approaches applied in architectural structures, allowing for the identification of key trends and directions in the development of modern architecture.

In the article "Challenges of Modernity and the Contours of Future Architecture" (**Baitenov, 2023**), predicts the emergence of a self-adjusting morphological framework capable of not only responding to various challenges but also anticipating them through preventive measures. E.M. Baitenov suggests that this concept may become a characteristic feature of post-architectural reality and could, in the future, evolve into a global universal self-adjusting system encompassing all aspects of life support.

E.M. Generalova's dissertation "The Concept of Forming the Architecture of High-Rise Buildings and Symbiotic Complexes" (**Generalova, 2023**) presents a comprehensive analysis of modern trends and approaches to high-rise architecture. The research addresses the theoretical foundations of compact city development, supported by statistical data showing significant urban population growth. The author highlights the uneven distribution of these indicators across countries and regions, emphasising the importance of an individualised approach to urban planning. Special attention is given to the classification of high-rise buildings and complexes based on their functional purpose, facilitating more precise architectural design and implementation. The

satisfaction of material, spiritual, and social needs within high-rise structures is considered critical in determining quality of life.

These works, along with many other publications, collectively provide a theoretical and practical foundation for understanding the current challenges and prospects in the field of architecture.

3 MATERIALS AND METHODS

The methodology of this study examines and theoretically substantiates contemporary approaches in regional architecture, focusing on identifying trends in the socio-economic sphere and their impact on the development of architecture in Kazakhstan. The foundation of the research was an analysis of practical examples of regional architecture, taking into account current trends. Methods such as comparative analysis, systematisation of data from literary sources, project modelling, and surveys were employed to achieve the research objectives. These methods enabled a deeper understanding of the factors shaping the development of modern architecture in Kazakhstan. They facilitated forecasting its future trajectories, considering global and local influences.

4 RESULTS AND DISCUSSION

As both a science and a practice of shaping living environments, architecture is intricately connected to the changes occurring within socio-economic, cultural, and political spheres. Despite the systematic nature of design and construction processes, researchers continually strive to forecast specific trends in architectural development. The comparison, systematisation, and synthesis of various theories allow us to draw conclusions that help to chart the future trajectory of architecture in Kazakhstan. Our research identified five factors that will exert the most significant influence on the formation of modern regional architecture in Kazakhstan: sustainable development and “green” architecture, the digitalisation of the architectural and construction sector, adaptive reuse and repurposing of buildings, participatory design and the strengthening of architectural identity in contemporary conditions.

4.1 SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND “GREEN” ARCHITECTURE

Kazakhstan’s state programmes have declared that “the policy in the field of ‘green’ economy and environmental protection is aimed at improving the quality of natural resources, developing alternative energy sources, adapting to climate change, and decarbonisation and enhancing the economy’s energy efficiency. The main outcome will be an improvement in the quality of life for the population, environmental safety, reduced environmental risks and deficits, sustainable development, and increased competitiveness” ([Government of the Republic of Kazakhstan, 2019](#)).

From 2015 to 2024, the UNDP, in collaboration with the Ministry of Industry and Construction of Kazakhstan and with support from the Global Environment Facility, implemented a project to improve energy efficiency in the housing and utilities sector, which consumes 34 per cent of all energy in the country. The modernisation of multi-apartment residential buildings, approximately 60,000 of which require enhanced energy efficiency, will necessitate investments of \$5-10 billion. Most of these buildings were constructed between 1960 and 1990, and their restoration is crucial for the sustainable development of cities ([United Nations Development Programme, 2023](#)).

Kazakhstan’s state policy on energy efficiency implementation, not only at the operational stage of buildings but also during design and construction, is focused on improving the sustainability of buildings and structures, the level of comfort in living environments, reducing greenhouse gas emissions, improving the ecological situation, and, overall, enhancing the quality of life for the country’s population. One widely recognised factor impacting the natural environment is

the built environment of settlements. Globally, it is acknowledged that sustainable development can be bolstered by the use of “green” technologies in architecture and construction.

Buildings constructed using green technologies enable owners to save up to 90% on utility costs and increase business margins. However, in Kazakhstan, there are very few genuinely eco-friendly buildings. Among these are the 6-story eco-office of the “Uchet” group of companies in Almaty (Belyalov, 2019), and three “green” buildings managed by Global Development (Talan Towers in Nur-Sultan, Park View Office Tower, and PRIME Business Park in Almaty) (Global Development Center, 2024).

At the end of 2020, Knight Frank estimated that more than 120,000 buildings worldwide were certified according to green standards. Leading cities include Abu Dhabi (22,400 buildings), Chicago (4,400), and London (3,000). The British BREEAM and American LEED standards are the leaders in “green” certification in Kazakhstan and globally. These construction assessment methodologies, which emerged in the 1990s, primarily aim to reduce environmental impact.

The American WELL and FitWel certificates appeared in the 2010s, focusing on how constructed buildings affect people’s well-being. For instance, these standards require developers to ensure that each office zone has natural light at a specific angle and also dictate the types of food that should be served in buildings (e.g., foods without trans fats and with minimal sugar) (Kachalova, 2021).

Unfortunately, there are still under twenty projects with BREEAM or LEED certifications in Kazakhstan. Typically, these business centres target foreign tenants whose corporate standards require renting “green” offices.

Kazakhstan attempted to develop its own “green” certificate in the run-up to EXPO-2017: market participants formed the non-profit organisation KazGBC, which became part of the global World Green Building Council (WorldGBC). With the support of international experts, KazGBC developed the domestic environmental assessment system “Өмір” (“Life”). By 2020, it was planned to certify 200 buildings and train a thousand specialists in green construction. However, by 2021, only four buildings had received the pilot domestic certificates—Park View Office Tower, Green Tower, MEGA Silk Way, and Ergodom. The project was later suspended due to insufficient funding.

In the European Union and the United States, the driving forces behind green progress are the high cost of electricity and government policies. Governments in many countries require developers to certify buildings to minimum standards and provide low-cost financing for green projects.

In Kazakhstan, the relatively low cost of energy and the absence of legislative requirements allow investors and designers to overlook the construction of energy-efficient buildings. Transitioning to eco-standards must become economically attractive for investors, and government support is essential. Both new incentive programs and adjustments to existing legislation are needed to ensure effective collaboration.

Experts believe that a programme requiring all municipal buildings to be energy-efficient, at least to a minimal standard, could spur the development of green technologies in the country. Currently, two-thirds of municipal projects are constructed as cheaply as possible, forcing contractors to eliminate technological solutions from their designs. According to market participants, if the Kazakh authorities begin actively promoting green projects now, the country will see results in 10–15 years (Kachalova, 2021).

4.2 DIGITALIZATION OF THE ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION INDUSTRY

The concept of the digital economy is increasingly gaining traction worldwide, influencing the development of architecture. Based on an analysis of design practices, the use of digital technologies in architecture can be categorised into two groups: software tools as design instruments and digital technologies as elements of structural, technical, functional, and form-shaping characteristics of buildings and structures (Abdrasilova et al., 2019).

In 2018, Kazakhstan identified vital points in the comprehensive “Digital Kazakhstan” programme to address urban planning and urban regulation challenges: “Modern technologies offer effective solutions to the problems of rapidly growing megacities. It is essential to comprehensively implement urban environment management based on the Smart City concept and develop competencies for those moving to cities. Globally, there is an understanding that cities, rather than countries, compete for investors. They choose not a country, but a city where it is comfortable to live and work. Therefore, based on Astana’s experience, it is necessary to establish a ‘benchmark’ standard for Smart City and begin spreading best practices and sharing experiences among the cities of Kazakhstan”.

The “Digital Kazakhstan” programme outlines what needs to be done for successful navigation and adaptation in the new world—the world of the Fourth Industrial Revolution in the context of the digital economy. Experts define the digital economy as one in which “a cyber-physical system serves as the production complex, a production system that creates products and services, ensuring human life and comfort” (**Digital Economy – New Opportunities for Business, 2024**).

Today, it is difficult to imagine design work without software products, which are widely used not only in architectural design but also in all related technical fields (building and structure calculation and design, engineering systems, etc.).

Widely used virtual tools for architectural design include AUTOCAD, a two—and three-dimensional computer-aided design and drafting system developed by Autodesk; Rhinoceros, a commercial software for three-dimensional NURBS modelling; and REVIT, a software package implementing the principle of Building Information Modelling (BIM). All elements of virtual design are integrated into modern systems, such as BIM (**Autodesk, 2022**).

Projects for modern buildings and complexes in the digital economy typically include elements of innovative technologies, such as Smart House and Smart City.

The concept of a Smart House includes a well-organized internal space and a system for managing life processes.

A high concentration of “smart buildings” allows for the creation of a Smart City—a planning unit with a high level of architecture, construction, and a comfortable spatial environment.

In 2019, the “Benchmark Standard for Smart Cities of the Republic of Kazakhstan” was developed and approved, which contains recommendations and establishes unified approaches to building smart cities using information and communication technologies (**Digital Kazakhstan, 2022**).

The “National Development Plan of the Republic of Kazakhstan until 2025” specifies that “Digital technologies will be integrated into urban life, including education, transportation, housing and communal services, healthcare, security, social services, city management, construction, business development, tourism, and environmental protection” (**The Strategic Development Plan until 2025, 2021**).

Since 2023, Kazakhstan has enforced requirements for the mandatory use of BIM in the design of technologically complex objects and the digitalisation of public construction services (**Digitalization of Construction in Kazakhstan 2023: Transitioning to BIM**).

The transition of the construction industry to BIM was declared in Kazakhstan in 2015, and a seven-year preparatory work was carried out, including the adaptation of legislation to the introduction of Building Information Modelling (which in Kazakhstan is referred to as TIMSO—Technology of Information Modelling of Construction Objects). In January 2023, requirements for the mandatory use of BIM in designing technologically complex objects came into force: many construction market participants have already restructured their business processes in anticipation of the introduction of information technologies. Initially, this list included 24 types of objects, such as high-rise multifunctional complexes and residential buildings requiring special design solutions, clinics, schools, and kindergartens of specific parameters. It is expected that as a result of the implementation of pilot projects, by 2025, the transition to TIMSO will become mandatory for

technically complex objects. A “State Bank of Information Models” has been created to collect and store data related to TIMSO objects.

According to a survey conducted in February 2024, 48% of companies use 3D modelling, and 12% plan to use it. However, 40% of companies are not yet ready to implement information modelling. The main software used in Kazakhstan for creating 3D models includes AutoCAD, modelling, and 12% plan to use it, but at the same time, 40% of companies are not yet ready to implement information modelling readiness to transition to an information system, and 70% of companies have the necessary equipment to work with 3D models (**Digitalization of Construction in Kazakhstan, 2024**).

Kazakhstan's significant achievements include electronic services implemented in the construction sector: “Unified Geoportal of Infrastructure Data of the State Urban Planning Cadastre”, “E-PSD”—a system designed for interaction between customers and expert organizations based on the “one-stop-shop” principle, “e-QURYLYS”—a tool for improving quality control and transparency in construction in the country, “e-SHANYRAQ”—a system for increasing the transparency and efficiency of the activities of housing and communal services, the online platform for building materials “material.kz”, “Tokenization of the real estate market and blockchain” and “Internet of Things (IoT)” (**Digitalization of Construction in Kazakhstan, 2024**).

By 2025, the government of Kazakhstan aims to be among the top 20 in the UN's e-Government Development Index, the top 50 in the B2C (Business to Consumer) e-Commerce Index, and the top 40 countries in the Information and Communication Technology Development Index (**Digital Kazakhstan, 2022**).

One of the latest data management technologies is “the development and implementation of machine learning (self-learning systems) and neural networks, which are the first step towards the creation of artificial intelligence” (Government of the Republic of Kazakhstan, 2019). Currently, just a few years after this declaration, we are all witnessing that ChatGPT is being used not only by university students but also by schoolchildren to create architectural and graphic sketches with artificial intelligence.

4.3 ADAPTIVE REUSE AND REPURPOSING OF BUILDINGS

A significant portion of the buildings constructed over the past decades constitute the material fabric of settlements. Despite their physical durability, many of these structures have become obsolete, failing to meet modern functional requirements and societal needs. In some cases, it may be more economical to demolish a building and construct a new one. However, from an environmental perspective, the demolition of all old buildings is not feasible; it is more sustainable to adapt these structures to new conditions, integrate them into the modern urban context, and repurpose them for new functions. This approach allows for the preservation of their historical value while simultaneously meeting contemporary demands.

Efforts to adapt buildings to new functions contribute to the enhancement of the urban environment, revitalizing peripheral areas and creating new compositional focal points. Adaptation is carried out in close alignment with the existing urban context, ensuring coherence with the development of the surrounding residential and public spaces. The adaptation process involves extensive preliminary research and must comply with current regulatory standards concerning the structural integrity of existing constructions, as well as fire safety, seismic resilience, environmental sustainability, accessibility for all population groups, and other considerations.

The term “adaptive architecture” was first introduced in the late 1960s when spatial design challenges began to be addressed using cybernetics (**Negroponte, 2014**). Adaptive architecture entails the incorporation of interactive systems into the core structural elements and the close integration of related fields, such as building energy efficiency theory and the dynamics of architectural objects: “By embedding responsive technologies into the building’s structural framework, architects can directly link the building’s form to environmental changes. This approach

allows for a rethinking of traditional principles in the creation and subsequent operation of architectural objects” (**Interactive Architecture: Adaptive World, 2016**).

The contemporary understanding of architectural adaptability extends beyond merely adapting to new functions; it involves a deep recognition of the potential of such buildings, whose structure is permeated with interactive technologies. An example of this concept is the “Hypercube” project, a building constructed in the Skolkovo Innovation Centre in 2012, designed by architect Boris Bernaskoni (**Creator of the Hypercube, 2013**).

Adaptive buildings challenge conventional principles of architectural creation and their future use (**The Goal Is to Create an Immortal Building: In Conversation with Boris Bernaskoni, 2019**).

4.4 PARTICIPATORY DESIGN

One of the most effective tools in contemporary design is the active involvement of the public in the discussion, modification, and development of new projects. Citizen participation is facilitated through various means, such as sociological surveys, meetings between designers and residents, and interactions between volunteer organizations and the community.

“...In Kazakhstan, there is still no system for analysing public opinion in the field of architecture and urban planning. As a result, insufficient attention is given to the issue of public involvement in urban planning decisions”, noted one of the authors of this article nearly a quarter of a century ago (**Abdrassilova, 2015**).

Currently, methods for gathering public opinion, such as surveys and resident meetings, are becoming increasingly common in Kazakhstan to better understand the preferences of the population on pressing urban issues.

The participatory design methodology was employed by one of the authors of this article during the development of a project for the reconstruction of the facade of the “Three Heroes” residential complex, organized by the Almatygenplan Research Institute, in 2024. Students from two universities—KazGASA and AlmaU—under the guidance of mentors conducted a pre-project study of the site and developed a design proposal. This event stands out in contemporary architectural practice in Almaty due to its uniqueness, as it not only provided an opportunity to engage with research methods but also created a platform for active exchange of ideas and experience in architectural design (**Three Heroes, 2023; The Village Kazakhstan, 2019**).

The opinions gathered during the survey became the foundation of the project and significantly enhanced the understanding of the residents’ expectations and needs. In the first phase of the study, conducted by the Q-Lab department of the Almatygenplan Research Institute using a detailed questionnaire, it was revealed that almost all residents of the complex (95.5%) supported the idea of reconstruction.

The most daring ideas for the reconstruction emerged within Q-Lab. Residents, delegates, architects, urban planners, designers, and students from KazGASA and AlmaU expressed their thoughts on the potential for creative concepts: glazing of the three towers, adding murals on certain surfaces, creating public space on the roof, and more.

Overall, the results of the analysis and the development of the reconstruction project for the “Three Heroes” residential complex in Almaty demonstrate the value of participatory design as a key component of a comprehensive and balanced approach within the interconnected relationship between designers and users.

4.5 FORMATION OF ARCHITECTURAL IDENTITY IN MODERN CONDITIONS

Architecture in the 21st century is enriched by new types of buildings and structures. Unconventional solutions in modern architecture enhance the perception of forms and grant architectural objects the special status of “new symbols” within the urban landscape.

An analysis of projects that have gained recognition within the professional community reveals that regional characteristics are becoming increasingly evident in modern Kazakhstani architecture, reflecting the country's natural and climatic features as well as its cultural traditions (Abdrassilova, 2022). A striking example of how contemporary architecture embodies spiritual and cultural values through artistic expression, forms, details, and metaphors can be seen in the works of Bek Ibraev, Saken Narynov, and other modern Kazakhstan's architects (Abdrassilova & Aukhadiyeva, 2021).

The architecture of independent Kazakhstan is integrated into the global creative process while striving to preserve its regional uniqueness. This requires a comprehensive approach to environmental development, ensuring the unity of architectural solutions for buildings and elements of the urban space that carry regional cultural significance.

In the work of G. S. Abdrassilova and E. T. Danibekova, a comparison was made between large public buildings from the Soviet era, which significantly shaped the architectural appearance of Kazakhstani cities, and post-Soviet structures with similar functional purposes. The comparison between these two periods highlighted the distinctive features of the architectural language. During the Soviet period, the politicization of all aspects of life, including architecture, influenced the design of public buildings—traditionally grand, employing standardized construction techniques and elements. Only a few unique structures received architectural treatment that incorporated national motifs, such as domes, pylons, ornamental grids and stained glass, decorative elements, and stylized stalactites, which were “replicas” of regional construction techniques (Abdrassilova & Danibekova, 2021).

The study showed that “the stimuli for the transformation of Kazakhstani architecture at the turn of the 20th and 21st centuries were socio-economic and cultural-historical changes. A comparison of Kazakhstani architecture from the Soviet and post-Soviet periods demonstrates significant changes in the field, driven by economic and technological innovations, leading to typological and artistic transformations” (Abdrassilova & Danibekova, 2021).

G. S. Abdrassilova notes: “In the context of global trends, architectural responses stimulated by self-identification processes may manifest in various forms:

- the first scenario involves the creation of artistic images in the form of historical tradition, utilizing the attributive characteristics of local architecture;
- the second scenario entails the creation of architectural objects as new phenomena previously uncharacteristic of a particular city or country” (Abdrassilova, 2022).

The migration of architectural ideas in the context of globalization facilitates the “adaptation” of the local cultural context's language to the “visualization methods” of innovative technologies. A new trend involves the creation of unique structures in various parts of the world with architecture that was previously uncharacteristic of the respective country: regional identity manifests in architectural works whose artistic image is associated not with national elements, but with symbols—whether visual (a new interpretation of decor) or spiritual (legends, myths, etc.).

In this case, architectural identity is declared at the highest technological level, serving as a driver of innovative processes in the country's economy. In architecture, the response to such processes is evident in the emergence of a new “language” of form, representing the images of buildings and structures:

- Artistic images in architecture manifest in the form of historical tradition, utilizing the attributive characteristics of local architecture;
- Architectural objects are created as new phenomena, shaping the modern image of a city or country through innovative forms (Abdrassilova & Aukhadiyeva, 2021).

The further advancement of architecture is based not only on external features but also on a qualitative change in approaches to the design and construction of residential and public buildings, taking into account modern technologies.

Architecture plays a crucial role in visual images that serve as “icons” of citizens' self-identification. Architectural identity is visualized through morphology—a system built on the

patterns of form generation of structural elements and their combinations as a stable set of relationships.

Architectural form generation is the process of creating an architectural object that takes into account utilitarian, structural-technical, and aesthetic properties. The focus is on the challenges of organizing the architectural object as a work of art (Rappoport & Somov, 1990). “...Form-generating factors include both material and mental phenomena: in the organization of material morphology—through technological and engineering principles—and in the formation of the informational and emotional impact of the architectural object and its artistic image—through the reflection of many mental phenomena and based on artistic semantics” (Abdrasilova, 2015).

Form generation does not emerge “out of nowhere”; it synthesizes “typical features inherent in socially significant objects of its time”, while simultaneously seeking a new, individual image. “The characteristic features of the environment, figurative, regional, and national traits of architecture provide the basis for creating the typical, while many characteristic factors of material morphology formation and specific site features contribute to achieving individuality. Both groups of features historically transform into each other” (Rappoport & Somov, 1990).

Form necessarily exists within the contexts of environment and culture. Speaking about the form of an architectural object, A. Ikonnikov noted that “form acts as both a material embodiment of information essential for practical activities and spiritual life, and as a carrier of aesthetic value and ideological-artistic content of architectural works” (Ikonnikov, 1986).

In the context of a specific region, the form of architectural structures transmits ideological and artistic content from generation to generation. This cultural “memory” is as important as the utilitarian functions of architecture, contributing to the practical orientation of people, shaping their psychological attitudes, and fostering personal development.

Discussing the importance of the concept of “form generation” for architectural activity, B. Balykbaev emphasises that architecture, unlike other forms of art, is inherently linked to the creation of real objects that provide conditions for human life. In form generation, various properties of an architectural object are complexly correlated, “making it convenient, comfortable, durable, long-lasting, technologically feasible for construction, economical, and, finally, turning it into a work of art. The central theoretical problem of form generation is the relationship between its utilitarian-practical and artistic-image components” (Balykbaev, 2004). The factors of place and time serve as the “nourishing mechanism”, the organising principle for creating a harmonious living environment, and the key to preserving nature. The search for a modern architectural form “...presupposes a profound knowledge of the region’s cultural traditions” (Balykbaev, 2004).

The form generation process in Kazakhstan’s architecture has evolved from ancient times to modern high-tech types of buildings and structures. “Even today, traditional concepts of the local population are reflected in architectural forms, complemented by new combinations, developing and changing following the current demands of culture and technology” (Abdrasilova, 2015).

In the 21st century, form generation will undoubtedly be one of the main trends in the development of regional architecture in Kazakhstan. The architect plays one of the most important roles in this complex process as the professional “source” of new ideas and concepts realised in general development trends. Without delving into the issues of creativity within the confines of this article, we pay tribute to the creative genius of all architects worldwide, particularly Kazakhstan’s architects, who make a tremendous contribution to shaping the identity of our country through the architecture of independent Kazakhstan (Figure 1).

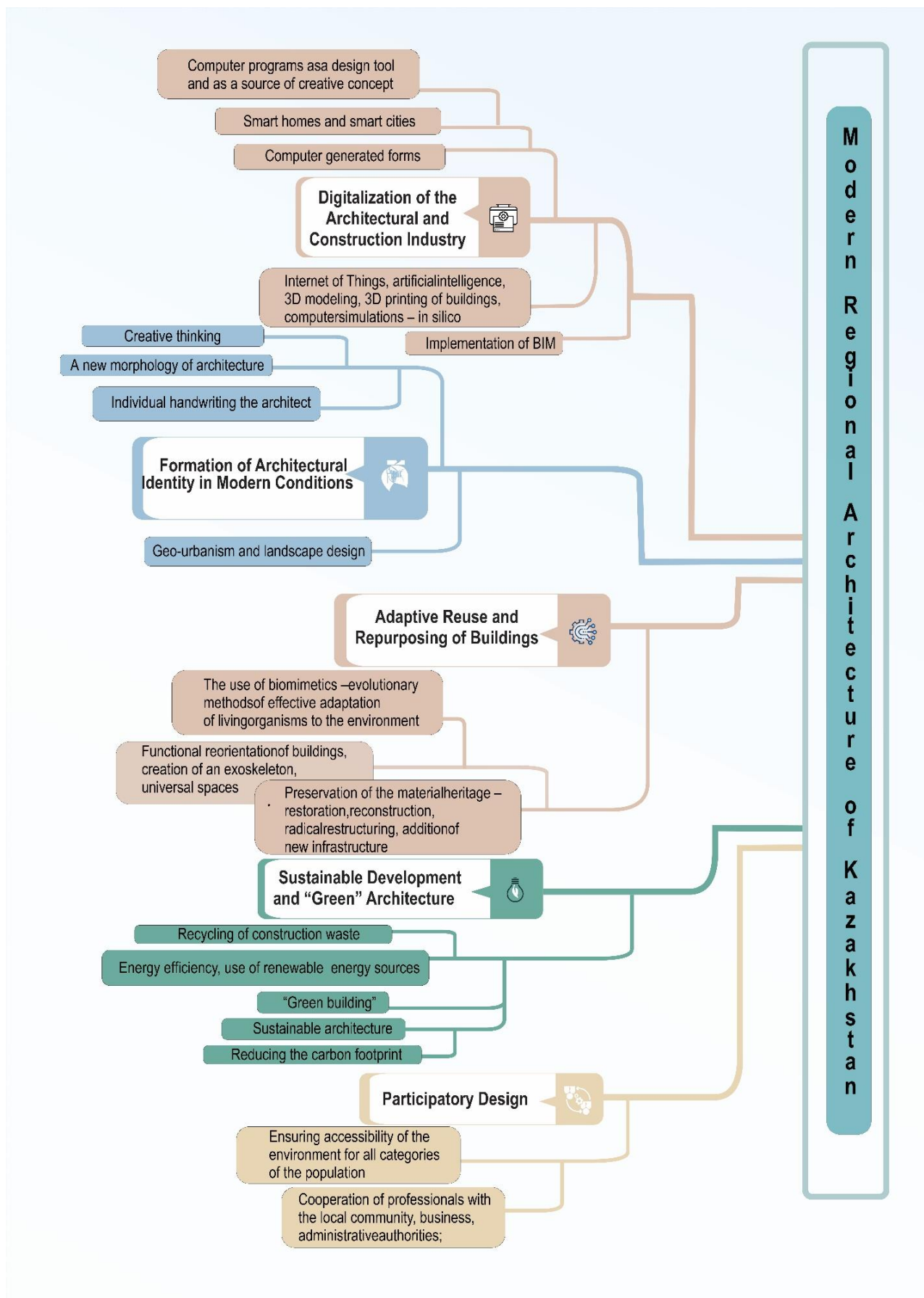


Figure 1 – Prospects for development (author’s material)

5 CONCLUSIONS

International architect communities and UN commissions predict trends that may shape architecture in the near and distant future. By comparing and analysing factors such as the implementation of Kazakhstan's state policy in architecture and architectural activities; professional efforts to create a comfortable living environment; the results of intellectual creativity expressed in completed projects of buildings, structures, and complexes of social and cultural value; integration into international sustainable development programs; and the commitment of the architectural community to the principles of humanity and professional ethics, it becomes possible to identify the future development trends of architecture in Kazakhstan.

In the first quarter of the 21st century, several directions have emerged on the global architectural stage. It is evident that Kazakhstan's architecture, which develops in synchrony with global trends yet incorporates local features, has the potential to advance along these same lines.

These general directions can be further broken down into multiple components, reflecting the complexity of the challenges associated with the prospective development of processes and phenomena in contemporary Kazakhstan's architecture.

In summary, the trends in the development of regional architecture in Kazakhstan may continue to shape this field in the future along several vectors, which in turn branch out into several constituent components:

- Design and construction of environmentally safe buildings that use resources efficiently (sustainable architecture, "green" construction, energy efficiency, use of renewable energy sources, recycling of construction waste, reduction of carbon footprint);

- Digitalization of design processes (computer programs as tools for design and sources of creative concepts, computer-generated forms, implementation of BIM, "smart homes" and "smart cities", the Internet of Things, artificial intelligence, 3D modelling, 3D printing of buildings, computer simulations – in silico);

- Adaptive reuse of buildings (preservation of material heritage – restoration, reconstruction, radical restructuring, addition of new infrastructure; functional repurposing of buildings, creation of exoskeletons, universal spaces; use of biomimicry – evolutionary methods of efficient adaptation of living organisms to the environment);

- Participatory design (collaboration between professionals and the local community, business, and administrative bodies; ensuring accessibility of the environment for all population groups);

- Expression of regional identity through designing and constructing unique buildings that reflect local specificity while incorporating global technological innovations (architect's individual signature, creative thinking, new morphology of architecture, geo-urbanism, and geo-landscape design).

Architecture embodies the entire civilisational experience of humanity, the genius of the creative architect, and a complex integration of related fields of knowledge—engineering, technical, technological, socio-economic, cultural, and historical. Regardless of how architectural trends evolve or how mechanised and digitised the design and construction processes become, at the core of any architectural concept lies the Idea born from the genius of the Architect. This living thought any software or artificial intelligence cannot replace process. It is only the boundless potential of human intelligence that can create humane architecture and living environments for Homo sapiens and the living world around them.

REFERENCES

1. **National Development Plan of the Republic of Kazakhstan until 2025** [cited December 27, 2023] URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/aspr/documents/details/200083>
2. **Beck, U.** (1999). *What is Globalization?* Cambridge: Polity Press.

3. **Malinovsky, A.S.** (2013). Cultural globalization (glocalization). Local and transnational [Kul'turnaya globalizatsiya (glokalizatsiya). Lokal'noye i transnatsional'noye]. Vestnik TSPU, 1(129). Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/kulturnaya-globalizatsiya-glokalizatsiya-lokalnoe-i-transnatsionalnoe> (In Russ.).
4. **Wuek, Ya.** (1990). Myths and Utopias of 20th Century Architecture [Mify i utopii arkhitektury XX veka] (M. Predtechensky, Trans.; V. Glazychev, Ed.). Moscow: Stroyizdat. (In Russ.).
5. **Saprykina, N.A.** (2005). Fundamentals of Dynamic Form Formation in Architecture. [Osnovy dinamicheskogo formoobrazovaniya v arkhitekture]: A Textbook for Universities. Moscow: Arkhitektura. (In Russ.).
6. **Illichev, V.A., & Esaulov, G.V., et al.** (2009). Forecast of the development of fundamental research in the field of architecture, urban planning, and construction sciences until 2030: A summary [RAASN «Prognoz razvitiya fundamental'nykh issledovaniy v oblasti arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'nykh nauk do 2030 goda»]. Academic Bulletin UralNIIProject RAASN, 3. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/raasn-prognoz-razvitiya-fundamentalnyh-issledovaniy-v-oblasti-arhitektury-gradostroitel'stva-i-stroitelnyh-nauk-do-2030-goda> (In Russ.).
7. **Generalov, V.P.** (2009). Specifics of designing high-rise buildings [Osobennosti proyektirovaniya vysotnykh zdaniy]. Samara: Samara State Technical University. (In Russ.).
8. **Esaulov, G.V.** (2013). Modern problems and trends in architecture [Sovremennyye problemy i tendentsii v arkhitekture]. Housing Construction: Scientific, Technical and Production Journal, 11, 20-26. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-problemy-i-tendentsii-v-arhitekture> (In Russ.).
9. **Issabayev, G.A.** (2022). Cantilever architectural structures of modern buildings and structures with a unique image of overcoming gravity [Konsol'nyye arkhitekturnyye konstruksii sovremennykh zdaniy i sooruzheniy s unikal'noy obraznost'yu preodoleniya gravitatsii]. Vestnik KazGASA, 4(86), 7-18. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2022.4-01> (In Russ)
10. **Baitenov, E.M.** (2023). Modern challenges and the outline of the future of architecture [Vyzovy sovremennosti i kontury arkhitektury budushchego]. Vestnik KazGASA, 2(88), 17-26. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.2-03>
11. **Generalova, E.M.** (2023). Kontseptsiya formirovaniya arkhitektury vysotnykh zdaniy i kompleksov simbioticheskogo tipa [Concept of forming the architecture of symbiotic-type high-rise buildings and complexes] [Doctoral dissertation, PDF file]. Retrieved from <http://surl.li/shjnxq>
12. **Government of the Republic of Kazakhstan.** (2019). Strategic Development Plan of the Republic of Kazakhstan until 2025. [cited April 24, 2020]. URL: <https://primeminister.kz/ru/documents/gosprograms/stratplan-2025>
13. **United Nations Development Programme.** (2023). An effective financing model for the modernization of multi-apartment residential buildings introduced in the capital. [cited April 14, 2024]. URL: <https://www.undp.org/ru/kazakhstan/press-releases/effektivnuyu-model-finansirovaniya-dlya-modernizacii-mnogokvartirnykh-zhilykh-domov-vnedrili-v-stolice>.
14. **Belyalov, O.** (2019). Luchshiy ekoofis v Almaty i Kazakhstane [The best eco-office in Almaty and Kazakhstan]. [cited May 24, 2023]. URL: <http://esgrs.org/?p=26066>. (In Russ)
15. **Global Development Centre.** (2024). Global Development. [cited May 23, 2024]. URL: <https://gdc.kz/ru/>.(In Russ)
16. **Kachalova, N.** (2021). Kogda v Kazakhstane prorastet «zelenoye» stroitel'stvo [When will “green” construction take root in Kazakhstan?]. [cited April 20, 2024]. URL: <https://kazgbc.kz/articles/kogda-v-kazaxstane-prorastet-zelenoe-stroitelstvo>. (In Russ)

17. **Abdrassilova, G.S., Umnyakova, N.P., & Kakimzhanov, B.** (2019). Digitalization of the economy and the digital environment of modern architecture. *Biosphere Compatibility: Human, Region, Technologies*, 1(25), 3-13
18. **Digital Economy – New Opportunities for Business.** (2024). Retrieved from <http://kak-bog.ru/cifrovaya-ekonomika-novye-vozmozhnosti-dlya-biznesa>.
19. **Autodesk.** (2022). Building information modeling. Retrieved from <https://www.autodesk.com/solutions/aec/bim>
20. **Digital Kazakhstan.** (2022). Retrieved from <https://egov.kz/cms/ru/digital-kazakhstan>.
21. **Digitalization of Construction in Kazakhstan 2023: Transitioning to BIM.** (2023). Retrieved from <https://www.planradar.com/ru/cifrovizaciya-stroitelstva-kazahstana-perekhodim-na-bim/#:~:text=>.
22. **Digitalization of Construction in Kazakhstan 2023: Transition to BIM.** Retrieved from <https://cadsystems.kz/tpost/ef8hjse751-tsfrovizatsiya-stroitelstva-kazahstana>.
23. **Negroponte, N.** (2014). A 30-year history of the future. Retrieved from https://www.ted.com/talks/nicholas_negroponte_a_30_year_history_of_the_future/transcript?subtitle=en
24. **Interactive Architecture: Adaptive World.** (2016). Princeton Architectural Press.
25. **Creator of the Hypercube** (2013). Skolkovo Foundation. Retrieved from <https://sk.ru/news/b/press/archive/2013/09/04/sozdatel-giperkuba.aspx>
26. **The Goal Is to Create an Immortal Building: In Conversation with Boris Bernaskoni.** (2019). Retrieved from <https://www.archdaily.com/930066/the-goal-is-to-create-an-immortal-building-in-conversation-with-boris-bernaskoni>.
27. **Abdrassilova, G.S.** (2015). Osnovy regional'noy arkhitektury Kazakhstana [Fundamentals of regional architecture of Kazakhstan].: Monograph. Almaty. (In Russ)
28. **Three heroes.** (2023). Retrieved from <https://qlab.city/threeheroes>.
29. **The Village Kazakhstan.** (2019). I live in “Three Bogatyrs” [Website]. Retrieved from <https://www.the-village-kz.com/village/city/where/6919-ya-zhivu-v-treh-bogatyryah> (In Russ)
30. **Abdrassilova, G.S.** (2022). The potential of architecture in the formation of regional identity: From stimulus to reaction. *Architectural Heritage of Karabakh and Eastern Zangezur. Problems of Restoration, Protection, and Reuse. International Scientific and Practical Conference, Baku, 18 April 2022.* <https://doi.org/10.58225/sw.si.2022.1.163-169>
31. **Abdrassilova, G.S., & Aukhadiyeva, L.M.** (2021). The role of regional identity in shaping the architecture of the 21st century. *International Scientific Journal of Urban Planning and Sustainable Development*, 26, 1-9.
32. **Abdrassilova, G., & Danibekova, E.** (2021). The transformation of modern architecture in Kazakhstan: From Soviet “internationalism” to a post-Soviet understanding of regional identity. *SPATIUM*, (46), 73-80. <https://doi.org/10.2298/SPAT2146073A>
33. **Abdrassilova, G.S., & Aukhadiyeva, L.M.** (2021). The role of regional identity in shaping the architecture of the 21st century. *International Scientific Journal of Urban Planning and Sustainable Development*, 26, 1-9.
34. **Rappoport, A.G., & Somov, G.Yu.** (1990). Forma v arkhitekture. Problemy teorii i metodologii [Form in Architecture. Problems of Theory and Methodology]. Moscow: Stroyizdat (In Russ)
35. **Ikonnikov A.V.** (1986) Funktsiya, forma, obraz v arkhitekture [Function, form, image in architecture]. Moscow: Publ. Stroyizdat (In Russ)
36. **Balykbaev, B.T.** (2004). Zakonomernosti slozheniya formy v arkhitekture [Laws of Form Composition in Architecture]. *Preservation and Development of Historical and Cultural Environment in Natural and Urban Conditions of Modern Central Asia*, 31-34. Almaty: Print-S. (In Russ)

UDC 72.03 (045)
IRSTI 67.07.03
RESEARCH ARTICLE

ABOUT THE PROTOTYPOLOGICAL ASPECTS OF THE EVOLUTION OF THE DWELLING

A.A. Kornilova¹ , A.M. Yessenbayev^{1,*} 

¹S. Seifullin Kazakh agrotechnical research university, 010011, Astana, Kazakhstan

Abstract. *Throughout human history, housing has been crucial for human existence, serving as shelter, a symbol of social status, economic prosperity, and cultural identity. Studying archaeological data from different times and peoples has enabled the analysis of the main stages of the development of one of the fundamental values of human material culture - housing. Housing stands as concrete evidence supporting hypotheses and scientific discoveries, offering insights into the life, culture, and traditions of specific epochs. Its extensive evolutionary journey has been shaped significantly by advancements aimed at optimizing living conditions, influenced by societal norms, domestic practices, and scientific advancements. This ongoing evolution has defined housing's architectural characteristics, including differentiation of family, household, functional planning, work, and communal spaces, alongside spatial and expressive architectural elements. It encompasses the development of individual housing units within broader building and settlement frameworks, encompassing diverse housing types and their typological classifications, as well as applying construction and technical methods. This study examines the distinctive typological groups of housing, characterized by their structural underpinnings. These groups are delineated by key factors influencing the inception of formative architectural techniques, such as the early development of functional-planning solutions rooted in familial and regional contexts, and cultural traditions. Additionally, the article explores the architectural evolution of housing, analyzing how prototype components have shaped the phased development of residential functional-planning structures over time. This research contributes to a broader series of investigations into typological evolution of housing, aiming to deepen our understanding of its transformative journey across different historical periods.*

Keywords: *dwelling, evolution of dwelling, prototypology, formation of dwelling, differentiation.*

***Corresponding author**
Arken Yessenbayev, e-mail: yess.arken@gmail.com

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-02>

Received 20 November 2023; Revised 18 April 2024; Accepted 02 May 2024

ӘОЖ 72.03 (045)
ҒТАМР 67.07.03
ҒЫЛЫМИ МАҚАЛА

ТҰРҒЫН ҮЙ ЭВОЛЮЦИЯСЫНЫҢ ПРОТОТИПОЛОГИЯЛЫҚ АСПЕКТІЛЕРІ

А.А. Корнилова¹ , А.М. Есенбаев^{1,*} 

¹С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010011, Астана, Қазақстан

Аңдатпа. *Адамзат тарихында тұрғын үй адамның өмір сүруі үшін өте маңызды болды, ол баспана, әлеуметтік мәртебенің, экономикалық өркендеудің және мәдени бірегейліктің символы ретінде қызмет етті. Әр түрлі дәуірлер мен халықтардың археологиялық деректерін зерттеу адамның материалдық мәдениетінің іргелі құндылықтарының бірі – тұрғын үй құрылысының дамуының негізгі кезеңдерін талдауға мүмкіндік берді. Тұрғын үй гипотезалар мен ғылыми жаңалықтарды растайтын, белгілі бір дәуірлердің өмірі, мәдениеті мен дәстүрлері туралы түсінік беретін нақты дәлелдер болып табылады. Оның ауқымды эволюциялық саяхаты әлеуметтік нормалардың, тұрмыстық тәжірибелердің және ғылыми жетістіктердің әсерінен өмір сүру жағдайларын оңтайландыруға бағытталған жетістіктермен айтарлықтай қалыптасты. Бұл жалғасып жатқан эволюция тұрғын үйдің сәулеттік сипаттамаларын, соның ішінде отбасылық, тұрмыстық, функционалдық жоспарлауды, жұмысты және коммуналдық кеңістіктерді кеңістіктік және көркем сәулет элементтерімен қатар саралауды анықтады. Ол әртүрлі тұрғын үй типтерін және олардың типологиялық жіктелуін, сондай-ақ құрылыс және техникалық әдістерді қолдануды қамтитын кеңірек құрылыс және елді мекендер шеңберіндегі жеке тұрғын үй құрылыстарын дамытуды қамтиды. Бұл зерттеу тұрғын үйлердің құрылымдық негіздерімен сипатталатын ерекше типологиялық топтарын зерттейді. Бұл топтар қалыптастырушы сәулет техникасының пайда болуына әсер ететін негізгі факторлармен, мысалы, отбасылық және аймақтық контексттерге, мәдени дәстүрлерге негізделген функционалдық-жоспарлау шешімдерінің ерте дамуымен ерекшеленеді. Сонымен қатар, мақалада тұрғын үйдің сәулеттік эволюциясы зерттеліп, прототиптік компоненттер уақыт өте келе тұрғын үйдің функционалды-жоспарлау құрылымдарының кезең-кезеңімен дамуын қалай қалыптастырғанын талдайды. Бұл зерттеу тұрғын үйдің типологиялық эволюциясын зерттеудің кеңірек сериясына ықпал етеді, оның әртүрлі тарихи кезеңдердегі трансформациялық саяхаты туралы түсінігімізді тереңдетуге бағытталған.*

Түйін сөздер: *тұрғын үй, тұрғын үй эволюциясы, прототипология, тұрғын үйдің қалыптасуы, дифференциация.*

*Автор-корреспондент

Аркен Есенбаев, e-mail: yess.arken@gmail.com

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-02>

Алынды 20 қараша 2023; Қайта қаралды 18 сәуір 2024; Қабылданды 02 мамыр 2024

УДК 72.03 (045)
МРНТИ 67.07.03
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

ПРОТОТИПОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭВОЛЮЦИИ ЖИЛИЩА

А.А. Корнилова¹ , А.М. Есенбаев^{1,*} 

¹Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина,
010011, Астана, Казахстан

Аннотация. На протяжении всей истории человечества жилье играло важнейшую роль в его существовании, служило убежищем, символом социального статуса, экономического процветания и культурной идентичности. Изучение археологических данных разных времен и народов позволило проанализировать основные этапы развития одной из фундаментальных ценностей материальной культуры человека – жилища. Жилище выступает в качестве конкретного доказательства, подтверждающего гипотезы и научные открытия, дающего представление о быте, культуре и традициях конкретных эпох. Его обширный эволюционный путь в значительной степени определялся достижениями, направленными на оптимизацию условий жизни, под влиянием общественных норм, бытовых практик и научных достижений. Эта непрерывная эволюция определила архитектурные характеристики жилья, включая дифференциацию семейных, бытовых, функционально-планировочных, рабочих и коммунальных пространств, а также пространственных и выразительных архитектурных элементов. Она включает в себя развитие отдельных жилых единиц в более широких рамках строительства и расселения, охватывает различные типы жилья и их типологические классификации, а также применение строительных и технических методов. В данном исследовании рассматриваются отличительные типологические группы жилищ, характеризующиеся их структурной основой. Эти группы разграничиваются ключевыми факторами, повлиявшими на зарождение формирующихся архитектурных приемов, такими как раннее развитие функционально-планировочных решений, основанных на семейном и региональном контекстах, а также культурных традициях. Кроме того, в статье рассматривается архитектурная эволюция жилья, анализируется, как прототипные компоненты формировали поэтапное развитие жилых функционально-планировочных структур с течением времени. Данное исследование вносит вклад в более широкую серию исследований типологической эволюции жилья, направленных на углубление нашего понимания его трансформационного пути в различные исторические периоды.

Ключевые слова: жилище, эволюция жилища, прототипология, формирование жилища, дифференциация.

*Автор-корреспондент

Аркен Есенбаев, e-mail: yess.arken@gmail.com

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-02>

Поступило 20 ноября 2023 г.; Пересмотрено 18 апреля 2024 г.; Принято 02 мая 2024г.

SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 ВВЕДЕНИЕ

История архитектуры жилища начинается с разумной организации человечеством временного жилого пространства, начало которого датируется 10-м тысячелетием до нашей эры. Первое доисторическое жилище каменного века было временным, выполняло функцию ночлега и служило укрытием от природных воздействий, нападения зверей и врагов. Модель подобных кровов сооружалась без технических средств производства, понятий семейно-бытовых укладов. Сюда относятся землянки и шалаши, построенные из веток, костей и шкур крупных животных, и прочих недолговечных легких материалов ([Ginzberg & Speshilova, 2009](#)).

Изменения климатических условий и понимание обустройства собственного жилища привели к более осмысленным планировочным и конструктивным решениям жилья, его формообразование становилось более выразительным, появляется дифференциация семейно-бытовых разделений на функциональные зоны. ([Korotkova, 2013](#)). Освоив методы строительства, человечество начинает сооружать прочные и долговечные типы жилища, на объемно-планировочную структуру которого влияют пространственно-географические, природно-климатические, исторические, традиционные, культурные, социальные, экономические факторы. Зарождаются прототипные компоненты проектирования и строительства жилища, которые передаются из поколения в поколение, дополняясь и совершенствуясь новыми решениями, и представляя собой своеобразный феномен в определенный период.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Истории архитектуры жилища посвящено большое количество научных трудов и исследований, учебно-методических материалов зарубежных и отечественных авторов, которые в разной степени раскрывают его национальные, культурные, исторические, конструктивно-технические, архитектурно-планировочные, градостроительные процессы формирования и эволюции. Рассмотренные в статье научные труды и исследования отобраны по критериям разноаспектности, доступности к полному тексту, исчерпывающим исследованиям.

В трудах Гинзберг Л.А. и Спешиловой Е.С. ([Ginzberg & Speshilova, 2009](#)) описывается история архитектуры жилища с первых времен до XVI века. В работе Коротковой М.В. ([Korotkova, 2013](#)) раскрыты архивные и исторические материалы жилья до второй половины XIX века.

Вопросы первобытного жилища определенных эпох и народов подробно раскрыты в работе Мышковского Я.И. ([Myshkovsky, 1957](#)), где рассмотрены основные этапы формирования жилища в условиях социально-бытового уклада и природно-климатических условий. В результатах локальных археологических исследований Чубура А.А. ([Chubur, 2011](#)) описаны жилища стоянок палеолитического периода.

Эволюционные процессы и переход к прямоугольной форме жилища описывает архитектор Гинзбург М.Я. ([Ginzburg, 1984](#)). В работе представлены схематичные планировочные решения наиболее характерных типов жилья рассматриваемых периодов.

Жилищу кочевых народов посвящены труды Вайнштейна С.И. ([Weinstein, 1991](#)), Муканова М.С. ([Mukanov, 1981](#)), Харузина Н.О. ([Haruzin, 2006](#)). Авторами комплексно рассмотрены классические образы жилища кочевников. О жилище народов, населявших территории Северной и Центральной Азии, Казахстана и северную часть, описаны в исследовании Абдыкаримовой Ш.Т. ([Abdykarimova, 2021](#)), в трудах Бариновой Е.Б. ([Barinova, 2009](#)), Жилиной А.Н. и Неразика Е.Е. ([Zhilina & Nerazik, 1982](#)), Дэвлета М.А. ([Devlet, 2001](#)). Принципы застройки городища Отрар и особенности жилища того периода описаны в монографии Акишева К.А., Байпакова К.М., Ермаковича Л.Б. ([Akishev et al., 1981](#)).

Подробно рассмотрено жилище доиндустриального и индустриального периодов в трудах Самойлова К.И. ([Samoilov, 2004](#)). Представлен ретроспективный анализ по жилью в

научном исследовании зарубежных авторов Ширвани Р.К. и др. (Shirwani et al., 2019). В научном исследовании Сидоровой Е.И. (Sidorova, 2014) рассмотрены современные позиции и принципы разнообразия архитектурно-планировочных решений, и эволюция формообразования массового жилища в современной архитектуре.

В научном исследовании Корниловой А.А. и др. (Kornilova et al., 2022) рассматриваются комплексные вопросы расселения, процессы заселения населенных пунктов, урбанизация и факторы, влияющие на формирование архитектурных объемов.

В динамично развивающихся условиях жизни типология жилья требует постоянного анализа и изучения с целью формирования современной архитектуры жилья.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Комплексный подход в изучении истории развития жилища опирается на поступательное развитие жилища, как части искусственного (рукотворного) пространства, в котором завершающим периодом выступает современный этап.

Используя научную и академическую литературу, и архивные документы проведен сравнительный анализ наиболее характерных классических типов планировочного пространства жилья. Временные границы исследования охватывают все этапы формирования жилой ячейки, от первобытнообщинного строя до современного периода. Пространственно-географические границы не рассматриваются в связи с глобальным влиянием прототипов первичного жилища на все континентально-региональные территории. Используя сравнительный анализ, обобщались выборочные типологические группы жилищ с наиболее характерными, самобытными функционально-планировочными характеристиками.

Таким образом, применяемые методы исследования позволили структурировать жилище по основополагающим признакам. Авторами сформирована и представлена линейка исходных прототипов функционально-планировочных решений организации жилья.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Первобытный общинный строй породил множество семейств, которые позже начали жить большими родственными кругами. Первичные признаки функциональной значимости определенного места в структуре жилища были замечены в полуземлянке на стоянке Быки 1 на реке Сейм. Там над очагом возвышался череп мамонта, что свидетельствует о важности этого места в составе жилья (Chubur, 2011). Характерным видом жилья этого периода также можно отнести хижины племен Макка и Нутка, где в центре устанавливался очаг, вокруг которого были низкие сиденья, для сбора старейших членов домашней общины и гостей. Каждый взрослый член семьи имел спальное место вдоль стен, ограждавшееся циновкой, покрывавшееся шкурами и покрывалами. На этом этапе появляется первое функциональное разделение жилища на зоны: приготовление пищи, приема пищи, отдыха и сна (Ginzburg, 1984). На этой начальной ступени развития появляется понятие накопления пищевых запасов, формируются отдельные помещения, связанные с сохранением и переработкой продуктов, а также с содержанием животных.

На **Рисунке 1** указана первая зачаточная форма стационарного индивидуального жилища для одной супружеской пары. Это маленькие хижины малайских оседлых племен семанги, джакун и сенои, которые сооружались из бамбука и перегородок из циновки. Подобные хижины можно считать прототипом современных хижин азиатских крестьян Лаоса, которые приведены на **Рисунке 2** и некоторых африканских племен Нуер в Эфиопии и Судане показанные на **Рисунке 3** (Myshkovsky, 1957).

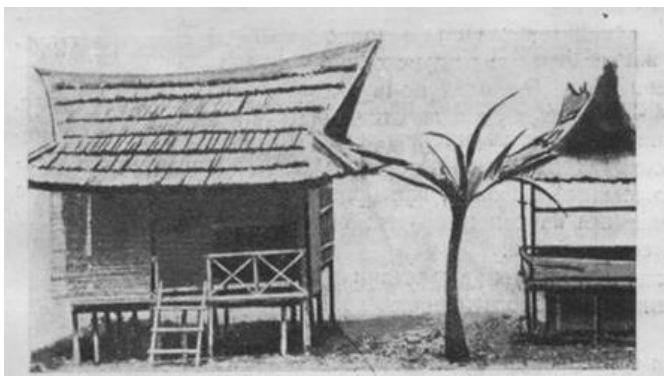


Рисунок 1 – Малайская хижина (Ginzburg, 1984).



Рисунок 2 – Современная крестьянская хижина в Лаосе (Myshkovsky, 1957).

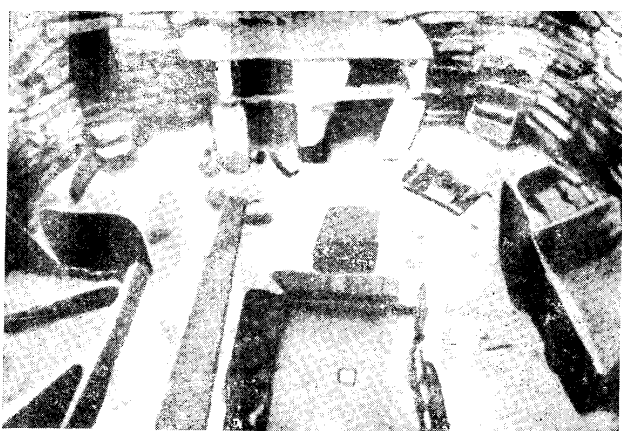


Рисунок 3 – Современные хижины племени Нуер (Myshkovsky, 1957).

В отличие от оседлых народов кочевники работали над совершенствованием мобильного жилища, которое легко бы трансформировалось и выполняло свои основные функции (Weinstein, 1991). В следствии появились шатры, палатки, кибитки, юрты и т.д. Наиболее важный этап развития кочевого жилища заключался в переходе к юрте-жилищу с разборно-складными решетчатыми остовами стен (Mukanov, 1981). Изобретение юрты и ее распространение относятся к середине I тысячелетия н.э. и связаны с древнетюркской средой. Это было одним из весьма существенных достижений культуры кочевников, знаменовавших переход от раннекочевнического к позднекочевническому этапу развития (Abdykarimova, 2021). Мобильный характер кочевого жилища вынуждал создавать единое пространство жилья с разными функциями. Кочевники использовавшие ориентацию по сторонам света располагали традиционную юрту входом на юг, для того чтобы определять время по лучам Солнца (Haruzin, 2006). На Рисунке 4 приведен пример традиционного внутреннего зонирования и интерьер казахской юрты. Здесь имеется четкая дифференциация пространства: левая сторона от входа считалась женской частью, где располагались места для хранения, посуды, еда и т.д., правая сторона от входа была мужской, там хранились седло, оружие, различный инвентарь и инструменты. В центре всегда располагался очаг, на котором устанавливался котел для приготовления пищи и обогрева юрты. Противоположная входу сторона считалась самой почетной, туда размещали гостей (Barinova, 2009).

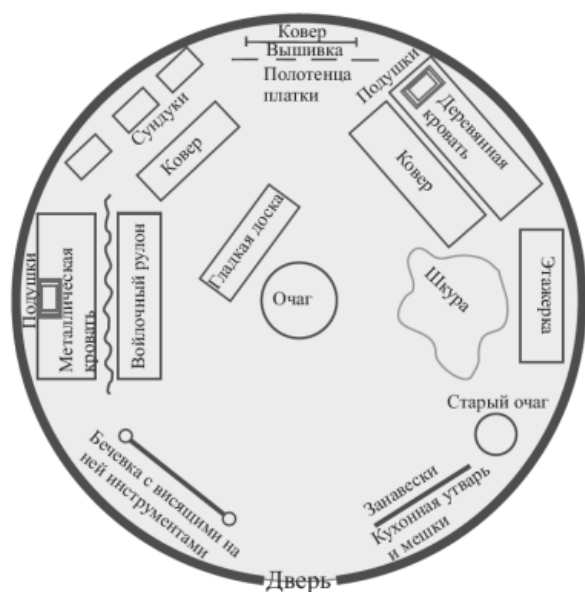


Рисунок 4 – План и интерьер казахской юрты (Korotkova, 2013)

Процесс хозяйственного расслоения родов – превращение их в отдельные семьи нескольких поколений, стабилизация оседлого образа жизни, совершенствование земледелия и domestикация диких животных трансформирует жилище, и начинает формироваться прототипная модель современного жилья. Точный период перехода от овальных и круглых в плане домов к прямоугольным пока неизвестен, однако это определено точно связано с социокультурным и конструктивным фактором формирования жилища (Zhilina & Nerazik, 1982).

Интересные сведения о первых оседлых жилищах среднеазиатских народов дает палеоэтнографические материалы по жилым домам древнего Отрара XV-XVII вв. План Отрарских жилищ, включающих двух-, трехчастное деление дома (прихожая-айван, жилые комнаты (1-2) и кладовая), традиционен для всех народов средней Азии. Интересны дома Отрара еще и тем, что в них используется довольно сложная для того времени система обогрева внутреннего пространства, наряду с применением очага открытого типа, который указан на Рисушке 5. Повсеместно использовался тандыр с дымоходным каналом, встроенным в стену, позволяющий аккумулировать тепло внутри помещений. А также в более поздний период, встречались и традиционные для Востока системы отопления – печи-лежанки «каны». Применение таких систем отопления оказывала влияние на планировочную структуру дома, делая ее компактной, ограниченной по площади (Akishev et al., 1981).



Рисунок 5 – Планы и разрезы домов древнего Отрара (Akishev et al., 1981).

Развитие планировочной структуры многочисленных крестьянских домов Европы происходила на основании древнейших типов саксонских, нижнегерманских и франконских крестьянских домов.

Планировочная структура таких домов, выражалась в единстве хозяйственных и жилых помещений, где в прямоугольном вытянутом плане дома размещались средние и главные помещения, частично используемые как хозяйственный склад, частично как общее помещение. В глубине такого помещения располагался очаг, по обеим сторонам которого были спальни. На **Рисунке 6** указана планировочная структура дома, в которую включены отдельные помещения: конюшня, коровник, амбар, погреб, жилая комната и кухня. Сохранение композиционного единства большого продольного помещения и сгруппированных вокруг него по периметру комнат различного назначения вело с течением времени к дальнейшей трансформации пространства, когда большое помещение эволюционирует и превращается либо во внутренний двор – римское и восточное жилье, либо во внутреннее общее помещение – холл.

Франконский дом развивался по такому же принципу **Рисунок 7**, и демонстрирует, что общее помещение с очагом проходя по поперечной оси дома, объединяет вокруг себя жилые комнаты по одной стороне, по другим хлев и амбар. Хозяйственные помещения, и жилые комнаты постепенно развиваясь в сторону увеличения площади, придерживались четкой дифференциации бытовых процессов.

Указанный на **Рисунке 8** шварцвальдский дом отличается от предыдущих типов этажностью и развитием планировки внутренних помещений по вертикали, на нижнем уровне располагается хлев, на верхнем жилые комнаты.



Рисунок 6 – Саксонский дом (материалы авторов)



Рисунок 7 – Франконский дом (материалы авторов)



Рисунок 8 – Шварцвальдский дом (материалы авторов)

Таким образом в странах Востока, Малой и Средней Азии культура жилища формируется как изолированная от внешней среды жилая ячейка, со своим хозяйственно-бытовым укладом, убранством и всем необходимым для жизнедеятельности сконцентрированным в одном пространстве. Разобщенность отдельных строений с разными функциями вполне отвечала жилищным потребностям и в т.ч. удобствам кочевой жизни. Противоположностью восточному является европейское жилище, первоочередные задачи которого заключались во внешнем представительстве, и функционально-планировочная составляющая помещений выходила на первый план (Devlet, 2001).

В доиндустриальный период развитие торговли и ремесленничества повлияли на трансформацию крестьянского жилища в городское, вследствие которого дифференцировались помещения жилого, хозяйственного и производственного назначения, а именно вместо хлева располагаются мастерские и торговые лавки (Samoilov, 2004).

Опираясь на исходные прототипы функциональной составляющей жилого пространства можно увидеть, что для древнего жилища Азии, Африки, Северных регионов Европы и Америки, т.е. мест с неблагоприятными климатическими условиями, свойственна лаконичная организация зонирования внутреннего пространства, которая характеризовалась наличием единого помещения с различными функциональными зонами либо наличие отдельных строений под каждую функциональную зону (например, Чайный домик (Япония), Белая юрта (Ср.Азия) и т.д.).

Для древнего жилья стран Западной Европы, Южной Америки, т.е. благоприятных климатических регионов присуще наличие в структуре жилья отдельных помещений с четкой функциональной принадлежностью, которые группируются в сложную структуру, обрстая дополнительными пространствами – коридорами, холлами, верандами, шлюзами.

Расцвет индустриального промышленного производства и торгового капитала, когда происходит вытеснение мелких торговых лавок и ремесленных мастерских, жилище претерпевает самую главную стадию трансформации, происходит процесс полного разделения и отделения места жилья и места приложения труда человеком (Shirwani et al., 2019).

Развитие новых социально-экономических отношений, интенсивное создание рабочих мест, появление рабочего класса и интеллигенции, привело к появлению доходных домов – многоквартирные, с общей входной группой, преимущественно городского типа. Такой тип домов, был нацелен на предоставление жилья внаем на определенный период и имел различия по комфортности и разнообразию планировочной структуры. Позже во второй половине XX века планировочная и экономическая составляющая данного вида жилья стала стимулом

для его развития повсеместно и по его образу начали формировать новую модель жилья, которая приобрела характер массовой застройки на всех континентах (Kornilova et al., 2022).

В XX веке жилищная культура воспринимала семью как индивидуальную жилую единицу, для которой должно быть своё обособленное жилое пространство в структуре общедомового имущества. Такое понятие не изменилось и в послевоенное время, когда жилище, благодаря строительным технологиям, интеграции культур и в целом развитию общества приобретает новые формы и понятия. Каждая семья имеет свою отдельную жилую площадь, и она должна отвечать, при этом всем необходимым ее потребностям.

На современном этапе развития общества жилая среда приобретает самые разнообразные формы благодаря меняющемуся функциональному подходу к жилищу современного человека (Рисунок 9).

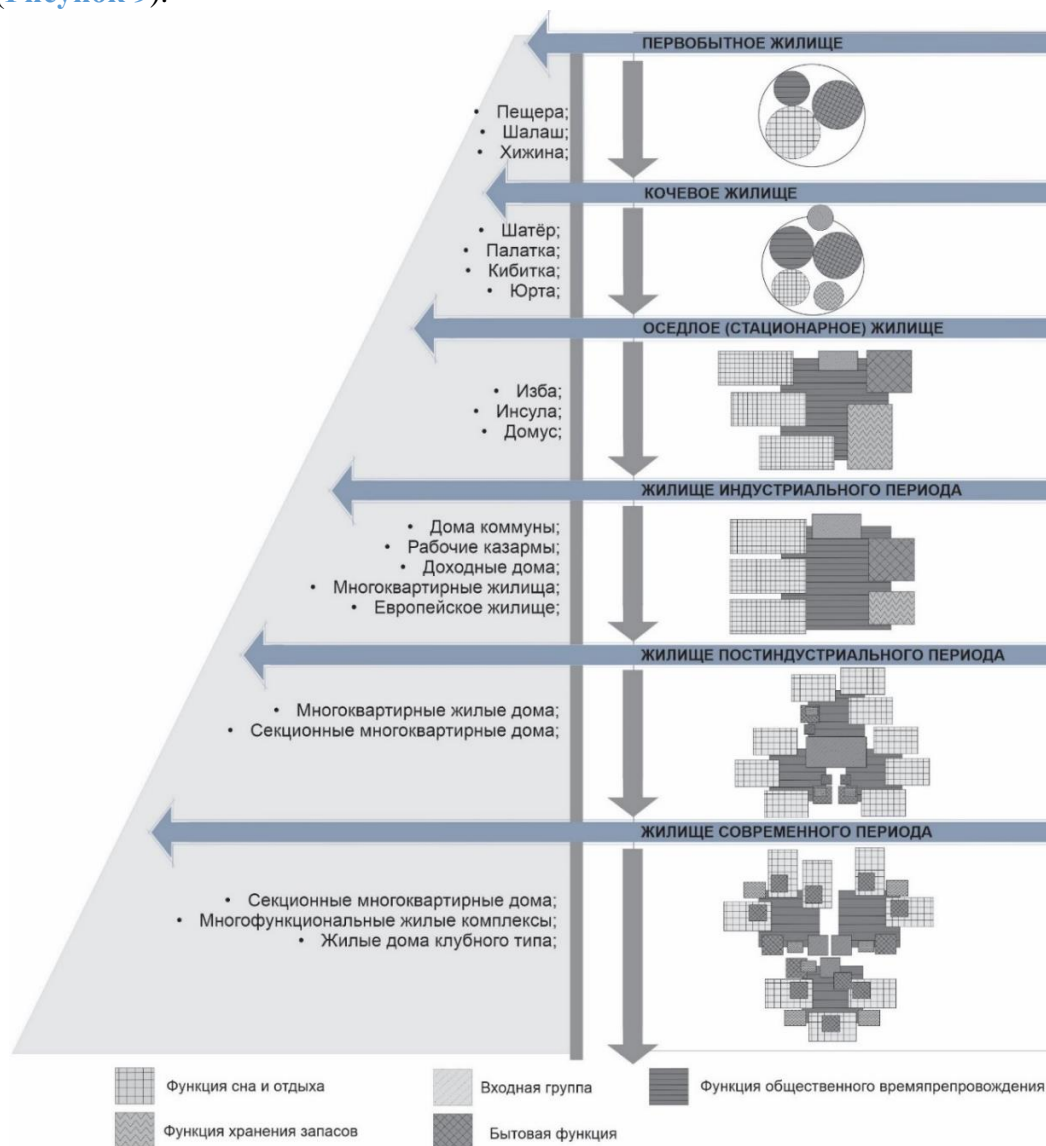


Рисунок 9 – Линейка исходных прототипов функционально-планировочных решений жилья (материалы авторов)

Главным стимулом трансформации современного жилья кроме развития строительных технологий, климатических и культурных аспектов, можно назвать функционально-планировочные требования, предъявляемые к жилью за счет меняющегося образа жизни человека. Результатом исследования является структурированная линейка исходных прототипов функционально-планировочных решений организации жилья, представленная на Рисунке 9.

5 ВЫВОДЫ

Анализ хронологического и географического путей эволюции жилища показывает, что на определенном историческом этапе на формирование комфортной функционально-планировочной структуры жилища влияют: бытовой уклад, социокультурный, исторический, экономический, природно-климатический и градостроительные факторы, которые предопределяли жилища прошлых эпох и будут продолжать влиять на жилище будущего.

Проведенный ретроспективный анализ показывает, что история жилища в разные периоды развития непосредственно связана с социальными условиями, которые являются причиной трансформации жилья в функционально-планировочном аспекте. Следует отметить историческое влияние прототипологических факторов на современную жилую структуру, а также преемственность методов формирования жилища и его компонентов.

Степень совершенствования жилища в разные исторические периоды всегда зависит от традиций и жизненного опыта народа и естественным образом отражается на темпах трансформации жилой среды.

Историческое наследие прошлого, опыт и культура формирования жилища, на которое в разные периоды оказывается геополитическое давление стран и континентов, доказывает, что прототипологические приемы проектирования жилья имеют влияние на функционально-планировочную модель жилищной структуры.

Эволюционная модель жилища всегда стремится к совершенству, дополняясь новыми функциями и компонентами, которые формируют комфортные условия жизнедеятельности человека.

На современном этапе жилище также находится в процессе эволюции и ее функционально-планировочная структура претерпевает трансформацию под влиянием следующих аспектов:

– демографическое развитие семьи требует гибкости и динамичной трансформации функционально-планировочного решения;

– потребность общения с природой обуславливает присутствие ее элементов в структуре жилья;

– использование энергосберегающих элементов и средств;

– увеличивается значимость личного пространства;

– развитие структуры бытовых помещений и технологического оборудования.

Таким образом в основе композиционного многообразия планировочных структур жилья, лежит компактный центрический прием (субструктура), которая из периода в период в виде доминантной линии развивается в силу объективных причин, обогащаясь привнесенными приемами и саморазвитием, приводя к возникновению новых планировочных структур, участвуя в целостной панорамной картине трансформации жилья.

В широком разнообразии аспектов, влияющих на формирование жилища человека, в данном материале выступает исходным прототипом – функционально-планировочная структура жилья. В последующем авторы ставят задачу рассмотреть в отдельности всю линейку исходных прототипов от формообразования до разветвленной типологии жилых зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abdykarimova, S. T.** (2021). Analysis of the formation of the traditional dwelling of the nomadic peoples of Central Asia. [Analiz formirovaniya tradicionnogo zhilishcha kochevyh narodov Central'noj Azii]. Bulletin of the Kazakh Head Architectural and Construction Academy, 2(80), 21-27. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2021.2-12> (In Russ.).
2. **Akishev, K. A., Bajpakov, K. M., & Erzakovich, L. B.** (1981). Late Medieval Otrar (XVI-XVIII centuries). [Pozdnesrednevekovyj Otrar (XVI-XVIII vv.)]. Alma-Ata: Nauka. (In Russ.).
3. **Barinova, E. B.** (2009). Settlements, dwellings and economy of the population of Northern Kazakhstan and the Urals of the Bronze Age in the light of solving the problem of ethnicity of Andronovo tribes. [Poseleniya, zhilishcha i hozyajstvo naseleniya Severnogo Kazahstana i Urala epohi bronzy v svete resheniya problemy etnicheskoy prinadlezhnosti andronovskih plemen]. RUDN Bulletin, General History series, 2, 6-17. (In Russ.).
4. **Chubur, A. A.** (2011). What was the dwelling of the Penza Paleolithic site like? [Kakim bylo zhilishche Penskoj paleoliticheskoy stoyanki?]. Bulletin of Nizhnevartovsk State University,(4), 15-22. (In Russ.).
5. **Devlet, M. A.** (2001). Ancient dwellings of the peoples of North and Central Asia (based on petroglyphs). [Drevnie zhilishcha narodov Severnoj i Central'noj Azii (po materialam petroglifov)]. Moscow: Tays, 198-211. (In Russ.).
6. **Ginzberg, L. A., & Speshilova, E. S.** (2009). The history of the development of residential architecture from the Neolithic to the Renaissance [Istoriya razvitiya arhitektury zhilishcha ot neolita do epohi Vozrozhdeniya]. Ekaterinburg, 1, 30–32. (In Russ.).
7. **Ginzburg, M. Y.** (1984). Experience of five years of work on the problem of housing. [Opyt pyatiletnej raboty nad problemoj zhilishcha]. Moscow: Stroyizdat. (In Russ.).
8. **Haruzin, N.** (2006). The history of the development of the dwelling of the Turkic and Mongolian peoples. [Istoriya razvitiya zhilishch tyurkskih i mongol'skih narodov]. Russian State University named after S. Toraighyrov: "EKO". (In Russ.).
9. **Kornilova, A. A., Mamedov, S. E. O., Karabayev, G. A., Khorovetskaya Y. M., & Lapteva, I. V.** (2022). Identification of Regional Factors Affecting Management of Territories: Formation of Residence and Social Infrastructure System in Urban and Rural Settlements in Kazakhstan. Journal of Environmental Management and Tourism, 13(8), 2248–2254. [https://doi.org/10.14505/jemt.13.8\(64\).17](https://doi.org/10.14505/jemt.13.8(64).17)
10. **Korotkova, M. V.** (2013). The history of the dwelling: from antiquity to modernity. [Istoriya zhilishcha: ot drevnosti do moderna]. Moscow: New Chronograph. (In Russ.).
11. **Mukanov, M. S.** (1981). Kazakh yurt. [Kazahskaya yurta]. Alma-Ata: Kainar (In Russ.).
12. **Myshkovsky, Y.I.** (1957). Dwellings of different eras. Yesterday. Today. Tomorrow. [Zhilishcha raznyh epoh. Vchera. Segodnya. Zavtra]. Moscow: Stroyizdat. (In Russ.).
13. **Samoilov, K.I.** (2004). Architecture of Kazakhstan of the XX (development of architectural and artistic forms). [Arhitektura Kazahstana XX veka (razvitie arhitekturno-hudozhestvennyh form)]. Moscow-Almaty: MARI-design, 930, 12-18. (In Russ.).
14. **Shirwani, R.K., Kamran, M., & Malik, A. M.** (2019). A literature review of early housing units: History, evolution, economy and functions. Journal of Art, Architecture and Built Environment, 2(2), 53–79. <https://doi.org/10.32350/jaabe.22.04>
15. **Sidorova, E.I.** (2014). The evolution of architectural and planning solutions and the formation of a mass dwelling in modern architecture [Evolyuciya arhitekturno-planirovochnyh reshenij i formoobrazovaniya massovogo zhilishcha v sovremennoj arhitekture]. Nizhnij Novgorod: dissertation... candidate of architecture sciences. (In Russ.).
16. **Weinstein, S. I.** (1991). The World of Asian nomads. [Mir kochevnikov Azii]. Moscow: Nauka. (In Russ.).
17. **Zhilina, A.N., & Nerazik, E. E.** (1982). The dwelling of the peoples of Central Asia and Kazakhstan. [Zhilishche narodov Srednej Azii i Kazahstana]. Moscow: Nauka. (In Russ.).

UDC 72:380.828
IRSTI 67.07.03
RESEARCH ARTICLE

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF AGRO-TOURISM ON THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

I.I. Ostapenko^{1,*} , A.A. Bryantsev¹ 

¹International Educational Corporation, 050043, Almaty, Kazakhstan

Abstract. *This article discusses the potential for the development of agro-tourism, which is an industry of the national economy that requires significant investment. Agro-ecotourism is one of the most popular forms of modern recreational activity. Depending on their specific characteristics, natural and climatic conditions, and management practices, various countries of the world organize this activity in different ways. It has been determined in this work that recreational activities are based on agro-landscapes and natural recreational resources. A systematic approach was the basic methodological foundation for this research, specifically the method of factor analysis, which enabled the identification of key questions for surveys that form the basis for prospects for agro-ecotourism development. A sociological survey conducted by KAZTOUR based on the author's questionnaire revealed population preferences in the field of agrotourism. Among the organisers of tourist trips, 30.9% chose hiking, 24.4% chose enjoying nature, 15.5% wished to get acquainted with agriculture and care for animals, and 13.6% expressed a desire to receive diverse impressions from a business trip. The majority of people (70.4%) preferred a foothill landscape, 26.1% preferred a river-steppe landscape, and only 3.4% preferred a desert landscape. Most respondents, 47.6%, preferred two-day trips with overnight stays, another third, 33%, chose one-day trips without overnight stay, and only 7% of respondents chose a week-long vacation. A program has been proposed for the successful development of agritourism in Kazakhstan at the city or even country level, reflecting factors that will lead to a high demand for agritourism among the population. These factors are listed in the results of the article. As part of the development of the tourism cluster in the republic, priority areas for tourism have been identified: business tourism, ecological tourism, cultural and educational tourism, active and adventure tours. The main tasks have been identified and necessary methods have been proposed to address the issues of popularization and development of agritourism on the territory of the Republic of Kazakhstan.*

Keywords: *Agro-tourism, eco-tour, rural tourism, recreation, ethno-tourism, urbanization.*

***Corresponding author**

Inna Ostapenko, e-mail: ostapinna@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-03>

Received 09 April 2023; Revised 17 June 2023; Accepted 24 September 2023

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ АУМАҒЫНДА АГРОТУРИЗМДІ ДАМУ ТЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

И.И. Остапенко^{1,*} , А.А. Брянцев¹ 

¹Халықаралық білім беру корпорациясы, 050043, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа. Бұл мақалада халық шаруашылығының саласы болып табыла-тын және үлкен инвестицияларды қажет ететін агротуризмді дамыту мүмкіндіктері қарастырылады. Агротуризм-қазіргі заманғы демалысты ұйымдастырудың ең танымал бағыттарының бірі. Әлемнің әртүрлі елдері, аумақтың ерекшелігіне, табиғи-климаттық ерекшеліктеріне және шаруашылық ерекшеліктеріне байланысты, қызметтің бұл түрін әр түрлі ұйымдастырады. Жұмыста демалысты ұйымдастыру агроландрафт және табиғи рекреациялық ресурстар негізінде жүзеге асырылатыны анықталды. Зерттеудің негізгі әдістемелік негізі жүйелі тәсіл, атап айтқанда агротуризмді дамыту перспективаларының негізін құрайтын сауалнаманың тірек мәселелерін анықтауға мүмкіндік беретін факторлық талдау әдісі болды. KAZTOUR жүргізген және автордың сауалнамасына негізделген әлеуметтік сауалнама халықтың агротуризм саласындағы артықшылықтарын көрсетті. Туристік саяхатты ұйымдастырушылардың 30.9%-ы жаяу серуендеуді, 24.4%-ы табиғаттан ләззат алуды, 15.5%-ы ауыл шаруашылығымен танысып, жануарларға күтім жасағысы келді, ал 13.6%-ы іскерлік сапардан әртүрлі әсер алғысы келді; адамдардың көпшілігі (70.4%) тау етегіндегі ландшафтты, 26.1%-ы өзендала ландшафтын және тек 3.4% өзен-шөлді таңдады; сауалнамаға қатысқандардың көпшілігі 47,6% екі күндік түнгі сапарларды таңдады, тағы үштен бірі 33% бір күндік түнгі саяхатты таңдады, ал сауалнамаға қатысқандардың тек 7% - ы бір апталық демалысты таңдады. Қазақстанда агротуризмді дамыту үшін халықтың агротуризмге деген үлкен сұранысына әкелетін факторларды көрсететін қала немесе тіпті ел деңгейінде бағдарлама ұсынылды, бұл факторлар мақаланың нәтижелерінде келтірілген. Туристік кластерді дамыту шеңберінде республикада туризмнің басым бағыттары анықталды: Іскерлік туризм, экологиялық туризм, мәдени-танымдық туризм, белсенді және шытырман оқиғалы турлар. Негізгі міндеттер айқындалып, Қазақстан Республикасының аумағында агротуризмді насихаттау және дамыту мәселелерін шешу үшін қажетті әдістер ұсынылды.

Түйін сөздер: агротуризм, экотур, ауылдық туризм, демалыс, этнотуризм, урбанизация.

*Автор-корреспондент

Инна Остапенко, e-mail: ostapinna@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-03>

Алынды 09 сәуір 2023; Қайта қаралды 17 маусым 2023; Қабылданды 24 қыркүйек 2023

УДК 72:380.828
МРНТИ 67.07.03
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АГРОТУРИЗМА НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

И.И. Остапенко^{1*} , А.А. Брянцев¹ 

¹ Международная образовательная корпорация, Алматы, 050028, Казахстан

***Аннотация.** В данной статье рассматриваются возможности развития агротуризма, который является отраслью народного хозяйства и требует больших вложений. Агротуризм – это одно из наиболее популярных направлений современной организации отдыха. Различные страны мира, в зависимости от специфики, природно-климатических особенностей территории и особенностей хозяйствования по-разному организуют этот вид деятельности. В работе определено, что организация отдыха происходит на основе агроландшафта и природных рекреационных ресурсов. Базовой методической основой исследования явился системный подход, а именно метод факторного анализа, позволивший определить опорные вопросы анкетирования, которые легли в основы перспектив развития агротуризма. Социологический опрос, проведенный KAZTOUR и основанный на анкете автора, показал предпочтения населения в области агротуризма. Среди организаторов туристических путешествий 30.9% предпочли пешие прогулки, 24.4% – наслаждение природой, 15.5% захотели познакомиться с сельским хозяйством и ухаживать за животными, а 13.6% выразили получить разнообразные впечатления от деловой поездки; большинство людей (70.4%) предпочли предгорный ландшафт, 26.1% отдали предпочтение приречно-степному ландшафту и только 3.4% импонировали приречно-пустынный; большинство опрошенных 47,6% предпочли двухдневные поездки с ночевкой, еще треть 33% выбрали однодневные путешествия без ночевки, и только 7% опрошенных выбрали недельный отдых. Для успешного развития агротуризма в Казахстане предложена программа на уровне города или даже страны, отражающая факторы, которые приведут к большому спросу населения к агротуризму, данные факторы перечислены в результатах статьи. В рамках развития туристического кластера в республике были определены приоритетные направления туризма: деловой туризм, экологический туризм, культурно-познавательный туризм, активные и приключенческие туры. Определены основные задачи и предложены необходимые методы для решения вопросов популяризации и развития агротуризма на территории Республики Казахстан.*

***Ключевые слова:** агротуризм, экотур, сельский туризм, отдых, этнотуризм, урбанизация.*

***Автор–корреспондент**
Инна Остапенко, e-mail: ostapinna@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-03>

Поступило 9 апреля 2023 г.; Пересмотрено 17 июня 2023 г.; Принято 24 сентября 2023 г.

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС/ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 INTRODUCTION

Agrotourism is one of the demanded directions of modern tourism, within which different countries vary their methods of recreation organization depending on the natural and climatic features of their territories. The study showed that agro-landscape and natural recreational resources are the basis for the organization of agritourism. The method of factor analysis was used to determine the key questions of the questionnaire, which determine the prospects for the development of this sphere of tourism.

This organization is a developed sphere of private entrepreneurship, the role of which, in combination with expanded reproduction of agricultural products and environmental protection measures, is emphasized in the “Message of the Head of State Kasym-Jomart Tokayev to the people of Kazakhstan. September 1, 2020”, where the list of priority tasks includes: “The leading role of private entrepreneurship. “Greening of the economy, environmental protection ([Message from the Head of State Kassym–Jomart Tokayev to the people of Kazakhstan. September 1, 2020](#)).

Kazakhstan is in great demand among foreign tourists. Every year the number of tourists visiting our country only increases. Kazakhstan was able to achieve great performance thanks to the International Exhibition EXPO-2017 in Astana.

In 2017, the Concept aimed at the development of the tourism industry in the Republic of Kazakhstan until 2023 was adopted. The main task of this concept is to develop regional cultural and tourist clusters, increase investment and create a unified national tourist brand.

The history of agritourism is an integral part of the tourism industry. Field trips to the countryside have long been a popular way to diversify leisure and recreation. Programs of excursions as part of the educational process increasingly include visits to rural farms and farms, which is an important part of teaching various disciplines. The modern tourism industry is increasingly focused on the development of agritourism, which is becoming popular among city dwellers. Trips outside the city to suburban garden plots not only bring recreation, but also the opportunity to participate in the production of agricultural products. Such trips become an integral part of the urban lifestyle of the first half of the twentieth century.

2 LITERATURE REVIEW

Modern scientific literature defines tourism as a set of relations and phenomena arising in the process of travel and stay of people outside their permanent place of residence, provided that it is not related to work. Tourism opens wide opportunities for communicating with the natural, cultural-historical and social values of their country and the world, including agritourism.

The first varieties of tourism appeared already in ancient Egypt. Egyptians participated, for example, in religious festivals, many of them traveled to see the pyramids and works of art. Residents of local regions (territories) hosted tourists for overnight stays, provided them with food services.

Theoretical aspects of tourism activities have been studied in the following directions:

- tourism was studied in the works of: Erdavletov S.R. ([Erdavletov, 2011](#)), Zorin I.V. ([Zorin et al, 2016](#)), Mukhambetov T.I. ([Mukhambetov et al, 2014](#)), Kairova S.G. ([Kairova et al, 2018](#)), Baizhanova S. ([Baizhanova et al, 2007](#)), Kairova S.G. ([Kairova et al, 2018](#));

- V.A. Kvartalnov ([Kvartalnov, 2014](#)), A.A. Zholdasbekov ([Zholdasbekov, 2012](#)), M.D. Mamadiyarov ([Mamadiyarov et al, 2007](#)) were engaged in the organization of tourism activities.

In the first half of the 20th century, Patrick Abercrombie, a universal theorist, practitioner and world-class architect and urban planner, was engaged in the study of rural landscape and the development of methods for assessing, above all, its aesthetic component. He was the first to put the protection of rural nature on a scientific basis. Because with the development of tourism, not parks but alternative large-scale rural areas became the choice of tourists for urban populations ([Patrick Abercrombie and the formulation of the problem of rural nature conservation in England](#),

2015). But Patrick Abercrombie, unlike American scientists who realized his concept of protecting pristine nature in the United States through established unpopulated nature reserves, also advocated for the protection and improvement of rural areas.

Different countries and regions have their own most interesting places for tourists. The natural richness, diversity of climatic conditions and landscape features contribute to the development of tourism and agritourism in a wide variety of regions in all corners of the Earth (Qiu et al, 2016; Mastronardi et al, 2015; Khanal et al, 2019; Scaglione et al, 2017; Wang, 2020; Cocks et al, 2017; García–Martín et al, 2016; Hernández–Morcillo et al, 2017; Amalu et al, 2018; Anderson, 2018; Ferrari, 2017; Hampton, 2018; Horwath, 2018; Imbaya et al, 2019; Kuroda, 2019; Ruoso, 2020; Guay et al, 2019).

The main purpose of the work is to conduct a study of tourism and agrotourism in general, and to develop practical recommendations for the popularization of agrotourism on the territory of our republic.

As a branch of economy, tourism is a form of activity that requires significant areas of territory with rich natural resources. In this sense, it is similar to other resource-oriented industries. Tourists choose places of recreation and travel, taking into account the unique landscapes, climate and diversity of nature. Agritourism plays an important role in this process, allowing travelers to learn about agriculture and nature, and to enjoy a unique experience of interaction with the environment.

Leading in recreational activities are recreational and sports activities. Recreational and sporting type of recreation is route and thus is identified with tourism. Such types of tourism as water, underwater, fishing, skiing, hunting, as well as agrotourism are gaining popularity (Figure 1).

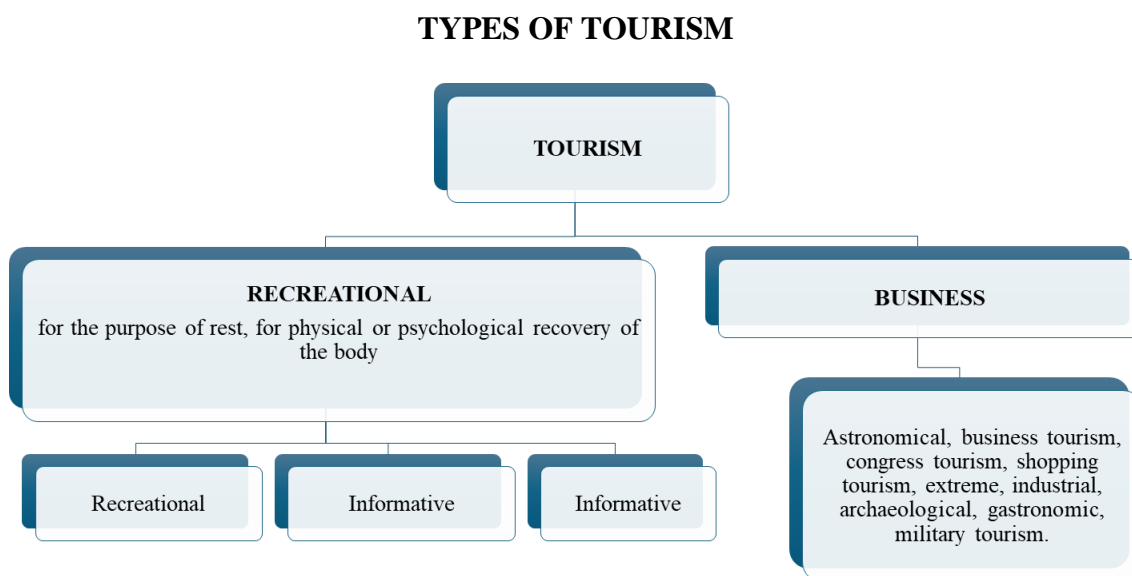


Figure 1 – Main types of tourism (authors' material)

The need to develop the prospective development of tourist activity, its territorial and functional organization, architectural and planning organization of tourist complexes, tourist bases, development of excursion routes, identification of tourist preferences and much more requires the classification of modern tourism. Tourism is classified according to various features, but the leading one is the dominant purpose of travel. Forms of tourist activity can be divided into three main directions: therapeutic, health and sports and cognitive. The latter is recognized by many specialists as the leading function in the industry.

The concept of recreation includes such types as: health-improving recreation (or recreation), sanatorium-resort treatment and tourism. Each of which in theoretical studies is subdivided into different forms. In urban planning the most common term in the consideration of the social factor “recreation of the population”. The term “recreation” is more accurate than the concept of rest. To date, it is considered difficult to create an ideal classification of types and forms of recreational activities because of the multifunctional dependence of recreational services (Novikova, 2013).

3 MATERIALS AND METHODS

The study utilized: a systematic approach and a number of analytical analyses.

All analytical conclusions were based:

- on the method of factor analysis;
- on the collection of departmental material (information from the Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan);
- on sociological research (survey of residents in order to determine preferences on the subject of agrotourism);
- study of archival data, statistical and demographic data, as well as the analysis of natural and climatic factors of the study region.

4 RESULTS AND DISCUSSIONS

Agrotourism is an important branch of tourism that contributes to employment and requires little investment. Kazakhstan's participation in the international tourism industry is gradually increasing, which opens great prospects for further development of tourism in the country.

Today, when urbanization at a great pace shows unprecedented growth. Elementary questions in children's environment are questions about where milk and cheese, bread and butter come from, but they do not find a proper answer. An important task is to educate city dwellers about the simple, but at the same time very important life of villagers and their role in modern society. Therefore, agritourism plays an important role; it gives a unique opportunity to city dwellers to get closer to the world around them and even merge with it, to feel the charm of closeness with nature and the ecosystem as a whole.

The development of agro-tourism in Kazakhstan is fully consistent with the concept of Kazakhstan's transition to a “green” economy. This is the industry that can give the greatest multiplier effect on economic growth and employment of the population, with the proper use and distribution of natural resources and human resources.

In 2019 in Kazakhstan, investment in tourism development reached a historical record and amounted to 153.7 billion tenge, indicating significant attention to the development of the industry. Agrotourism has also become one of the priority areas in tourism, which emphasizes the strategic importance of this sector for Kazakhstan's economy.

In 2019, agritourism and tourism played a significant role in the economy of our republic, increasing its share in GDP to 5.6%. According to the plan, for 2025, this figure is expected to grow further to 8%. This means that investments in the tourism sector and expenditures of domestic and foreign tourists should increase by 7-8% per year. (*The profitability of the tourism sector may increase to 200 billion tenge per year, 2019*). The study shows that the agritourism and tourism sector has achieved the stated target due to the current dynamic development of the industry as shown in (Figure 2).

According to the press service of the Tourism Industry Committee, from 2020 to 2022, investments in tourism in Kazakhstan reached a record high of \$ 4 billion. Of these, in 2022 alone, their volume was equal to 513.3 billion tenge and more than 400 tourist facilities were put into operation.

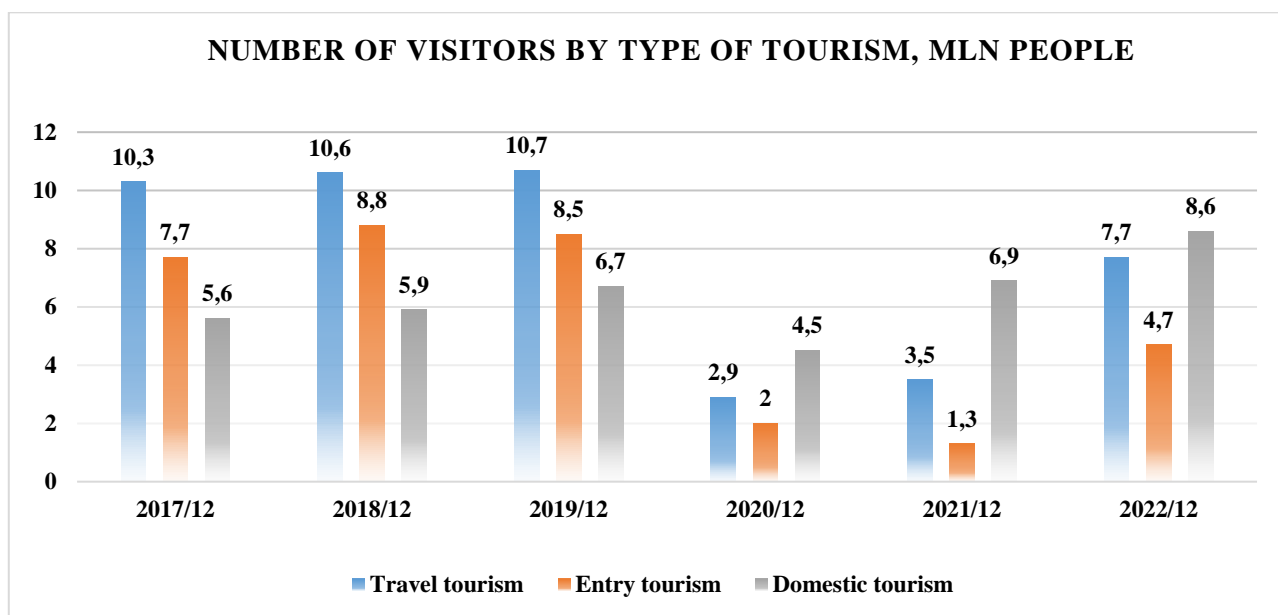


Figure 2 – Number of visitors served by type of tourism, according to Finreview calculations based on data from the ISE RK COP data (Novikova, 2013)

Over the past five years, the average annual occupancy rate of accommodation facilities amounted to 22-25%, with an average annual increase in tourist accommodation by 12.5%. Thus, we can state the dynamics of tourism development in the country as a whole.

Interestingly, the occupancy rate of agritourism accommodations almost does not change for the last five years and ranges from 22% to 25%. At the same time, the number of tourists lodging in these places has been increasing annually at a rate of 12.5%. These data indicate the dynamic development of the regional tourism industry in the country.

The basic methodological basis of the study is a systematic approach, namely the method of factor analysis, which allows to identify the main questions of the survey, which can help in the development of a conceptual framework of prospects for the development of agroecotourism in Almaty region.

Through the travel agency KAZTOUR was launched a sociological survey to determine the most frequent places of visit, attractive attractions and cities in Almaty region, conducted in the period from 05.06.2021 to 20.04.2022.

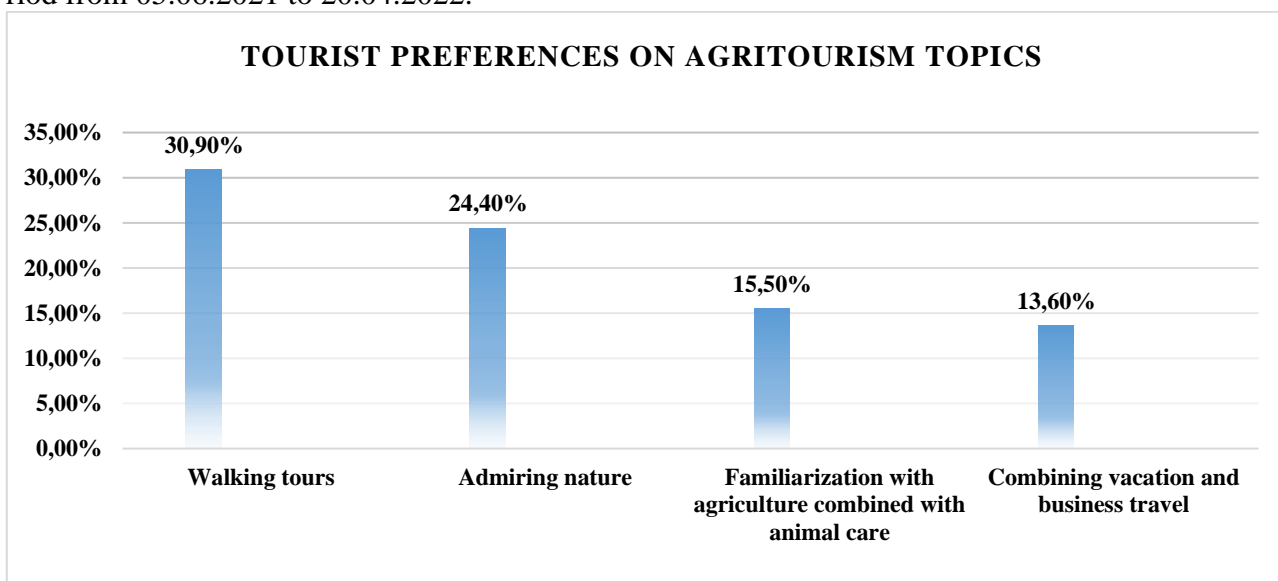


Figure 3 – Data of the sociological survey among the population of Almaty city residents to identify tourist preferences on the subject of agrotourism (author's materials).

The number of respondents who participated in the survey amounted to 1700 people. This sociological survey allowed to identify tourist preferences on the topics of agritourism (**Figure 3**).

According to the sociological survey conducted among the residents of Almaty, the following conclusions can be drawn:

- 30.9% chose any theme in the context of walking due to the health-improving and strengthening effect on the body, emotional positivity, accessibility for all age groups and levels of physical fitness;
- 24.4% chose admiring nature as an immunity booster and inflammation reliever;
- 15.5% would prefer an introduction to agriculture combined with animal care. In such trips, tourists get acquainted with agriculture, study the animal world and have the opportunity to care for pets;
- 13.6% of respondents are interested in the opportunity to enrich their business travel experience with a variety of themed experiences, including agritourism and other forms of tourism.

In exploring preferences for vacation landscape selection, data on preferences for agritourism and tourism were obtained and are presented in (**Figure 4**).

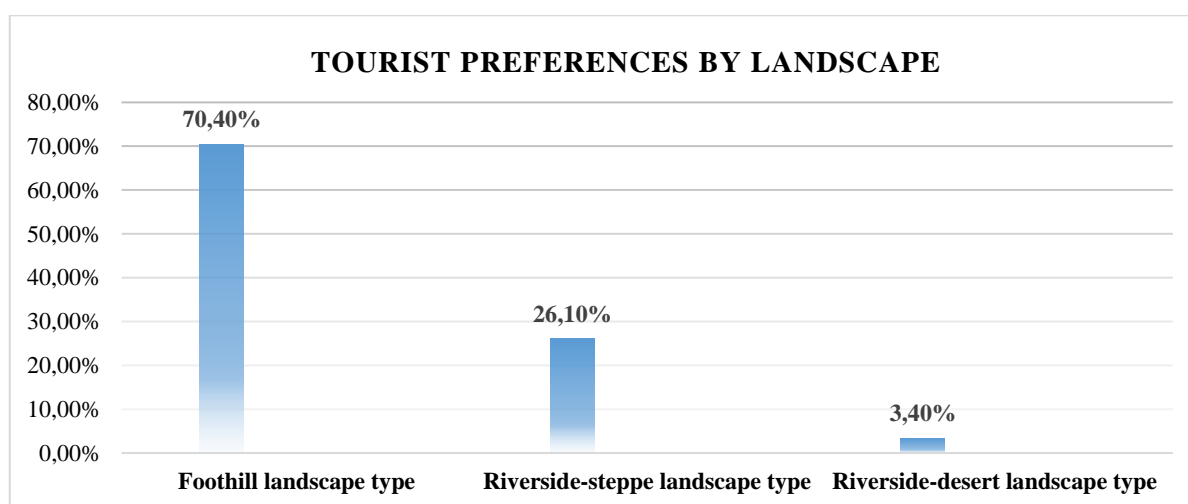


Figure 4 – Data of the sociological survey among the population of Almaty city residents to identify tourist preferences for landscape (author's materials).

During detailed analysis of the obtained data on landscape, it was determined that the majority of 70.4% of respondents defined for themselves the foothill type of landscape. At the same time, the third part of respondents 26.1% favored the riverine-steppe type of landscape. And only 3.4% of respondents favored the riverine-desert type.

One of the main questions during the sociological analysis was the question about the duration of the desired tourist trip, the obtained results are shown in (**Figure 5**).

The data obtained indicate a high interest of the population in various travel formats. According to the survey, the majority of respondents would prefer two-day trips with an overnight stay (47.60%), while 33% preferred one-day tours without an overnight stay. 19.4% of respondents expressed a desire to go on a week-long trip. The development of agritourism in Almaty region will expand opportunities for the tourism industry and reduce the share of outbound tourism.

For full-fledged development of agritourism in Kazakhstan it is necessary at the city or even state level to develop a program, which should reflect the following proposals:

- at the legislative level to adopt the term “Agrotourism”, which can be interpreted as, “visiting rural areas with the provision of services for temporary accommodation or stay, meals, organization of leisure activities, excursion services;
- state support for citizens or organizations, peasant farms involved in the development of agro-tourism in the form of subsidies, preferential treatment, etc. is necessary;

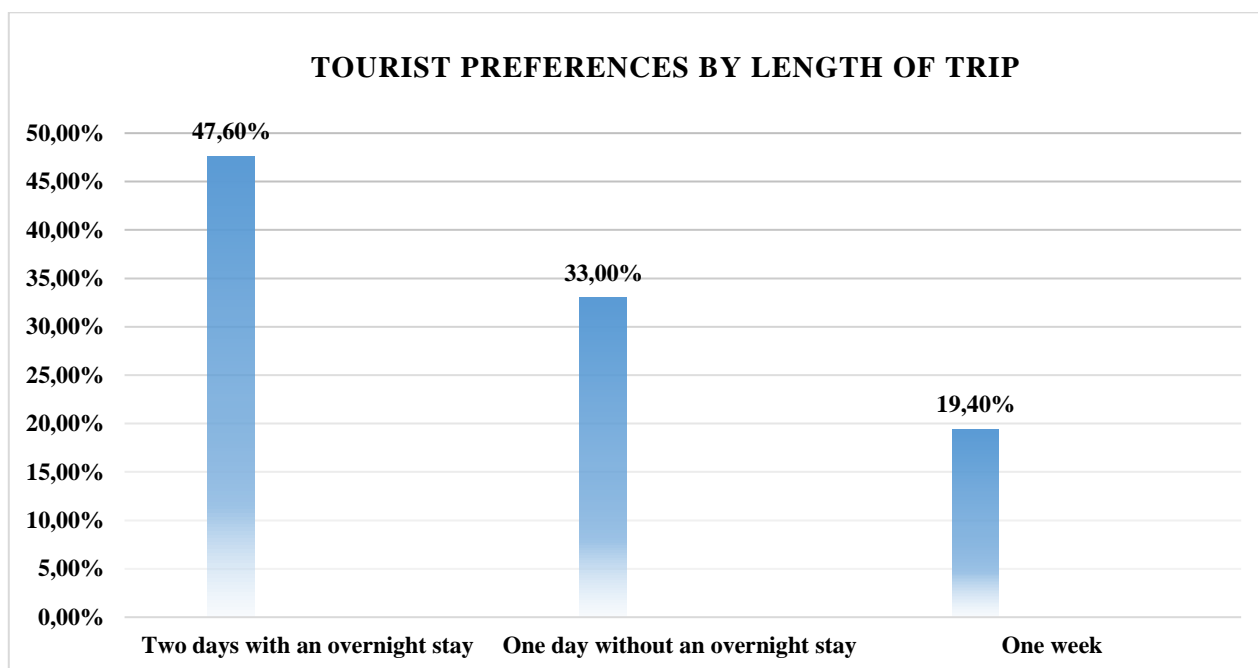


Figure 5 – Data of sociological analysis among the population of Almaty city residents to identify tourist preferences for the duration of the trip (author's materials).

- opening of consulting centers that would provide technical assistance in opening agricultural farms or tourist bases;
- it is necessary to develop rural areas and create the required infrastructure;
- it is necessary to create a catalog of promising villages and hamlets, with a detailed description of the cultural characteristics of each village and the possibility of creating agritourism bases there,
- the development of agritourist bases should start with the involvement of modern technologies and the development of modern infrastructure;
- design of fast-built and mobile homestead tourist lodges;
- utilize the advantages of a multi-ethnic and multi-confessional republic, where representatives of each nationality could become part of agro and ethno-tourism;
- to train specialists in the field of agro-tourism, as there is now an acute shortage of professional tourism workers who know both the local history of the region and our rich cultural and historical heritage;
- use the “Rukhani zhangiru” program as an important tool to involve school-age children in its development;
- construction of specialized agro-tourist villages, which will additionally create jobs, increase the intellectual knowledge of villagers in the field of business development and vision, use of new technologies and rational use of human and natural resources;
- together with the development of agro-tourism, such directions as pilgrimage tourism, adventure tourism and ethnographic tourism should be developed;
- use the time of national holidays to create agrotours, this will motivate the development of rural tourism, increase self-education and cultural education of villagers, which in general can lead to a decrease in the outflow of villagers to big cities in search of income and a better life;
- it is necessary to actively use areas of high-mountain pastures, for example, Assy Plateau, for popularization of “Jailau” tourism;
- development of such types of tourism as hunting tourism, gastronomic tourism, medical tourism, harvesting, ethnographic tourism, eco-community tourism, agricultural tourism, press tours for mass media (**Figure 6**).

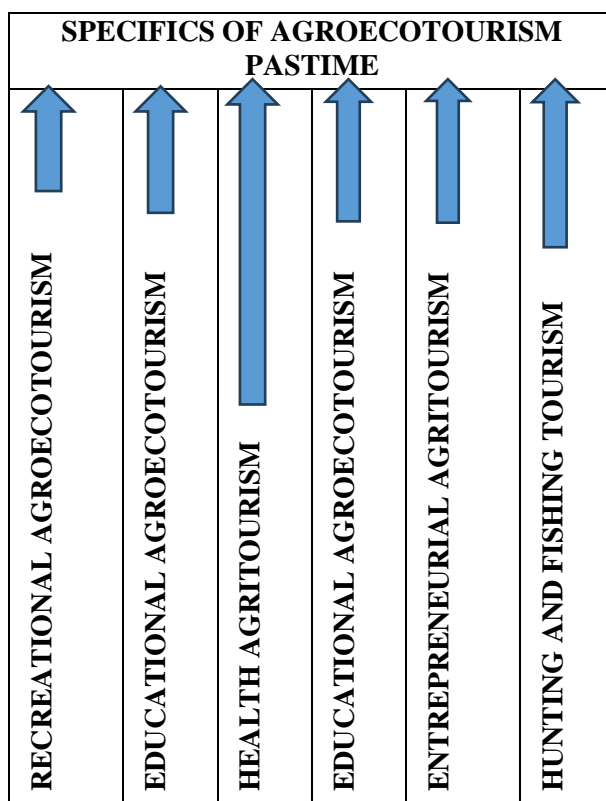


Figure 6 – Specificity of agroecotourism pastime (author's materials).

Thus, it can be noted that today agrotourism is a popular, rapidly developing type of tourism in Kazakhstan. It allows rational and profitable use of sparsely populated areas of the country, support and promote agriculture and the most effective use of natural riches and landscape features of certain regions. It is a good opportunity for tourists to get a unique experience, to plunge into the culture and life of the rural population, among picturesque nature, in an ecologically clean environment, and for farmers – a new source of income to maintain and develop the farm. In addition, agrotourism allows to preserve folk traditions and customs, revealing their essence and history from the very roots.

In the context of the development of the tourism cluster in the republic, the key areas of tourism have been identified: business, ecological, cultural and educational and active adventure tours. Special attention is paid to the development of agrotourism as one of the promising sectors in the tourism industry (Figure 7).

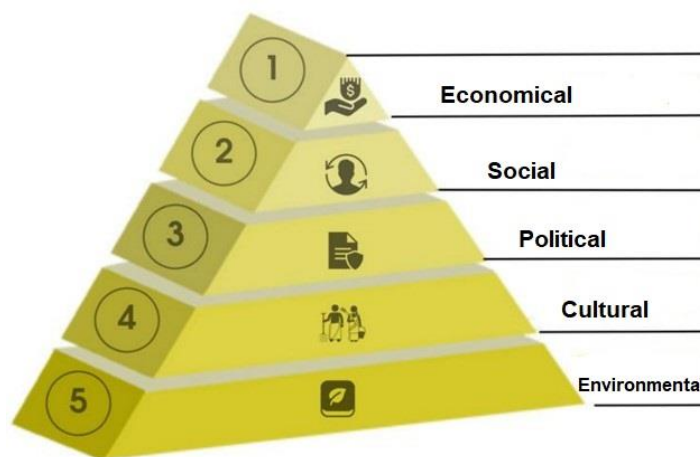


Figure 7 – Prerequisites for the formation of agroecotourism (author's materials).

This is due to Kazakhstan's competitive advantages related to its unique culture, rich and diverse natural potential, agro-tourism, increasing business activity and the possibility of developing the tourism industry. Kazakhstan offers various types of active recreation and travel, which contributes to attracting the attention of tourists from all over the world.

For less mobile groups, tourism, especially agro-ecotourism, plays an important role in social rehabilitation. Participation in self-sufficiency while traveling contributes to social and domestic rehabilitation. Acquisition of skills of adaptation to different environments provides social and environmental rehabilitation. At the same time, learning new skills, abilities and knowledge contributes to socio-educational rehabilitation. Participation in excursions contributes to socio-cultural rehabilitation, and interaction with other tour participants provides socio-psychological rehabilitation. Thus, agroecotourism is an important part of “inclusive tourism”, taking into account the needs of all segments of the population

To see something new and beautiful is the desire of people at all times. In this respect, agro-ecotourism will play a leading role among other types of tourism. Moreover, agroecotourism will provide a combination of environmental and cultural safety, contribute to the preservation of the cultural and natural environment, and help to create all the conditions for greater awareness of the local population.

Agro-ecotourism should be developed sustainably, and for this it is necessary for tourists to follow the rules and principles of agro-ecotourism. The categories related to this type of tourism should be defined and classified, special routes and ecotours should be identified and protected from mass tourism, and they should be based on the principles of sustainable and ecotourism.

5 CONCLUSIONS

1. In Almaty region there are many resources that are promising for the development of agroecotourism. These resources are related to various activities such as agriculture, hunting, fishing and collection of wild plants. The city of Almaty plays an important role in the formation of tourist flow, but also the rural areas of the region can be a potential base for the establishment of agro-tourism complexes.

2. One of the important aspects of agrotourism is the social component, which allows to cover a wide range of socially cared for groups of the population, including immobile citizens. It is especially important to take this into account when organizing cognitive children's recreation in the field of tourism.

3. A sociological survey of potential tourists of different socio-demographic groups was conducted, which determined what types of agritourism are the most popular among the population. Thus, based on the author's questionnaire, revealed tourist preferences on the subject of agritourism, tourist preferences by landscape and by duration of the trip.

4. The proposed prospective development of agritourism in Almaty region contributes to the expansion of opportunities for tourists and reducing the flow of outbound tourists. The created infrastructure contributes to the satisfaction of a variety of tourist preferences of the population.

5. The main tasks are defined and the necessary methods for solving the issues of popularization and development of agrotourism in the territory of the Republic of Kazakhstan are proposed.

6. Within the framework of development of tourist cluster in the republic the priority directions of tourism were defined: business tourism, ecological tourism, cultural and cognitive tourism, active and adventure tours.

7. To date, due to the current situation with the coronavirus, both in the world and in Kazakhstan, a huge number of tourists will prefer rest and tourism within our country. Additional interest may be the interest of foreign tourists, which will increase the flow of local tourists.

REFERENCES

1. Message from the Head of State Kassym–Jomart Tokayev to the people of Kazakhstan. September 1, 2020. (2020). [Poslanie Glavy gosudarstva Kasym–ZHomarta Tokaeva narodu Kazahstana. 1 sentyabrya 2020 g.] [cited November 11, 2023]. URL: https://www.akorda.kz/ru/addresses/addresses_of_president/poslanie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-narodu-kazahstana (In Russ.).
2. **Erdavletov, S.R.** (2011). Geography tourism [Geografiya turizma] A textbook for studying the course "fundamentals of Tourism", Almaty: Kazakh University, 412 (In Russ.).
3. **Zorin, I.V., Zorin, G.I.** (2016). Identity and tourism [Identichnost' i turizm] [PDF file]. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/identichnost-i-turizm/viewer>
4. **Mukhambetov, T.I., Janguttina, G.O., Esaidar, U.S., Myrzakulova, G.R., Imanbekova, B.T.** (2014). The life cycle of sustainable eco-tourism: a Kazakhstan case study, WIT Transactions on Ecology and The Environment, Almaty Technological University, 187, 39–49. <https://doi.org/10.2495/ST140041>
5. **Kairova, Sh.G., Essimova, D.D., Malikova, F.M.** (2018). Sustainable ecological tourism development in the republic of Kazakhstan: problems and prospects, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 204, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/204/1/012014>
6. **Baizhanova, Sh.** (2007). Natural resources of ecological tourism in Kazakhstan [Prirodnye resursy ekologicheskogo turizma v Kazahstane] Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 6, 127–129 (In Russ.).
7. **Kairova, Sh.G., Yessimova, D.D., Malikova, F.M.** (2018). Sustainable eco-tourism In Kazakhstan [Ustojchivyy ekologicheskij turizm V Kazahstane] Science and tourism: strategies for interaction, 8, 22–28. URL: <http://journal.asu.ru/st/article/view/4447> (In Russ.).
8. **Kvartalnov, V.A.** (2014). Tourism [Turizm] Publishing house: Finance and Statistics Publishing House, 336 (In Russ.).
9. **Zholdasbekov, A.A.** (2012). Current problems of the development of the tourism cluster on the South Kazakhstan section of the Great Silk Road [Aktual'nye problemy razvitiya turistskogo klastera na YUzhno-Kazahstanskom otrezke Velikogo Shelkovogo Puti] SERVICE PLUS: Russian State University of Tourism and Service, 3, 16–19. [PDF file]. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-problemy-razvitiya-turistskogo-klastera-na-yuzhno-kazahstanskom-otrezke-velikogo-shelkovogo-puti> (In Russ.).
10. **Mamadiyarov, M.D., Pykharev, A.N.** (1999). Problems of tourism development in South Kazakhstan region [Problemy razvitiya turizma v YUzhno Kazahstanskoj oblasti] Bulletin of KazGU, geographical series, 8, 105–109. (In Russ.).
11. Patrick Abercrombie and the formulation of the problem of rural nature conservation in England. (2015). [Patrik Aberkrombi i postanovka problemy ohrany sel'skoj prirody v Anglii] [cited January 05, 2024]. URL: <https://townevolution.ru/books/item/f00/s00/z0000016/st029.shtml> (In Russ.).
12. **Qiu, S., Fan, S.** (2016). Recreational value estimation of suburban leisure agriculture: a case study of the Qianjiangyue agritourism farm, Journal of Mountain Science, 13, 183–192. <https://doi.org/10.1007/s11629-014-3286-8>
13. **Mastronardi, L., Giaccio, V., Giannelli, A., Scardera, A.** (2015). Is agritourism eco-friendly? A comparison between agritourisms and other farms in Italy using farm accountancy data network dataset, SpringerPlus, 4 (1): 590, 12. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1353-4>
14. **Khanal, A.R., Mishra, A.K., Omobolaji, O.** (2019). Examining organic, agritourism, and agri-environmental diversification decisions of American farms: are these decisions interlinked, Review of Agricultural, Food and Environmental Studies, 100, 27–45. <https://doi.org/10.1007/s41130-019-00092-w>

15. **Scaglione, A., Mendola, D.** (2017). Measuring the perceived value of rural tourism: a field survey in the western Sicilian agritourism sector, *Quality and Quantity*, 51, 745–763. <https://doi.org/10.1007/s11135-016-0437-8>.
16. **Wang, C.** (2020). The necessity of taking a community approach in a historical cultural landscape conservation: a case of the Jianan Irrigation System in Taiwan, *GeoJournal*, 85, 107–126. <https://doi.org/10.1007/s10708-018-9950-8>
17. **Cocks, M., Vetter, S., Wiersum, K.F.** (2017). From universal to local: Perspectives on cultural landscape heritage in South Africa, *International Journal of Heritage Studies*, 24, 35–52. <https://doi.org/10.1080/13527258.2017.1362573>
18. **García-Martín, M., Bieling, C., Hart, A., Plieninger, T.** (2016). Integrated landscape initiatives in Europe: Multi-sector collaboration in multi-functional landscapes, *Land Use Policy*, 58, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.07.001>
19. **Hernández-Morcillo, M., Bieling, C., Bürgi, M.** (2017). Priority questions for the science, policy and practice of cultural landscapes in Europe, *Landscape Ecology*, 32, 2083–2096. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0524-9>
20. **Amalu, T.E., Otop, O.O., Duluora, E.I., Omeje, V.U., Emeana, S.K.** (2018). Socio-economic impacts of ecotourism attractions in Enugu state, Nigeria, *GeoJournal*, 83(6), 1257–1269. <https://doi.org/10.1007/s10708-017-9830-7>
21. **Anderson, W.** (2018). Linkages between tourism and agriculture for inclusive development in Tanzania: A value chain perspective, *Journal of Hospitality and Tourism Insights*, 1 (2), 168–184. <https://doi.org/10.1108/JHTI-11-2017-0021>
22. **Ferrari, G., Jiménez, J., Secondi, L.** (2017). Tourists' expenditure in Tuscany and its impact on the regional economic system, *Journal of Cleaner Production*, 171, 1437–1446. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.121>
23. **Hampton, M. P., Jeyacheya, J., Long, P.H.** (2018). Can tourism promote inclusive growth? Supply chains, ownership and employment in Ha Long Bay, Vietnam, *The Journal of Development Studies*, 54 (2), 359–376. <https://doi.org/10.1080/00220388.2017.1296572>
24. Horwath HTL. (2018). Market report Senegal: Tourism and hotel market overview. [PDF file]. Retrieved from: <https://www.hospitalitynet.org/file/152008469.pdf>
25. **Imbaya, B.O., Nthiga, R.W., Sitati, N.W., Lenaiyasa, P.** (2019). Capacity building for inclusive growth in community-based tourism initiatives in Kenya, *Tourism Management Perspectives*, 30, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2019.01.003>
26. **Kuroda, N.** (2019). Conservation Design for Traditional Agricultural Villages: A Case Study of Shirakawa-go and Gokayama in Japan, *Built Heritage*, 3, 7–23. <https://doi.org/10.1186/BF03545724>
27. **Ruoso, L.E.** (2020). Can land-based and practice-based place identities explain farmers' adaptation strategies in peri-urban areas? A case study of Metropolitan Sydney, Australia, *Agriculture and Human Values*, 37, 743–759. <https://doi.org/10.1007/s10460-019-10009-4>
28. **Guay, J., Waaub, J.** (2019). SOMERSET-P: a GIS-based/MCDA platform for strategic planning scenarios' ranking and decision-making in conflictual socioecosystem, *EURO Journal on Decision Processes*, 7, 301–325. <https://doi.org/10.1007/s40070-019-00106-4>
29. **Novikova, V.I.** (2013). Components of the territorial recreational system: definition, classification [Sostavlyayushchie territorial'noj rekreacionnoj sistemy: opredelenie, klassifikatsiya] *Pskov Regionological Journal*, 16, 18. [PDF file]. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostavlyayushchie-territorialnoy-rekreatsionnoy-sistemy-opredelenie-klassifikatsiya> (In Russ.)
30. The profitability of the tourism sector may increase to 200 billion tenge per year (2019). [Dohodnost' turisticheskogo sektora mozhet uvelichit'sya do 200 mlrd tenge v god] [cited Desember 10, 2023]. <https://businessmir.kz/2020/03/04/dohodnost-turisticheskogo-sektora-mozhet-uvelichitsya-do-200-mlrd-tenge-v-god/> (In Russ.).

UDC 711
IRSTI 67.07.11
REVIEW ARTICLE

STUDY ON THE IMPACT OF DEFORMATIONS OF MULTI-STOREY BUILDINGS IN ALMATY

A.N. Amangeldi^{1,*} , A.N. Magzum² ,
T.P. Pentayev³ , D.N. Suleymenova⁴ 

¹Al-Farabi Kazakh National university, 050040, Almaty, Kazakhstan

Abstract. *The article provides an assessment of the stability of buildings and structures in the city of Almaty under the influence of frequent earthquakes. Studying this process is not only interesting from a scientific point of view but also has great practical significance for ensuring the safety and stability of buildings in the city. The aim of the work is to investigate the condition of buildings in Almaty in terms of seismic safety characteristics. The research tasks include studying the types of buildings common in the city of Almaty and conducting stability calculations for buildings. This article selects the main and most common type of buildings and structures in each district of the city of Almaty as the research object. The calculations of the level of buildings' stability to seismic vibrations in different areas of the city, information on the estimated seismic resistance level of most buildings, and the calculation of their possible stability indicators are provided. The results show that the stability of buildings and structures in the city depends on reducing seismic activity from bottom to top based on their location (on the map). According to the calculation conclusions, it is necessary to increase the number of design organizations responsible for construction quality and use different building structures and construction methods in different parts of the city. Problems related to building deformation are relevant everywhere. Studying this process in Almaty will contribute to the global knowledge base and help create new technical solutions for safe construction.*

Keywords: *Seismicity, safety, earthquake, deformations, building.*

***Corresponding author**





Ademi Amangeldi, e-mail: ademamurr@gmail.com

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-04>

Received 10 February 2024; Revised 10 March 2024; Accepted 21 May 2024

ӨОЖ 711
FTAMP 67.07.11
ШОЛУ МАҚАЛАСЫ

АЛМАТЫ ҚАЛАСЫНДАҒЫ КӨПҚАБАТТЫ ҚҰРЫЛЫСТЫҢ ДЕФОРМАЦИЯЛАНУ ҮДЕРІСІН ЗЕРТТЕУ

Ә.Н. Амангелді^{1,*} , А.Н. Мағзум² ,
Т.П. Пентаев³ , Д.Н. Сулейменова⁴ 

¹Өл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, 050040, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа. Бұл мақалада жиі болып тұратын жер сілкіністері әсерінен Алматы қаласындағы ғимараттар мен құрылыстардың сейсмикалық тербелістерге тұрақтылығына баға берілген. Бұл процесті зерттеу ғылыми тұрғыдан ғана қызықты емес, сонымен қатар қаладағы ғимараттардың қауіпсіздігі мен тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін үлкен практикалық мәнге ие. Жұмыстың мақсаты – Алматы қаласындағы ғимараттардың күйін сейсмикалық қауіпсіздігі сипаттамалары бойынша зерттеу. Зерттеудің міндеттері: Алматы қаласындағы кең тараған құрылыстар түрін зерттеу және ғимараттар тұрақтылығына есептеулер жүргізу. Берілген мақалада зерттеу нысаны ретінде Алматы қаласының әр ауданындағы ғимараттар мен құрылыстардың негізгі және кең тараған түрі таңдалды. Қаланың әр түрлі аудандарындағы ғимараттардың сейсмикалық тербелістерге тұрақтылық деңгейінің есептеулері, құрылыстардың көп бөлігінің жобалық сейсмотұрақтылық деңгейі туралы мәліметтер келтіріліп, олардың мүмкін болатын тұрақтылық көрсеткіштері есептелген. Нәтижелер көрсеткендей қаланың ғимараттары мен құрылыстарының тұрақтылығы олардың орналасқан жеріне (карта бойынша) төменнен жоғары бағытта сейсмикалық белсенділіктің төмендеуіне байланысты болады. Есептеулер қорытындыларына сәйкес, құрылыс сапасы үшін жауапты жобалау ұйымдарының санын көбейтілу және қаланың түрлі бөліктеріндегі ғимараттар салу үшін түрлі құрылымын және тәсіл пайдалану қажет. Ғимараттардың деформациясымен байланысты мәселелер барлық жерде өзекті. Алматыда бұл процесті зерттеу жаһандық білім қорына үлес қосады және қауіпсіз сонымен қатар тұрақты ғимараттарды салу үшін жаңа техникалық шешімдерді жасауға көмектеседі.

Түйін сөздер: сейсмикалық қауіпсіздік, жер сілкінісі, деформация, құрылыс.

*Автор-корреспондент





Әдемі Амангелді, e-mail: ademamurr@gmail.com

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-04>

Алынды 10 ақпан 2024; Қайта қаралды 10 наурыз 2024; Қабылданды 21 мамыр 2024

УДК 711
МРНТИ 67.07.11
ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИЙ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ В ГОРОДЕ АЛМАТЫ

Ә.Н. Амангелді^{1,*} , А.Н. Мағзум² 
Т.П. Пентаев³ , Д.Н. Сулейменова⁴ 

¹Казахский Национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Алматы, Казахстан

Аннотация. В данной статье дана оценка устойчивости зданий и сооружений города Алматы под воздействием частых землетрясений. Исследование этого процесса не только интересно с научной точки зрения, но и имеет большое практическое значение для обеспечения безопасности и устойчивости зданий в городе. Цель работы – исследование состояния зданий г. Алматы по характеристикам сейсмической безопасности. Задачи исследования: изучить типы зданий, распространенные в городе Алматы, и провести расчеты устойчивости зданий. В данной статье в качестве объекта исследования выбран основной и распространенный тип зданий и сооружений в каждом районе города Алматы. Приведены расчеты уровня устойчивости зданий к сейсмическим колебаниям в различных районах города, сведения о расчетном уровне сейсмостойкости большинства зданий и рассчитаны их возможные показатели устойчивости. Результаты показывают, что устойчивость зданий и сооружений города зависит от снижения сейсмической активности снизу-вверх от их расположения (на карте). По выводам расчетов необходимо увеличить количество проектных организаций, ответственных за качество строительства, и использовать разные конструкции и способы возведения зданий в разных частях города. Проблемы, связанные с деформацией зданий, актуальны повсеместно. Исследование этого процесса в Алматы внесет вклад в глобальную базу знаний и поможет создать новые технические решения для строительства безопасных и устойчивых зданий.

Ключевые слова: сейсмичность, безопасность, землетрясение, деформации, строительство.

*Автор-корреспондент
Әдемі Амангелді, e-mail: ademamurr@gmail.com

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-04>

Поступило 10 февраля 2024 г.; Пересмотрено 10 марта 2024 г.; Принято 21 мая 2024 г.

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС/ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 КІРІСПЕ

Құрылыстардың жүргізілуі және тұрақты кеңею жағдайында ғимараттардың сейсмотұрақтылығын әрқашан да ойластырып отыру қажет, себебі жер сілкінісі кезінде халықтың өміріне қатер туындауы құрылысты монтаждаудың бастапқы кезеңіне байланысты. Уақыттың жүктемесіне, ұдайы өзгеріске ұшыратын климаттық жағдайларға және табиғи апаттардың салдарына төтеп бере алмайтын ғимараттан жаман ештеңе жоқ. Сондықтан да Алматы қаласындағы көпқабатты үйлердің деформациялану процесін зерттеу жергілікті инженерлер мен құрылыс мамандары үшін өзекті мәселеге айналып отыр.

Қалада кең тараған ғимараттар мен құрылыстарды сараптау және олардың сейсмикалық тербелістерге тұрақтылығын өлшеу әдістері қолданылған. Берілген мақалада қаланың әр түрлі аудандарындағы ғимараттардың сейсмикалық тербелістерге тұрақтылық деңгейінің есептеулері, құрылыстардың көп бөлігінің жобалық сейсмотұрақтылық деңгейі туралы мәліметтер келтіріліп, олардың мүмкін болатын тұрақтылық көрсеткіштері есептелген. Алматы қаласында сейсмикалық тербелістерге түрлі бөліктеріндегі ғимараттар мен құрылыстардың тұрақтылық деңгейіне есептеулер жүргізіліп бағаланған. Нәтижелер көрсеткендей қаланың ғимараттары мен құрылыстарының тұрақтылығы олардың орналасқан жеріне (карта бойынша) төменнен жоғары бағытта сейсмикалық белсенділіктің төмендеуіне байланысты болады. Есептеулер қорытындыларына сәйкес, құрылыс сапасы үшін жауапты жобалау ұйымдарының санын көбейтілу және қаланың түрлі бөліктеріндегі ғимараттар салу үшін түрлі құрылымын және тәсіл пайдалану қажет.

Қазіргі уақытта ықтимал қауіпті табиғи апаттардың қауіпі ерекше байқалады. Климат пен табиғи процестердің өзгеруіне байланысты адамдар өздеріне төнетін ықтимал қауіптерден хабардар болуы керек. Егер планетаның басқа бөліктерінде адамдарға дауыл, торнадо, цунами және басқа да табиғи апаттар қауіп төнсе, Алматыда ең өзекті мәселе жиі жер сілкінісі болды және болып қала береді (**Kozylbaev, 2003**). Алматы қаласы қашанда инновациялық дамудың орталығы және тұрақты инфрақұрылымды дамытатын орын болды. Тұрақты кеңейту және салу жағдайында ғимараттардың сейсмикалық төзімділігін әрқашан ескерген жөн, өйткені жер сілкінісі кезінде халықтың өміріне қауіп төнуі құрылыстарды салуды бастау кезінде негіз болып табылады. Жер сілкінісі кезінде ғимараттар мен құрылыстардың арасында қауіпсіз болу үшін азаматтар сейсмикалық аймақтағы құрылыс жағдайлары туралы көбірек білуі керек.

Мақсат – Алматы қаласындағы көпқабатты ғимараттардың жағдайын сейсмикалық қауіпсіздік туындап қалған жағдайда деформациялану бойынша зерттеу.

Зерттеу мақсаттары:

- Алматы қаласында кең таралған құрылыс түрлерін зерттеу;
- Ғимараттардың орнықтылық есептерін жүргізу;
- Қаланың ғимараттары мен құрылыстарының кең тараған түрлерін талдау, олардың сейсмикалық тербелістерге төзімділігін өлшеу әдісі қолданылды.

2 ӘДЕБИЕТКЕ ШОЛУ

Ғимараттардың мақсаты бойынша азаматтық (тұрғын, қоғамдық, әкімшілік), өнеркәсіптік, ауылшаруашылық деп бөлетін қолданыстағы жіктелуіне қарамастан, 1960–1980 жж. көпқабатты үйлердің көпфункционалды түрі кең тарады. «Көпқабатты үйлер» көп функционалды кешендер ретінде құрыла бастады, оларға тұрғын үйлермен қатар адам қызметінің әртүрлі салаларына жауапты мекемелер, ұйымдар мен кәсіпорындар: билік органдары, банк құрылымдары, сауда, ойын-сауық және спорт орталықтары, қоғамдық тамақтану орындары және т.б. мекемелер кіре алады. Күннен күнге мыңдаған адамдар осы кешендердің аумағында тұра бастады, бұл олардың ауқымы мен тұтас қалалардың инфрақұрылымындағы маңызды рөлінің дәлелі болды (**Valkov, 2015**).

Алуан түрлі құрылыстар және олардың тұрғызылуының шарттары түрлі әдістерге негізделген геодезиялық өлшемдердің орындалуын қажет етеді. Қазіргі таңда ғимараттар деформациясын бақылау инженерлік-геодезиялық жұмыстар тәжірибесінде түбегейлі орын алады. Табиғи немесе техногенді әсерлерден болған деформацияларды алдын алу жағдайларын қалыптастыру өте маңызды. Осы талаптарды қамтамасыз ету үшін соңғы ғылым мен техниканың жетістіктеріне негізделген арнайы әдістер мен өлшеу құралдары жетілдірілуде (**Borantayeva et al., 2016**).

Қазіргі уақытта төтенше жағдайлардың туындауының алдын алуы бойынша инженерлік-техникалық іс-шаралар кешенін таңдауды негіздеу мақсатында ғимараттар мен құрылыстардың техникалық жағдайын бақылау мәселесі ерекше маңызға ие. Сонымен қатар, жүк көтергіш құрылымдардың техникалық жағдайын бақылау жүйелі болуы керек және сандық критерийлер негізінде ағымдағы өзгерістерді бағалауға мүмкіндік беруі керек, яғни нақты беріктіктің, қаттылықтың және нормативтік талаптары бар құрылымдық элементтердің тұрақтылық сәйкестігін анықтау процедураларына негізделеді (**Suleymenova et al., 2020**).

Зерттеу нысаны ретінде Алматы қаласының әр ауданындағы ғимараттар мен құрылыстардың негізгі және кең тараған түрі таңдалды. Бұл құрылымдардың типологиясы құрылымдық айырмашылықтардан тұрды. Ғимараттар жобалық сапасы, өңдеу сапасы, материалдардың сапасы және сейсмикалық төзімділіктің (PLUS) болжанған (жобалық) деңгейін ескере отырып, олардың сапа деңгейіне сәйкес жіктеледі. Геодезисттер мен құрылысшылар 3 сапа деңгейін пайдаланады: Q1: төмен; Qm: орташа; Qh: жоғары (**Vilchik, 2008**).

Бұл топырақтың тығыздығы, игеру аймағының сейсмикалық белсенділігі, топырақтың қасиеттері мен жер асты суларына жақындығы, сондай-ақ аймақтың метеорологиялық ерекшеліктері сияқты факторларға байланысты болашақ құрылыстарды жобалау кезінде жіктеудің ең қолайлы түрі.

Q1 деңгейі Қазақстан Республикасының басым бөлігінде және Алматы қаласында негізгі деңгей болып табылады және құрылымдардың жасы мен құрылыс құрылымын ескере отырып, құрылыстардың жалпы санының 60-65% құрайды. Шкалада пайдалану сенімділігі дәрежесі бойынша «датчик объектілері» және басқа аспектілер келесі үш дәрежеге бөлінеді:

Бірінші дәреже дәлелденген/сенімді (жақсы зерттелген жаппай өндірілген ғимараттар және басқа да стандартты аспектілер, соның ішінде макросейсмикалық шкаланың алдыңғы буындарында қолданылғандар).

Екінші дәреже эксперименттік/салыстырмалы түрде сенімді (сенсорлық объектілер ретінде қабылданады және стандартты болуға ұмтылады).

Үшінші дәреже күмәнді (сенсорлық объектілер ретінде әлі бекітілмеген, тексерілген, бірақ жеткілікті түрде тексерілмеген) (**Izenberg, 2007**).

«Сенсорлық объектілер» шкаласы – сейсмикалық белсенділікке барынша төзімді құрылымдардың классификациясы, әдетте, бірінші қатарға құрылыс құрылымы негізінен аймақта кең таралған құрылымдар жатады. Сонымен, 3-дәреже деректері белгілі бір аумақта құрылыстың белгілі бір түрінің басымдылығының көрсеткіші болып табылады.

Қазіргі геодезиялық аспаптардағы деформацияларды, әсіресе қауіпті, техникалық күрделі және бірегей объектілерді жоғары дәлдікпен бақылауда электронды деңгейден бастап, инклинометрлерді қолдануға дейін электронды көлбеу өлшегіштердің рөлі мен мақсаты үнемі өсіп келеді. Мәліметтерді ұзақ уақыт бойы автоматты түрде жазу және оны айтарлықтай қашықтыққа жіберу мүмкіндігінің пайда болуы цифрлық инклинометрияның дамуына ықпал етті.

Жоғары дәлдіктегі инклинометрлердің жұмысы келесі негізгі принциптерге негізделген:

- оптикалық-электрондық (сұйықтық) принципі (Lucas Schaevitz - AccuStar II, Leica Geosystems - NIVEL200);
- маятник принципі (Taylor Hobson – TALYLEVEL 4);

- электронды (конденсатор) принципі (TESA - NIVELTRONIC, Wyler AG - Zerotronic, Zeromatic);

- гироскопиялық принцип (ауырлық үдеуін пайдалану) (DMT GmbH – ROTLEVEL) (Hiller & Bernd, 2017).

3 МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Құрылымдардың сейсмикалық белсенділікке төзімділігінің сенімділігін көрсететін коэффициент KR қарқындылығының мәндері (баллдары) келесі формула (1) бойынша анықталады:

$$KR = n \cdot k_1 + m \cdot k_2 + l \cdot k_3 / 0,8 \cdot N \quad (1)$$

мұндағы N – қарқындылықты тағайындау кезінде қолданылатын әсерлердің/мүмкіндіктердің жалпы саны, n – 1-ші дәрежедегі әсерлердің/мүмкіндіктердің саны, m – 2-ші дәрежелі әсерлер/белгілер саны, l – 3-дәрежелі әсерлер/белгілер саны, $k_1=0,8$, $k_2=0,5$, $k_3=0,2$ – I тағайындау үшін қолданылатын әсерлердің салмағы/маңыздылығының ішінара коэффициенттері (Nikolayev, 2019).

Осы есептеулерге сәйкес алынған мәндер кесте түрінде жасалынды. Есептің осы түрінің нәтижелері бойынша қала аудандарының әрқайсысында түрі басым болатын құрылымдар зерттеу объектілері болды. Бұл айырмашылықтар қаладағы әр блоктың құрылысындағы айырмашылықтан да, Алматы қаласының аймақтарының геологиялық қасиеттерінен де туындайды.

Есептеулерден (1-кесте) көрініп тұрғандай, қаланың Түрксіб ауданында ғимараттардың негізгі бөлігі кірпішпен толтырылған темірбетон қаңқалардан тұрады (Building regulations II, 2000), ол, осы аймақтың сейсмикалық белсенділігін ескере отырып, минималды тұрақтылық пен максималды осалдыққа ие.

1-кесте

Алматы қаласы Түрксіб ауданы бойынша ғимараттардың тұрақтылығын есептеу нәтижелері

Осалдық класы						Түрксіб ауданы	Ықтимал зақымдану дәрежесі -d				
A	B	C	D	E	F		1	2	3	4	5
			•								•
Құрылыс түрі						Кірпішпен толтырылған темірбетон қаңқасы (ASD7)					

Жетісу ауданы бойынша есептеу нәтижелеріне сүйене отырып (2-кесте) кірпішпен толтырылған темірбетонды қаңқасы басым құрылымдар (ASD – бұл ғимаратты жобалау кезінде ескерілетін жүктеме деңгейі, егер бар болса) индекс болып табылады, олар келесіге бөлінеді: минус жүктемесі бар индекс – жоғарғы қабаттардағы жүктеме, минуссыз индекспен – төменгі қабаттардағы және іргетастағы жүктеме), максималды зақымдану дәрежесі және осалдықтың орташа класы бар, бұл әдетте қабылданбайды.

2-кесте

Алматы қаласы Жетісу ауданы бойынша ғимараттардың тұрақтылығын есептеу нәтижелері

Осалдық класы						Жетісу ауданы	Ықтимал зақымдану дәрежесі -d				
A	B	C	D	E	F		1	2	3	4	5
		•	○								•
Құрылыс түрі						Кірпішпен толтырылған темірбетон қаңқасы (ASD)					

Қаланың Әуезов ауданында сейсмикалық белсенділіктің шамадан тыс жоғарылауы кезінде құрылымдардың зақымдануының ықтимал қолайсыз деңгейі (3-кесте), осалдық пен зақымдану бойынша орташадан төмен.

3-кесте

Алматы қаласы Әуезов ауданы бойынша ғимараттардың тұрақтылығын есептеу нәтижелері

Осалдық класы						Әуезов ауданы	Ықтимал зақымдану дәрежесі -d				
A	B	C	D	E	Ф		1	2	3	4	5
			•	○					•		
Құрылыс түрі						Орташа деңгейлі темірбетон қаңқасы (ASD)					

Алматы қаласының Алмалы ауданында (4-кесте) осалдықтың орташа класы байқалады, бірақ темірбетонды қаңқалық құрылымдардың негізгі санына зақым келген жағдайда айтарлықтай жоғары дәрежедегі зақымдану күтіледі (**Building regulations II, 2000**).

4-кесте

Алматы қаласы Алмалы ауданы бойынша ғимараттардың тұрақтылығын есептеу нәтижелері

Осалдық класы						Алмалы ауданы	Ықтимал зақымдану дәрежесі -d				
A	B	C	D	E	Ф		1	2	3	4	5
	○	•							•		
Құрылыс түрі						Кірпішпен толтырылған темірбетон қаңқасы					

Есептеулер бойынша сейсмикалық белсенділік жағдайында қаланың ең қауіпсіз аймағы осалдық пен зақымдану аз байқалатын Бостандық ауданы болды (5-кесте). 1-суретте Бостандық ауданында орналасқан 5 қабатты тұрғын үй мысалы көрсетілген.

5-кесте

Алматы қаласы Бостандық ауданы бойынша ғимараттардың тұрақтылығын есептеу нәтижелері

Осалдық класы						Бостандық ауданы	Ықтимал зақымдану дәрежесі -d				
A	B	C	D	E	Ф		1	2	3	4	5
	•	○					•				
Құрылыс түрі						Орташа деңгейлі темірбетон қаңқасы (ASD)					



1-сурет – Алматы қ. Сәтпаев көшесіндегі тұрғын үй (автор материалы).

Қаланың Медеу ауданы (6-кесте), сондай-ақ қаланың салыстырмалы түрде тұрақты үстіртінде орналасқан, қауіпсіз осалдық класына ие, ол бірге жобалық жүктемелердің орташа деңгейімен (ЖҚК) құрылымдардың тұтастығына кепілдік бере алады.

6-кесте

Алматы қаласы Медеу ауданы бойынша ғимараттардың тұрақтылығын есептеу нәтижелері

Осалдық класы						Медеу ауданы	Ықтимал зақымдану дәрежесі - d				
A	B	C	D	E	Ф		1	2	3	4	5
	●	○						●			
Құрылыс түрі						ASD деңгейі орташа темірбетон қаңқасы					

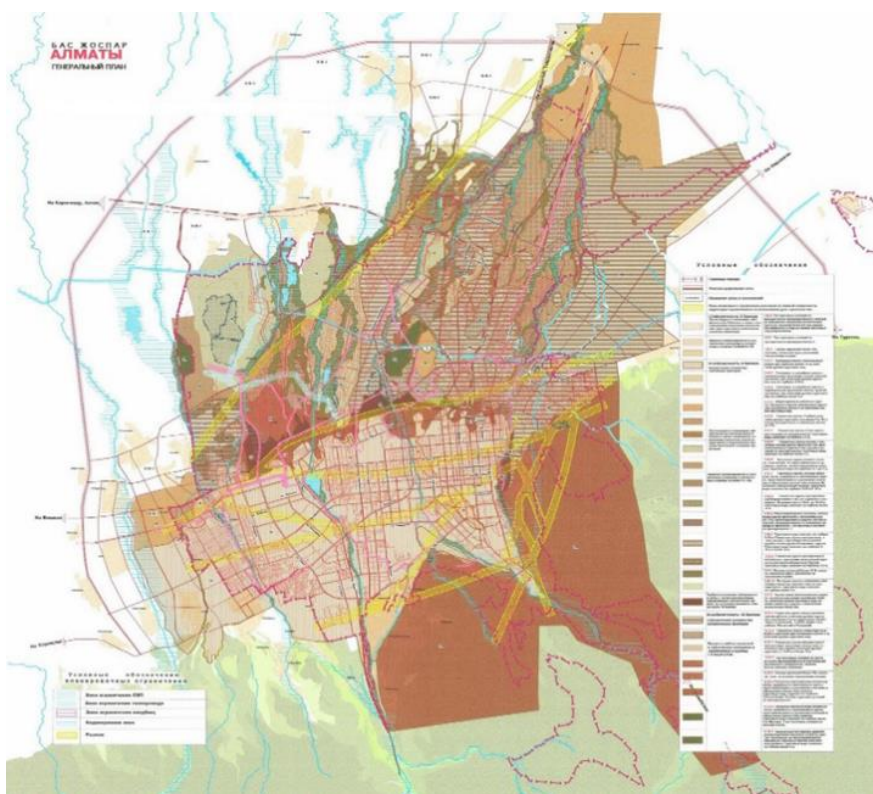
Алматы қаласының Наурызбай ауданы (**7-кесте**) осалдықтың салыстырмалы түрде қауіпсіз деңгейіне ие, бірақ ықтимал зақымдану дәрежесі жоғары, оны оның етегінде қала облысы орналасқан таулы аймақтарға жақындығымен сипаттауға болады. Қорытындылай келе, құрылыстардың сейсмикалық белсенділікке төзімділігі солтүстіктен оңтүстікке қарай жылжыған сайын төмендейді деп айта аламыз.

7-кесте

Алматы қаласы Наурызбай ауданы бойынша ғимараттардың тұрақтылығын есептеу нәтижелері

Осалдық класы						Наурызбай ауданы	Ықтимал зақымдану дәрежесі - d				
A	B	C	D	E	Ф		1	2	3	4	5
	●									●	
Құрылыс түрі						Минималды ASD деңгейі бар темірбетон қаңқасы					

Қаланың төменгі аудандарында белсенділік пен құлау қаупі жоғары аудандарға қарағанда әлдеқайда жоғары. Мұны қаланың **2 суретте** сейсмикалық аудандастыру картасымен түсіндіруге болады, оған сәйкес қарқындылығы 9, 8, 7, 6, 5 және одан төмен жер сілкінісі аймақтары анықталған.



2-сурет – Алматы қаласының сейсмикалық аудандастыру картасы (Сейсмология институты құрастырған).

Жетісу Алатауы, Іле ойысы, Күнгеі Алатауы, Іле Алатауының кейбір аудандары және Алматы қаласы 9 балдық аймаққа жатқызылған. Кешенді сейсмикалық микроаймақтандыру схемасы бойынша қаланың өзінде сейсмикалық 9 және 10 баллдық екі аймақ анықталды. 9 балдық ауданға Райымбек батыр даңғылының оңтүстігіндегі Кіші және Үлкен Алматы өзендерінің (Малайя және Үлкен Алматы) аллювий конустарының аумағы кіреді. Шығысында және оңтүстігінде бұл аумақ аласа қайраңдармен (төменгі тау етегі сатысы) шектелген, батысында бұл аумақ Қарғалы және Ақсай өзендерінің аллювий конустарымен біріктіріледі. 10 балдық сейсмикалық – аудан қаланың бүкіл аумағын Райымбек даңғылының солтүстігінде қаланың орталық бөлігінде – өзеннің шығысында Кіші Алматы (Малая Алматинка) алып жатыр.

4 НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Жиі жер сілкінісі жағдайында ғимараттардың тұрақтылығының есептеу деректерін, сондай-ақ осы саладағы құрылысқа инновациялық көзқарасты зерделей отырып, келесі ұсыныстар жасалды:

1. Алматы қаласындағы ғимараттар мен құрылыстарды салу шарттарына нақтырақ тоқталу үшін құрылыс саласындағы сараптамалық ұйымдардың функционалдығын кеңейту қажет (**Building regulations II, 2000**).

2. Аймақтың сейсмикалық белсенділігін зерттеуге құқығы бар ұйымдардың қаржылық базасы мен санын көбейту керек (**Wilson & Clough, 1999**).

3. Сонымен қатар, жер сілкінісіне төзімді құрылыстарды салумен ұзақ уақыт айналысатын шетелдік ұйымдармен іс-қимылдар мен тәжірибе алмасуды жақсарту қажет (**ASCE, 2000**).

4. Құрылыс сапасын жақсарту үшін сараптамалық ұйымдар мен қауіпсіздік техникасы бойынша инженерлердің тексерулерінің сапасы мен жиілігін арттыру.

5. Қала картасындағы географиялық орнына байланысты әртүрлі құрылыс құрылымдарын қолдану (**St. Petersburg, 2008**).

Құрылыс материалдарын дұрыс таңдау – ғимараттарды жер сілкінісіне төзімді етудің негізгі факторларының бірі. Заманауи технологиялар мен инновациялық материалдарды пайдалану ғимараттардың беріктігін айтарлықтай арттырады. Мысалы, стеклопластик, темірбетонды және басқа да берік материалдарды пайдалану ғимараттарды жер сілкінісіне төзімді етеді. Осыған қоса маңызды аспект ретінде ғимарат іргетасының жобалануы болып табылады. Іргетас жер сілкінісі кезінде пайда болатын күштерге төтеп бере алатындай берік және тұрақты болуы керек. Жаңа технологиялар мен әдістерді қолдану жер сілкінісі күштерін тиімді сіңіре алатын іргетастарды жасауға мүмкіндік береді. Тағы бір маңызды аспект – жер сілкінісі қауіпін басқару жүйесі. Алматы қаласында ықтимал жер сілкіністерін бақылау және ескертудің тиімді жүйесі болуы керек. Мұндай жүйе тұрғындарды ескертуге және жер сілкінісі болмай тұрып қауіпсіз жерлерге көшіруге мүмкіндік береді, бұл көптеген адамдардың өмірін сақтап қалады. Сондай-ақ халық арасында ағарту, түсіндіру жұмыстарын жүргізу маңызды. Алматы қаласының тұрғындары жер сілкінісі кезінде өзін қалай ұстау керектігін, дұрыс эвакуациялауды және қауіпсіз жерлерде болуды білуі керек. Бұл дүрбеленді азайтуға және эвакуацияның тиімділігін арттыруға көмектеседі.

Сондай-ақ құрылыс процестеріне қойылатын талаптарды жақсарту:

Барлық құрылыс материалдары, конструкциялары және жобалау схемалары ең аз сейсмикалық жүктемелерді қамтамасыз етуі керек.

Жобалау кезінде симметриялық құрылымдық схемаларды қабылдау және құрылымдық қаттылық пен массалардың біркелкі таралуына қол жеткізу ұсынылады (**ТС., 2005**).

Жүк көтергіш құрылымдардың элементтерінің бірдей беріктігі талабын сақтау керек, сонымен қатар оның жүк көтергіштігі таусылғанға дейін құрылымның бұзылуына әкелуі мүмкін әлсіз түйіндер мен элементтерден аулақ болу керек (**Bozorgnia & Bertero, 2004**).

Құрастырылған ғимараттарда арматураланған құрама элементтерді пайдалану арқылы құрылымдардың біртектілігі мен беріктігін қамтамасыз ету үшін максималды күштер аймағынан тыс түйіспелерді орналастыру ұсынылады (Reiterman, 2010).

Ғимараттардың сейсмикалық төзімділігіне ғарыштық жоспарлау схемаларын, олардың пішіні мен өлшемдерін таңдау үлкен әсер етеді. Күшті жер сілкіністерінің салдарын талдау құрылымдар үшін ең жақсы жоспар нысандары шеңбер, тіктөртбұрыш, шаршы және ұқсас пішіндер екенін көрсетеді. Мұндай ғимараттарда бұралу тербелісі іс жүзінде жойылады. Егер құрылыс жоспарында күрделі пішіндерді жасау қажет болса, онда жер сілкінісі кезінде олардың әрқайсысының дербес жұмысын қамтамасыз ету үшін оны бүкіл биіктігі бойынша қарапайым пішінді жеке жабық бөліктерге кесу керек. Бұған температуралық немесе шөгінділермен біріктіруге болатын антисейсмикалық тігістерді орнату арқылы қол жеткізіледі (Vamvatsikos & Cornell, 2002).

Көпқабатты ғимараттарда едендер мен жабындардың беріктігін қамтамасыз ету қажет – алдын ала дайындалғандарда – плиталар арасындағы түйіспелерді тығыздау арқылы. Қабырғалық панельдер арасындағы түйіспелер сонымен қатар бүйірлік жиектердің кілттелген бетін орнату арқылы жасалады (Wysession & Stein, 2002).

Құрылымның массасы сейсмикалық жүктемелердің шамасына үлкен әсер етеді. Сондықтан құрылымдардың салмағын, сәйкесінше сейсмикалық күштерді барынша азайтуға ұмтылу қажет. Бұған жеңіл конструкцияларды қолдану, ауыр техниканы жылжыту және төменгі қабаттарда материалдарды сақтау арқылы қол жеткізіледі.

5 ҚОРЫТЫНДЫЛАР

Инженерлік-геологиялық қазбаларды, ұнғымалар мен шұңқырларды бұрғылау, терең белгілерді орнату және басқа да шаралар сияқты дәстүрлі әдістерді қолданып геотехникалық мониторинг жүргізу тығыз қалалық жерлерде қиындай түсті.

Құрылыс жұмыстарын қауіпсіз жүргізу және құрылыс процесінде учаскенің инженерлік-геологиялық жағдайындағы ықтимал өзгерістер және жаңа құрылыстың әсер ету аймағына жататын ғимараттардың құрылыстарының жай-күйі туралы ақпарат алу үшін ғимараттың жұмысын бұзбай немесе құрылыс жұмыстарын жүргізбестен жұмыс істей алатын және сенімді ақпарат бере алатын осындай зерттеу әдістерін пайдалану өте орынды.

Қазіргі уақытта көпқабатты нысандарды бақылауға арналған жабдықтар мен әдістердің кең ауқымы бар. Сондықтан жабдықтың нақты түрлерін мен сипаттамаларын таңдау ғимараттың сәулеттік-құрылымдық жобасына, физикалық және компьютерлік модельдеу нәтижелеріне, сондай-ақ геотехникалық іздестіру материалдарын талдауға және құрылыстың геологиялық-геофизикалық жағдайына негізделуі керек.

Алматы қаласының әртүрлі аудандарындағы құрылыстардың тұрақтылық деңгейлерін есептеу нәтижелеріне сүйенсек, аудандардың ішінде ең осал Түрксіб ауданы және ғимараттардың зақымдану дәрежесі жоғары екені анық. Себебі бұл аумақта ескі ғимараттар мен құрылыстар басым. Ең аз осалдық пен залал Бостандық ауданында байқалады. Арнайы сейсмикалық қорғаныс шараларынсыз жасалған темірбетон қаңқасынан жасалған ғимараттар 7 баллдық интенсивті жер сілкіністері кезінде қатты зақымданады, ал қарқындылығы 8 балл болса, көптеген құрылымдар қирады, жеке құрылымдардың опырылуы жиі байқалады. 9 баллдық жер сілкінісі кезінде қираулар мен қираулар кең таралған. Сейсмикалық 7, 8 және 9 баллдық жер сілкінісі қаупі бар аймақтарда сейсмикалық оқшаулау жүйелерін пайдалану арқылы сейсмикалық жүктемені 1,5-4 есе азайтады сонда алаңның жағдайы және құрылыс құрылымдары, бұл қолданыстағы ғимараттардың сейсмикалық төзімділігін 1-2 баллға арттыруға мүмкіндік береді.

Қорытындылай келе, Алматы қаласындағы көпқабатты үйлердің деформациялану процесін зерттеу қазіргі құрылыс процесінің құрамдас бөлігі болып табылады деп сеніммен айта аламыз. Бұл терең білім мен белгілі бір дағдыларды талап ететін міндет, бірақ онсыз ғимараттардың қауіпсіздігі мен ұзақ мерзімділігіне кепілдік беру мүмкін емес.

ӘДЕБИЕТТЕР

1. **Kozylbaev M.K.** (2003) Almaty. Encyclopedia [Almaty. Encyclopedia]. Pp. 265-266. (In Kaz.).
2. **Vilchik N.P.** (2008) Arhitektura zdaniy. Uchebnik. [Architecture of buildings. Textbook]. Pp. 230-24 (In Russ.).
3. **Izenberg Y.M.** (2007) Seysmo izolyatsiya vysokikh zdaniy//Seysmo stoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. [Seismic insulation of high buildings//Seismic construction. Security of buildings]. Pp.41-434 (In Russ.).
4. **Building regulations II-7-81** (2000) Stroitel'stvo v seismicheskikh rayonakh [Construction in seismic regions]. Moscow: Gosstroy Rossii. Pp. 318 (In Russ.).
5. **Nikolayev I.I.** (2009) Rukovodstvo po proyektirovaniyu seysmostoykikh zdaniy i sooruzheniy [Guidelines for the Design of Earthquake-Resistant Buildings and Structures]. Moscow. Pp.71 (In Russ.).
6. **St. Petersburg** (2008). Osnovy teorii seysmostoykosti i seysmostoykogo stroitel'stva zdaniy i sooruzheniy [Fundamentals of the theory of seismic resistance and earthquake-resistant construction of buildings and structures]. Pp.176 (In Russ.).
7. **Korchinskii I.L.** (2012) Osnovy proyektirovaniya zdaniy v seismicheskikh rayonakh [Basics of designing buildings in seismic regions]. Moscow. (In Russ.).
8. **ASCE.** (2000). Pre-standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA-356) (Report No. FEMA 356). Reston, VA: American Society of Civil Engineers prepared for the Federal Emergency Management Agency.
9. **TC.** (2005). Earthquake Damage Evaluation Data for California (ATC-13) (Report). Redwood, CA: AppliedTechnology-Council.
10. **Bozorgnia, Y, Bertero, V,** «Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering», CRC Press, 2004.
11. **Wilson, E. and Clough, R.,** presented at the US Fifth National Conference on Computational Mechanics, August. 4-6, 1999, "Early Finite Element Studies at Berkeley".
12. **Illustrated Essays by Robert Reiterman,** CUREE, 2010, 12 p.
13. **Vamvatsikos D., Cornell C.A.** (2002). Incremental dynamic analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31(3): 491–514.
14. **Michael Wysession, Seth Stein** (2002), Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure 1st ed.
15. **Valkov B.A.** (2015) Geodezicheskiye nablyudeniya za protsessom deformirovaniya vysotnykh sooruzheniy s ispolzovaniyem tekhnologii nazemnogo lazernogo skanirovaniya. [Geodetic observations of the process of deformation of high-rise structures using ground laser scanning technology]. (In Russ.).
16. **Hiller, Bernd.** (Diss. work, 2017 p.144) Razrabotka i issledovaniye avtomatizirovannoy sistemy geodezicheskogo monitoringa deformatsiy inzhenernykh sooruzheniy na osnove vysokotochnoy tsifrovoy inklinometrii i takheometrii. [Development and research of an automated system for geodetic deformation monitoring of engineering structures based on high-precision digital inclinometry and tacheometry]. (In Russ.).
17. **Suleymenova D.N., Igenderlina M.B., Satbergenova A.K., Pentayev T.P.** (Mining magazine of Kazakhstan. 2020 №5. pp.16-21.) Sovremennyye geodezicheskiye sredstva i metody nablyudeniya za izmeneniyem prostranstvennykh parametrov zdaniy. [Modern geodetic tools and methods for observing changes in the spatial parameters of buildings]. (In Russ.).
18. **Borantayeva A.E., Birimzhanov A.T., Zhangulova G.K.** (2016) Gimarrattar men kurylystardy inzhenerlik kauipsizdikti kamtamasyz etudin geodeziyalyk rezervin tekhnologiyalyk zhetildiru [Technological advancement of geodetic backup of the buildings and constructions engineering security]. (In Kaz.).

UDC 624.072.2/4
IRSTI 67.11.35
RESEARCH ARTICLE

ANALYSIS OF I-BEAM WITH CORRUGATED WEB AND TECHNOLOGICAL PERFORATIONS UNDER STATIC LOAD

A.A. Bryantsev¹ , I.I. Ostapenko^{2,*} 

¹Scientific research institute «RAS Group Expert», 050062, Almaty, Kazakhstan

²International Educational Corporation, 050028, Almaty, Kazakhstan

Abstract. *The article is aimed at studying the operation of welded I-beams with corrugated web and technological perforations under static loading. The relevance of the study is due to the lack of specific instructions on the pitch, diameter and methods of strengthening technological perforations in the Republic of Kazakhstan and other countries. In this study the method of computer modeling with the help of the program complex LIRA-SAPR-2022 was used. The study was carried out for the beam, taking into account different sizes of perforations in the beam web, distances between the perforations, with and without perforation. The beam deformability and the beam stability with and without perforations under static concentrated load was analyzed. Twenty-nine beam models were analyzed, three circular perforations with diameters of $0,25h_w$, $0,5h_w$, $0,75h_w$ were formed in the webs of the beam models, where h_w is the height of the corrugated web. The center of the perforations was located in the middle of the web height. The distance between the centers of the perforations were taken $2d$, $3d$ and $4d$, where d is the diameter of the perforation. Analysis of the performance of beam models with perforations under load showed that the bearing capacity of the beam decreases with increasing perforation pitch and perforation diameter. The most optimum perforation diameter for design may be perforation diameter $0,25h_w$ and $0,5h_w$ with perforation pitch $2d$.*

Keywords: *Beam with corrugated web, circular perforation, beam deformability, bearing capacity, beam stability, concentrated load.*

***Corresponding author**

Ostapenko Inna Ivanovna, e-mail: ostapinna@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-05>

Received 05 February 2024; Revised 21 May 2024; Accepted 30 May 2024

СТАТИКАЛЫҚ ЖҮКТЕМЕ КЕЗІНДЕ ГОФРЛЕНГЕН ҚАБЫРҒАЛАРЫ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ САҢЫЛАУЛАРЫ БАР ҚОС ТАВРЛЫ АРҚАЛЫҚТЫҢ ЖҰМЫСЫН ТАЛДАУ

А.А. Брянцев¹ , И.И. Остапенко^{2*} 

¹ Ғылыми-зерттеу институты «RAS Group Expert», 050062, Алматы, Қазақстан

² Халықаралық білім беру корпорациясы, 050028, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа. Бұл зерттеу статикалық жүктеме кезінде гофрленген қабырғалары мен технологиялық саңылаулары бар дәнекерленген екі таврлы арқалықтардың жұмысын зерттеуге бағытталған. Зерттеудің өзектілігі Қазақстан Республикасының аумағында және басқа елдерде технологиялық саңылаулардың қадамы, диаметрі және нығайту әдістері туралы нақты нұсқаулардың болмауына байланысты. Зерттеуде LIRA-SAPR-2022 бағдарламалық пакетін пайдаланып, компьютерлік модельдеу әдісі қолданылды. Зерттеу арқалық қабырғасындағы саңылаулардың әртүрлі өлшемдерін, саңылаулар арасындағы қашықтықты ескере отырып, саңылауды күшейту және күшейтусіз жүргізілді. Статикалық шоғырланған жүктеме әсерінен саңылаулары бар және саңылаулары жоқ арқалықтың көтергіштігі мен тұрақтылығы зерттелді. Компьютерлік модельдеу соңғы элементтер әдісін қолдану арқылы LIRA-SAPR бағдарламалық кешенінің көмегімен жүргізілді. Осы бағдарламалық кешеннің көмегімен арқалықтардың 29 моделі зерттелді. Арқалық модельдердің қабырғасында диаметрі $0,25h_w$, $0,5h_w$, $0,75h_w$ болатын үш дөңгелек саңылау пайда болды, мұнда h_w - гофрленген қабырғаның биіктігі. Тесіктердің ортасы қабырға биіктігінің ортасында орналасқан. Саңылау орталықтары арасындағы қашықтық $2d$, $3d$ және $4d$ қабылданады, мұндағы d - саңылаудың диаметрі. Шоғырланған жүктеме астындағы саңылаулары бар арқалық модельдерінің жұмысын талдау саңылау қадамы мен саңылау диаметрінің ұлғаюымен арқалықтың көтергіштігі төмендейтінін көрсетті, жобалау кезінде ең оңтайлы саңылау диаметрі $0,25h_w$ және $0,5h_w$ саңылау қадамы $2d$ қабылданады.

Түйін сөздер: гофрленген қабырғасы бар арқалық, дөңгелек саңылау, арқалықтың деформативтілік, жүк көтергіштігі, арқалықтың тұрақтылығы, шоғырланған жүктеме

* Автор-корреспондент

Остапенко Инна Ивановна, e-mail: ostapinna@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-05>

Алынды 05 ақпан 2024; Қайта қаралды 21 мамыр 2024; Қабылданды 30 мамыр 2024

УДК 624.072.2/4

МРНТИ 67.11.35

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СТАТЬЯ

АНАЛИЗ РАБОТЫ ДВУТАВРОВОЙ БАЛКИ С ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОТВЕРСТИЯМИ ПРИ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

А.А. Брянцев¹ , И.И. Остапенко^{2*} 

¹ Научно-исследовательский институт «RAS Group Expert»

² Международная образовательная корпорация, Алматы, 050028, Казахстан

Аннотация. Статья направлена на изучение работы сварных двутавровых балок с гофрированными стенками и технологическими отверстиями при статической нагрузке. Актуальность исследования обусловлена отсутствием на территории Республики Казахстан и на территории других стран конкретных указаний о шаге, диаметре и методах усиления технологических отверстий. В исследовании использован метод компьютерного моделирования при помощи программного комплекса ЛИРА-САПР-2022. Исследование проводилось для балки, с учетом различных размеров отверстий в стенке балки, расстояний между отверстиями, с усилением и без усиления отверстия. Исследовалась несущая способность и устойчивость балки с отверстием и без отверстий под действием статической сосредоточенной нагрузки. Было исследовано 29 моделей балок, в стенках моделей балок образовывались три круглых отверстия диаметром $0,25h_w$, $0,5h_w$, $0,75h_w$, где h_w – это высота гофрированной стенки. Центр отверстий располагался посередине высоты стенки. Расстояние между центрами отверстий приняты $2d$, $3d$ и $4d$, где d – это диаметр отверстия. Анализ работы моделей балок с отверстиями под нагрузкой показал, что с увеличением шага отверстий и диаметра отверстий несущая способность балки понижается. Наиболее оптимальным диаметром отверстия при проектировании может быть отверстие диаметром $0,25h_w$ и $0,5h_w$ с шагом отверстий $2d$.

Ключевые слова: балка с гофрированной стенкой, круглое отверстие, деформативность балки, несущая способность, устойчивость балки, сосредоточенная нагрузка.

*Автор–корреспондент

Остапенко Инна Ивановна, e-mail: ostapinna@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-05>

Поступило 05 февраля 2024 г.; Пересмотрено 21 мая 2024 г.; Принято 30 мая 2024 г.

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС/ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 INTRODUCTION

In accordance with Kazakhstani normative documents, it is recommended to use transverse corrugated web in beams to increase their stability and reduce the mass of the structure. When making calculations, it is necessary to check local and overall stability of rectangular compartments of the corrugated web of the beam. In addition, tangential stresses and deflection of the beam are important parameters in the calculation of beams with corrugated web. When analyzing in detail the European and Russian standards for design and calculation of beams with corrugated wall, it is possible to find similarities and differences in the designations of coefficients and other values.

Factors affecting the bearing capacity of a beam with corrugated web weakened by perforations:

1. Location of the perforation in the beam in relation to its most dangerous zones of stress concentration (for example, in sections near the supported ones);
2. The perforations pitch in the web of the beam along its length;
3. Shape of the perforation (for example, a square, rectangular or the most common circular perforation);
4. Flexibility of the web;
5. The perforation center in relation to the web height.

The need for perforations application in the corrugated webs is due to the fact that laying of the piping system for various purposes: water supply, heating, ventilation, air conditioning, etc. is necessary in accordance with Operational Requirements.

The basic forms of stability loss of beams corrugated webs:

- local loss of stability of the web under a concentrated load reflecting the nature of its operation under the girder, in the case of beams with corrugated webs instead of trusses;
- local loss of stability of a separate panel of corrugations between their peaks. This loss of local stability of the corrugated web in appearance and in essence of its operation is similar to the loss of local stability of a flat web between vertical stiffeners;
- general loss of stability of the corrugated web in the zones of action of the maximum shearing stresses. This loss of general stability of the corrugated web in appearance and in essence of its operation is similar to the loss of general stability of a flat web supported by vertical stiffeners with insufficient bending stiffness.

Basically, beams with a cross-corrugated web and triangular-shaped corrugations are used for construction in Kazakhstan (**Figures 1**);



Figure 1 – Beams with cross-corrugated web and triangular-shaped corrugations: L_r – is the length of the corrugation half-wave; f_r – is the height of the corrugation half-wave (the authors' material).

– beams with a cross-corrugated web and corrugations of a trapezoidal shape are used in Sweden and the USA (**Figures 2 and Figures 3**);

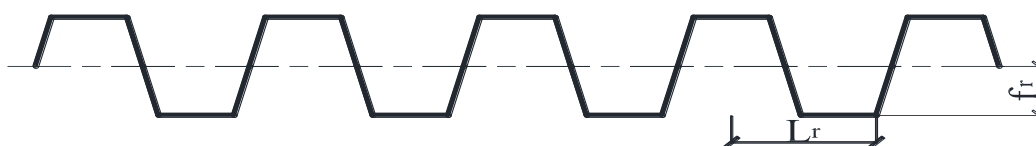


Figure 2 – Beams with corrugations of a trapezoidal shape: L_r – is the length of the corrugation half-wave; f_r – is the height of the corrugation half-wave (the authors' material).

– beams with a cross-corrugated web and corrugations of a rectangular shape are used in Finland, Japan and the Netherlands;

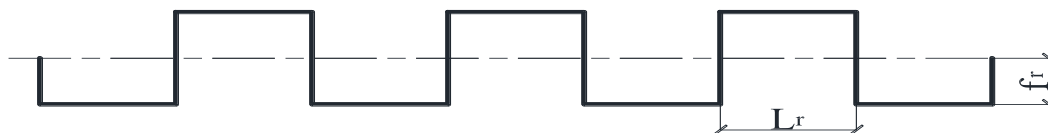


Figure 3 – Beams with corrugations of a rectangular shape: L_r – is the length of the corrugation half-wave; f_r – is the height of the corrugation half-wave (the authors' material).

– beams with a cross-corrugated web and wavy-shaped corrugations are used in Austria, Ukraine, Poland and Russia (**Figures 4**).



Figure 4 — Beams with cross-corrugated web and wavy-shaped corrugations: L_r – is the length of the corrugation half-wave; f_r – is the height of the corrugation half-wave (the authors' material).

Corrugation is the process of folds (corrugations) formation by folding a sheet in sheet materials, in a certain distance necessary for enhancement of the material characteristics: strength and stability.

2 LITERATURE REVIEW

The corrugated I-beam has the shape of the letter “H” and consists of two belts of arbitrary metal profile and a corrugated web. The web can be made with different corrugations profiles: triangular, wave-shaped, trapezoidal, rectangular and others. The girders of such a beam are usually made of rolled metal, bent steel sections, welded pipes or reinforced concrete elements (**Bryantsev 2017**).

Corrugated structures have become widely used in the shipbuilding industry at the end of the 19th and early 20th centuries, in the 1930s in the aircraft industry.

According to the research of **Poltoradnev (2013)**, the performance of a beam with a peppered-corrugated wall can be divided into four stages:

- 1) Stage of subcritical operation;
- 2) Stage of supercritical operation,
- 3) Stage of elastoplastic behavior of the section in the load zone;
- 4) Bearing-capacity failure stage.

Field of use of corrugated structures is extensive: they are used as load-bearing structures for floor beams and coverings in residential, public, administrative and industrial buildings.

In 1928, **Tuzi (1928)** made a comparative analysis of the stress distribution between the experimental data on the effect of a circular perforation centered on the neutral axis of a flat beam web affected by bending moment and the results of stress distribution theory.

Cocker et al. (1936) in his work conduct a research on the distribution of stresses in a tension plate with one or more perforation. He investigated the effect of unbalanced forces applied to the contour of perforation in a flat plate.

The issues of the openings effect on the work of the beam web which are performed according to the Vierendeel principle or the four-angular bend (**Kudryavtsev 2011**), are studied in various works by **Chung (2001, 2003)**, **Darwin (1990)**, **Hagen (2009)**, **Shanmugan et al. (2002)**, **Ibrahim (1999)**, **Ahmed, M.S. (2022)**.

Also, the problems of placing and stiffening of openings in the corrugated webs of trapezoidal and wavy shape of corrugations were solved in different countries by many scientists. For ex-

ample, Romeijn) et al. (2009), Kiyamaz, et al. (2010), Chittaranjan et al (2019), Amr et al (2021), Ahmed, et al (2022).

The scientific paper (Bryantsev, 2019) presents tests that was performed on large-scale models (scale 1:3) of welded I-beams of constant section (flange is 200×10mm, web is 840×1.9mm) with span of 8,400 mm. The first beam without perforations B-1. Three circular perforations with a diameter of 380 mm, which edges were reinforced with stiffness elements made of strip steel with a cross section of 85×3mm, are formed in the web of the second beam B-2. The maximum allowable deflection of the beam is assumed to be $\frac{1}{220L}$ or 38.2 mm.

The paper (Bryantsev, 2020) presents experimental studies of welded I-beams with corrugated web. The main purpose of the study was to conduct laboratory tests of welded I-beams with corrugated webs weakened by two technological circular perforations with different ways of their stiffening in, as well as to determine the most effective way of stiffening the circular perforations. It is necessary to perform a comparative analysis of experimental and computer data of beam deflections, to study the peculiarity of limit states and the behavior of models under load, to determine the maximum bearing capacity and ultimate deflection of the models under consideration. Within the framework of the conducted research, five variants of corrugated beams were considered, having the same length, height and web thickness, perforation diameters, as well as height and wavelength of the corrugation, but differing in the absence and presence of perforations, as well as methods of their stiffening.

3 MATERIALS AND METHODS

While performing this scientific research the theoretical method of studying the posed scientific questions was used. To write the article, the results obtained were systematized and presented in an accessible and understandable form.

The theoretical methods of scientific research are presented in the article in the form:

- analysis, used to study in detail the use of beams with cross-corrugated web and triangular-shaped corrugations weakened by circular perforations;
- modeling, used in the form of numerical parametric study of 29 models of beams, including beams with triangular corrugation and thin-walled ribbed beams, performed in the LIRA-SAPR 2022 software package.

A numerical parametric study was performed on a welded corrugated beam with the corrugations of triangular shape; the model and testing of such beam is described in paragraph 2.1. Numerical simulation of the beams was performed using the LIRA-SAPR 2022, general-purpose program for the finite element analysis, which includes the requirements for constructions in accordance with Eurocode 3 Part 1.5-Plated Structural Elements. This program can be used to solve various tasks, from simple linear analysis and on out to complex nonlinear analysis requiring consideration of various manufacturing deviations and material errors. The parametric study was performed for the beam taking into account the various sizes of the perforations in the beam web, distances between the perforations, existence and absents of the perforation stiffening, as well as for the corrugated beam with no web perforations. The ability of the beam web with and without the perforation to withstand the load was considered and an assessment of the effect of web flexibility in accordance with Eurocode 3 Part 1.5-Plated Structural Elements was performed.

The tested beam has three perforations; the perforations' centers are located in the middle of the web height. The distance between the centers of the perforations is assumed to be $2d$, $3d$ and $4d$. One of the perforations has a constant location in the center of the beam at a distance of 4.2 m from the left and right support to the opening center. As for the geometric parameters of the perforation, a circular shape of the perforation was used. The perforations of three different sizes were used during the parametric study.

Also, for comparative analysis, a model of a thin-walled rib girder with similar dimensions was developed. The web is stiffened only by transverse ribs, the width of their projecting part b_h for

a pair of symmetric ribs is not less than $h_{ef}/30+40$ mm. But, since in practice, more often used ribs, completely filling the cross-section of the beam, it is assumed $b_h = b_{ef}$, and the thickness of the rib t_s not less than $2b_h \sqrt{\frac{R_y}{E}}$, we take 20mm. The distance between the main cross ribs shall not exceed $2h_{ef}$ when $\lambda_{\bar{\lambda}_w} > 3,2$ and $2,5 h_{ef}$ when $\lambda_{\bar{\lambda}_w} \leq 3,2$. Since $\lambda_{\bar{\lambda}_w} = 15,25$ we take the distance between the stiffening ribs $2h_{ef}$ i.e. 2×840 mm = 1680 mm.

The boundary conditions were applied to both ends of the beam model at the nodes of the end plate surface by limiting the required degrees of freedom. For the adopted models, the resistance to deformation values was assumed to be 245 MPa, the elastic modulus $E = 206,000$ MPa and the Poisson ratio is 0.3, the design buckling resistance $R_s = 142.1$ MPa. For a beam models with the length of 8,400 mm, the maximum allowable deflection is $1/220l$ or 38.2 mm. Loading (Q) of models is from 50 kN to 350 kN. Loading step is 50 kN.

Numerical parametric study of the beams with cross-corrugated web and triangular-shaped corrugations includes analysis of basically 29 finite element models. Of these 29 models, 2 beam model with no web perforations and 27 models with perforations of different sizes in the design, as indicated above; and they are located at different distances from each other. The thickness of corrugated web t_w is 1.9 mm.

When computer simulation the beam with a web height h_w of 840mm and a web thickness t_w of 1.9mm was used. The wavelength of web corrugations of triangular shape is l_r 350 mm and a wave height f_r is 54 mm (fig.1). The material of the web and flanges is C245 steel (Figures 5).



The corrugation thickness t_w is 1.9 mm
The corrugation wavelength L_r is 350 mm;
The corrugation height f_r is 54 mm.

Figure 5 — Values of length, height and thickness of the triangular-shaped corrugations adopted in computer modeling (authors' material).

Finite element models adopted for beams with the corrugations of triangular shape with and without perforations are given in Figures 6.

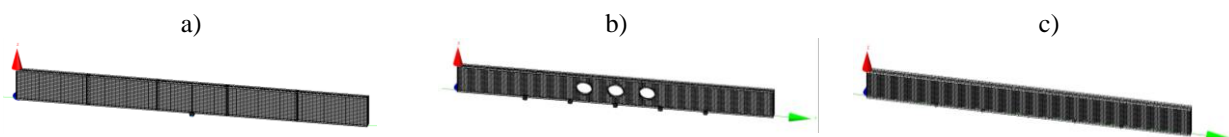


Figure 6 – Models adopted for the analysis of beams, where (a) flat web beam supported by stiffeners; (b) welded I-beam with cross-corrugated web and triangular-shaped corrugations weakened by perforations; (c) welded I-beam with cross-corrugated web and triangular-shaped corrugations without corrugations (authors' material).

Welded I-beam of constant section (flanges are 200×10 mm, webs are $840 \times 1,9$ mm) with span of 8,400 mm. Three circular perforations with the diameter of $0.25h_w$, $0.5h_w$, $0.75h_w$ are formed in the beam web. In the first case, perforations are made without edging with sheet steel. In the second case, the perforations are stiffened with strip steel in the area equal to the perforations area with a thickness $t = 3$ mm and a width of 50 mm for perforation of $0.25h_w$ in diameter, 110 mm in width for perforation of $0.5h_w$ in diameter, 180 mm in width for perforation with a diameter of $0.75h_w$. In the third case, the perforations are supported by stiffness elements of strip steel in the area of the same perforation area, with a thickness $t = 3$ mm and width, as in the second case, as

well as paired vertical stiffeners of bar steel with a section of 85×3 mm. Two end plates with a thickness $t = 20$ mm at the ends of each model.

The load is applied through a rigid rectangular pipe of length $l = 200$ mm, which is in direct contact with the surface of the shelf. The load is transmitted at five points from the bottom to the top. The load is applied in the beam center, as well as at a distance from the center in both directions of 1.2 m in accordance with the model loading diagrams (Figure 7).

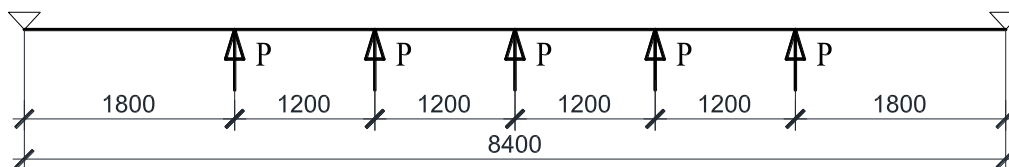


Figure 7 – Model loading diagram for parametric study (authors' material).

In general, **all** models show reduction in resistance of the elements to loss of stability with increase of the perforation size. Therefore, to decrease the deflections and increase the stability and strength of the beam weakened by the perforations it is necessary to stiffen the perforation. Analysis of operation of the beam models with perforations under a concentrated load showed reduction of the beam bearing capacity with an increase of the perforations pitch from $2d$ to $4d$ and the diameter of the openings from $0.25h_w$ to $0.75h_w$. The most optimal diameter of the perforation when designing can be the diameter of the opening of $0.25h_w$ and $0.5h_w$ with $2d$ or $3d$ openings pitch. Stiffening the perforation by edging with sheet steel, as well as the perforation stiffening with paired vertical stiffeners is necessary to increase the load-bearing capacity of the corrugated I-beam weakened by perforations. In the case of an acute need of the perforation with a diameter of $0.75h_w$ it is recommended to use steel with higher strength characteristics in order to increase the bearing capacity and reduce the laboriousness of its manufacture.

4 RESULTS AND DISCUSSIONS

Results of computer modeling of beam with cross-corrugated web and triangular-shaped corrugations and with perforations in the web

Figure 8 shows the load-deflection dependence of the middle of the M-1 and M-2 beam models in the elastic stage.

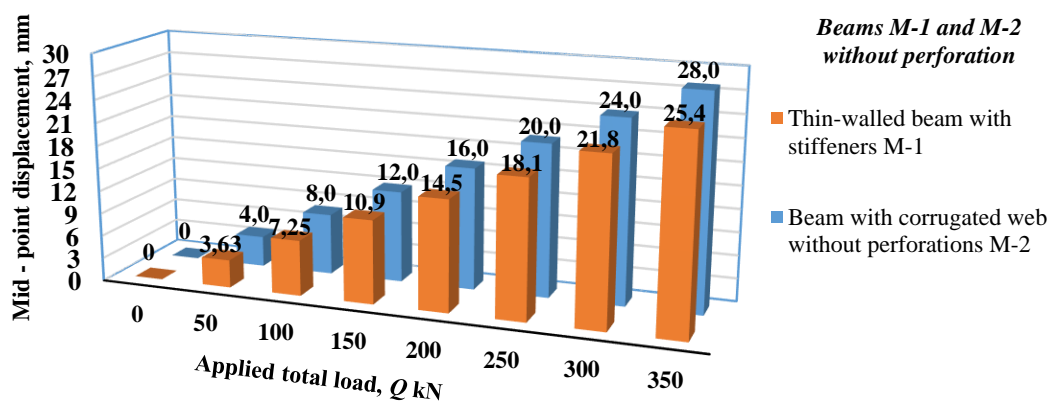


Figure 8 – The plot of displacement and applied total load value dependence for the M-1 and M-2 beam models (authors' material).

Analyzing the obtained data for the beam models we see that the maximum allowable deflection is not reached and for the beam model M-1 it is 25.4 mm, and for the beam model M-2 it is 28 mm. The deflection of the corrugated girder is 9.3% higher than that of the girder with a flat web.

The maximum experimental load is usually higher for the corrugated beam model than for the thin-walled beam model of the same thickness, with their flexibility equal to or greater than 90, which confirms the economic efficiency of their use in construction in general, and in earthquake-resistant construction in particular, due to the increased reliability of their performance under load. In our case, the applied maximum experimental load for the model of a beam with a corrugated wall and for the model of a thin-walled beam supported by stiffeners of the same thickness have approximately the same values, but the reliability of the model of a beam with a corrugated web and in this case is much higher than that of the model of a thin-walled beam, which is another factor in justifying their wide application in earthquake-resistant construction.

The **Figure 9** shows the load-deflection dependence of the middle of the M-2, M-3 and M-4 beam models with $2d$ perforation pitch in the elastic stage.

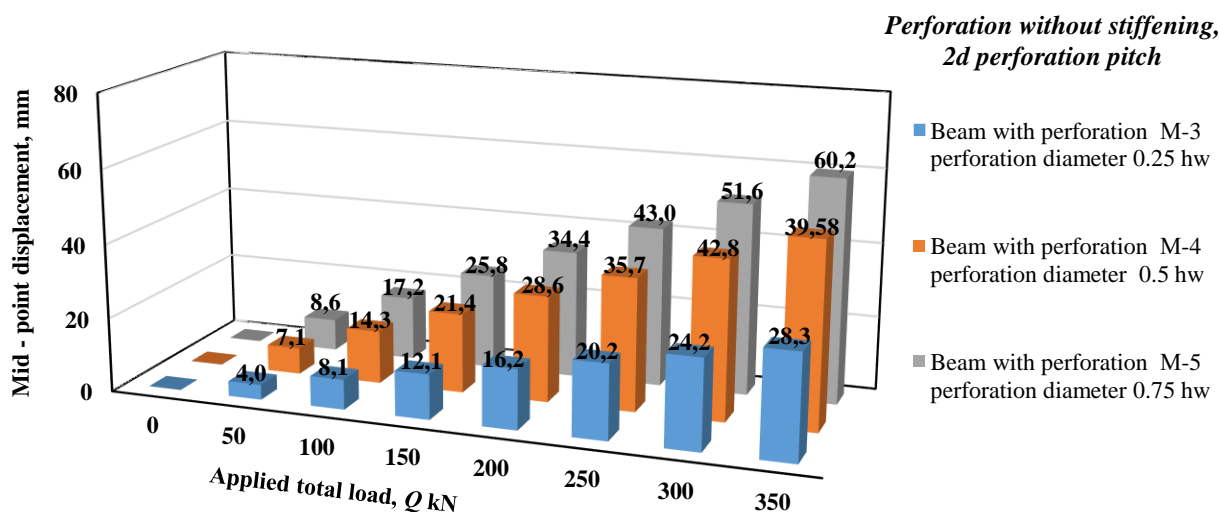


Figure 9 – The plot of displacement and applied total load value dependence for the M-3, M-4 and M-5 with $2d$ perforation pitch without perforation stiffening (authors' material).

In order to determine the most efficient variant of the corrugated beam model with perforations, it was decided to start analyzing the corrugated beam models with $2d$ perforation pitch without perforation stiffening. The obtained data allow us to conclude that the best result was shown by the model M-3 with the perforation diameter $0.25h_w$, the maximum displacements of which do not exceed the permissible ones. All the models show decreasing values of resistance of elements to loss of stability with increasing perforation size. Therefore, to reduce the deflections and increase the stability and strength of the beam weakened by perforations, perforation stiffening is necessary.

The **Figure 10** shows the load-deflection dependence of the middle of the M-6, M-7 and M-8 beam models with $2d$ perforation pitch in the elastic stage.

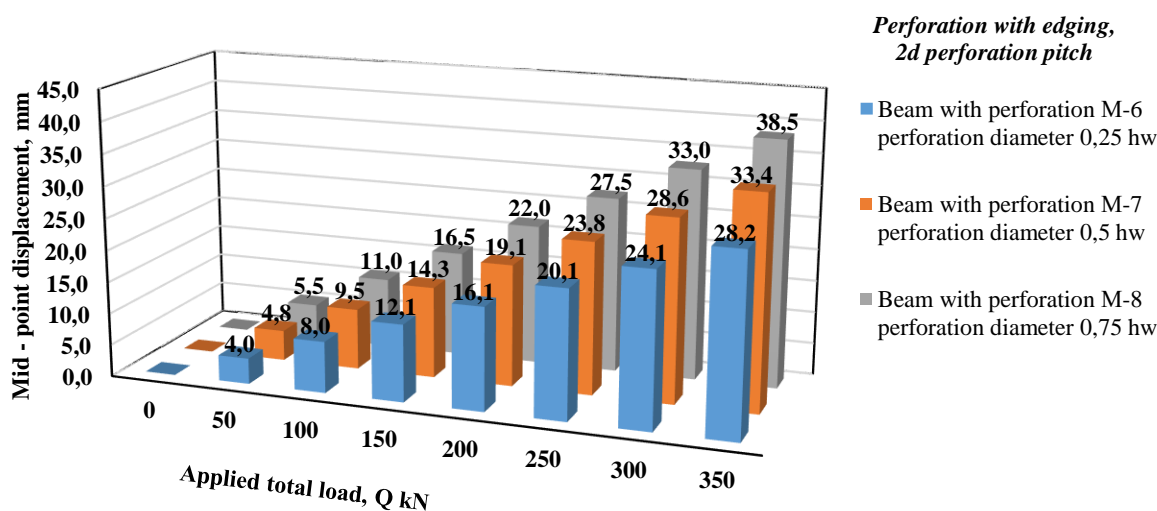


Figure 10 – The plot of displacement and applied total load value dependence for the M-6, M-7 and M-8 with 2d perforation pitch with perforation border (authors' material).

Analysis of the obtained data of M-6, M-7 and M-8 beam models with 2d perforation pitch and 3 mm thick strip steel perforation edging generally shows better results than without perforation stiffening.

The **Figure 11** shows the load-deflection dependence of the middle of the M-9, M-10 and M-11 beam models with 2d perforation pitch in the elastic stage.

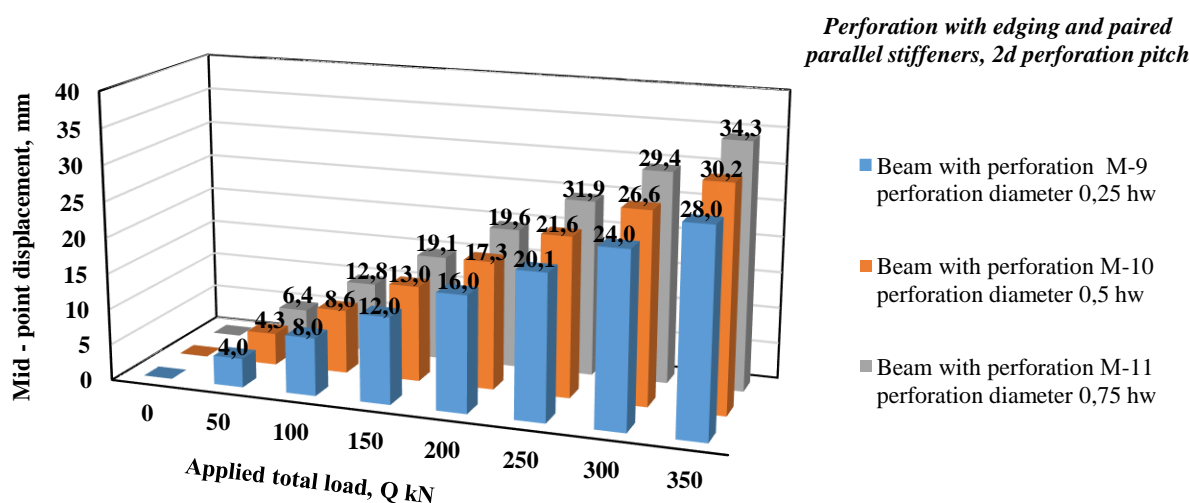


Figure 11 – The plot of displacement and applied total load value dependence for the M-9, M-10 and M-11 with 2d perforation pitch with perforation edging and paired parallel stiffeners (authors' material).

The final step in strengthening the beam models with 2d perforation pitch was the incorporation of paired parallel stiffeners in the work of the perforation web stiffened with edging. The stiffener thickness was assumed to be 10 mm. For beam model M-9 with perforation diameter $0.25h_w$, strengthening with paired ribs had almost no effect on its bearing capacity, but for beam models M-10 and M-11 with perforation diameters $0.5h_w$ and $0.75h_w$ showed better results.

The **Figure 12** shows the load-deflection dependence of the middle of the M-12, M-13 and M-14 beam models with 3d perforation pitch in the elastic stage.

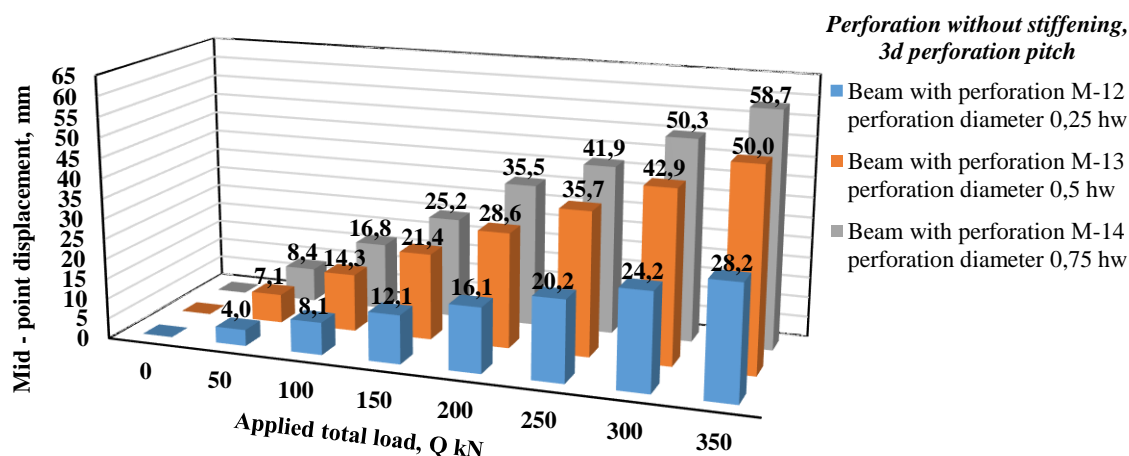


Figure 12 – The plot of displacement and applied total load value dependence for the M-12, M-13 M-14 with 3d perforation pitch without perforation stiffening (authors' material).

Analyzing the obtained data of beam models M-12, M-13 and M-14 it can be concluded that in general the deflections and deformations of beam models with 3d perforation pitch without perforation reinforcement are larger than those of similar beam models M-3, M-4, M-5 with the same perforation diameter but different 2d perforation pitch. The deformations and displacements of beam models M-12 and M-3 with 3d and 2d perforation pitch and perforation diameter $0.25h_w$, are identical.

The **Figure 13** shows the load-deflection dependence of the middle of the M-15, M-16 and M-17 beam models with 3d perforation pitch in the elastic stage.

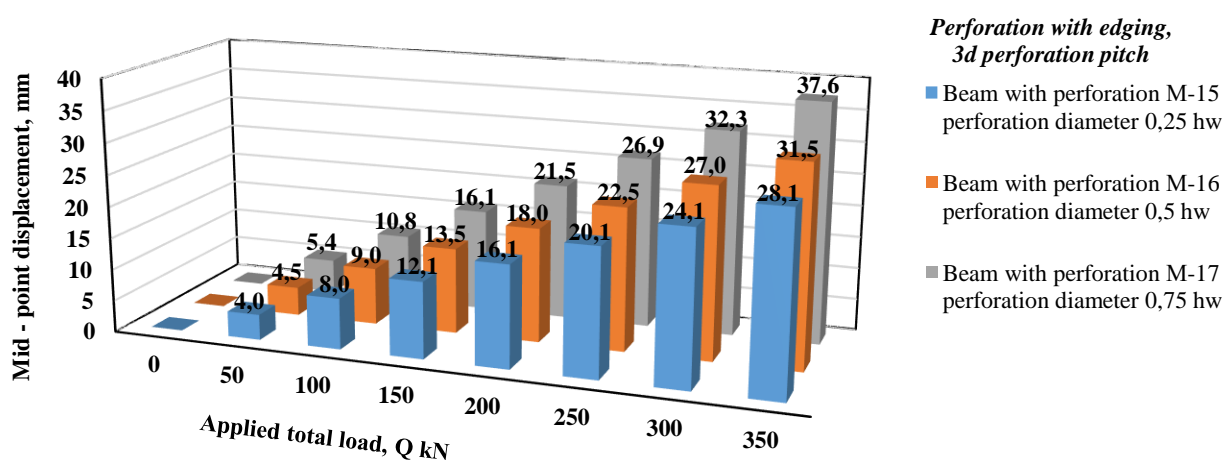


Figure 13 – The plot of displacement and applied total load value dependence for the M-15, M-16 and M-17 with 3d perforation pitch with perforation border (authors' material).

After the performance of beam models M-15, M-16 and M-17 with 3d c perforation pitch was included with perforation stiffening by edging, the following results were obtained: as in the previous cases, the behavior of model M-15 with perforation diameter $0.25h_w$ and 3d perforation pitch showed little change after the stiffening and also showed almost no change compared to the data obtained for model M-6 with the same diameter but perforation pitch equal to 2d. But for the other two models M-16 and M-17, the fringing reinforcement had a positive effect and reduced their deflection compared to the beam models M-13 and M-14.

The **Figure 14** shows the load-deflection dependence of the middle of the M-18, M-19 and M-20 beam models with 3d perforation pitch in the elastic stage.

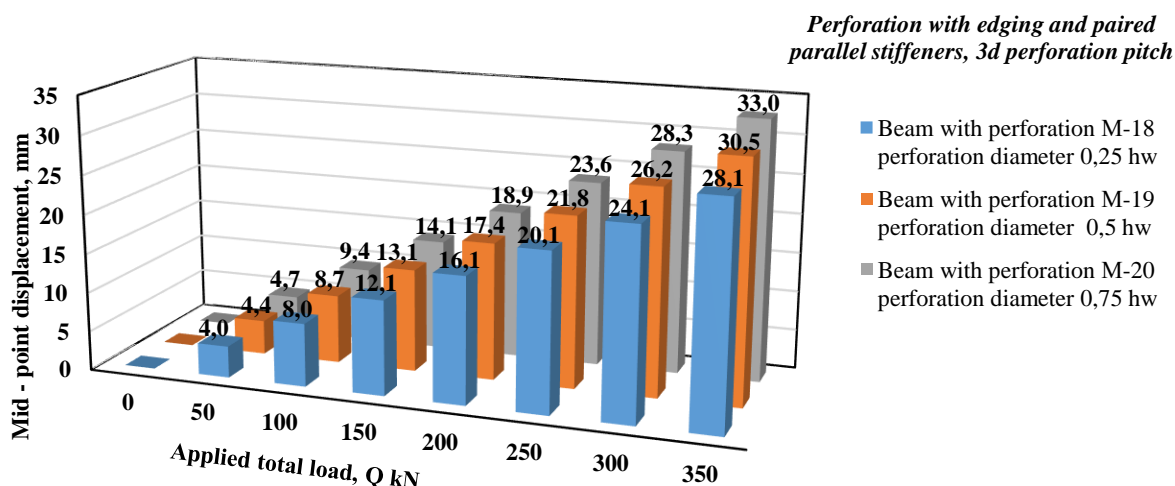


Figure 14 – The plot of displacement and applied total load value dependence for the M-18, M-19 and M-20 with 3d perforation pitch with perforation border and paired parallel stiffeners (authors' material).

The final step in strengthening the beam models with 3d perforation pitch was the incorporation of paired parallel stiffeners in the work of the perforation web stiffened with edging. The stiffener thickness was assumed to be 10 mm. For beam model M-18 with perforation diameter $0.25h_w$, stiffening with paired parallel ribs had almost no effect on its bearing capacity, but for beam models M-19 and M-20 with perforation diameters $0.5h_w$ and $0.75h_w$ showed better results.

The Figure 15 shows the load-deflection dependence of the middle of the M-21, M-22 and M-23 beam models with 4d perforation pitch in the elastic stage.

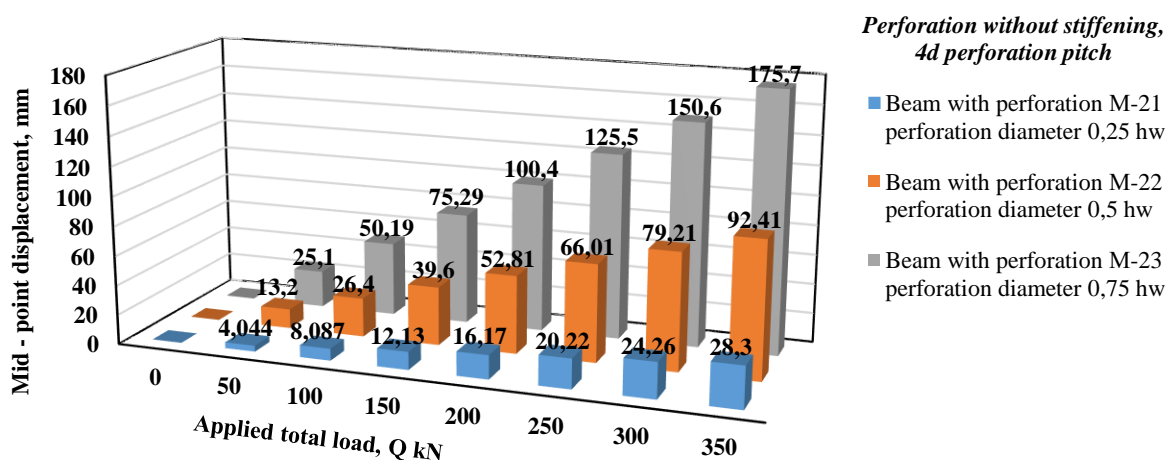


Figure 15 – The plot of displacement and applied total load value dependence for the M-21, M-22 and M-23 with 4d perforation pitch without perforation stiffening [authors' material].

Analyzing the obtained data of beam models M-21, M-22 and M-23 it can be concluded that in general the deflections and deformations of beam models with 4d perforation pitch without perforation stiffening are larger than those of similar beam models M-12, M-13, M-14 with the same perforation diameter but different perforation pitch equal to 3d and similar beam models M-3, M-4, M-5 with the same perforation diameter but different perforation pitch equal to 2d. The deformations and displacements of beam models M-21, M-12 and M-3 with perforation pitch of 4d, 3d and 2d and perforation diameter $0.25h_w$ are identical.

The Figure 16 shows the load-deflection dependence of the middle of the M-24, M-25 and M-26 beam models with 4d perforation pitch in the elastic stage.

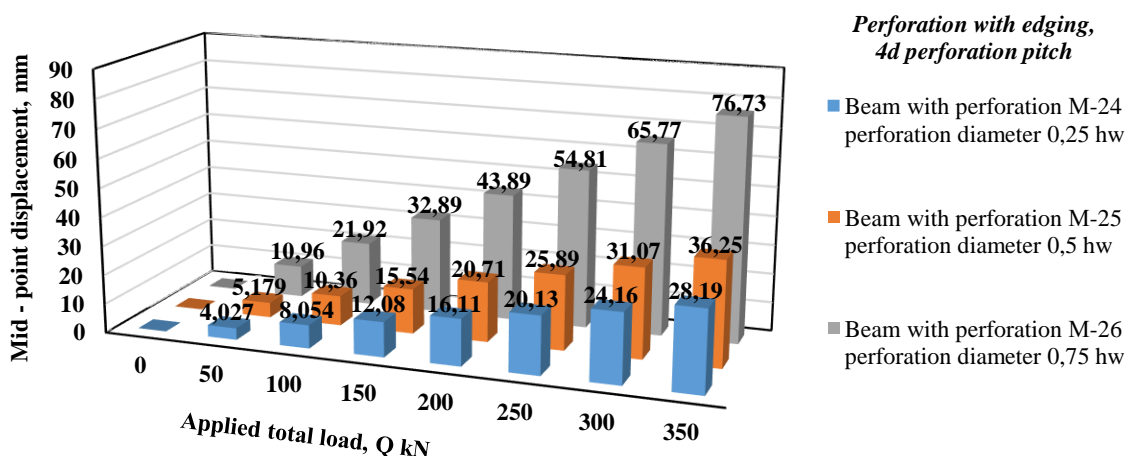


Figure 16 – The plot of displacement and applied total load value dependence for the M-24, M-25 and M-26 beam models with 4d perforation pitch with perforation edging [authors' material].

After the performance of beam models M-24, M-25 and M-26 with 4d perforation pitch with the inclusion of **perforation** stiffening by edging, the following results were obtained: as in the previous cases, the behavior of beam model M-24 with perforation diameter $0.25h_w$ and perforation pitch of 4d did not change much after stiffening and also showed almost no change compared to the data obtained for beam models M-6 and M-15 with the same diameter but perforation pitch of 2d and 3d, respectively. But for the other two models M-25 and M-26, the reinforcement by the edging had a positive effect and reduced their deflection compared to the beam models M-22 and M-23.

The **Figure 17** shows the load-deflection dependence of the middle of the M-27, M-28 and M-29 beam models with 4d perforation pitch in the elastic stage.

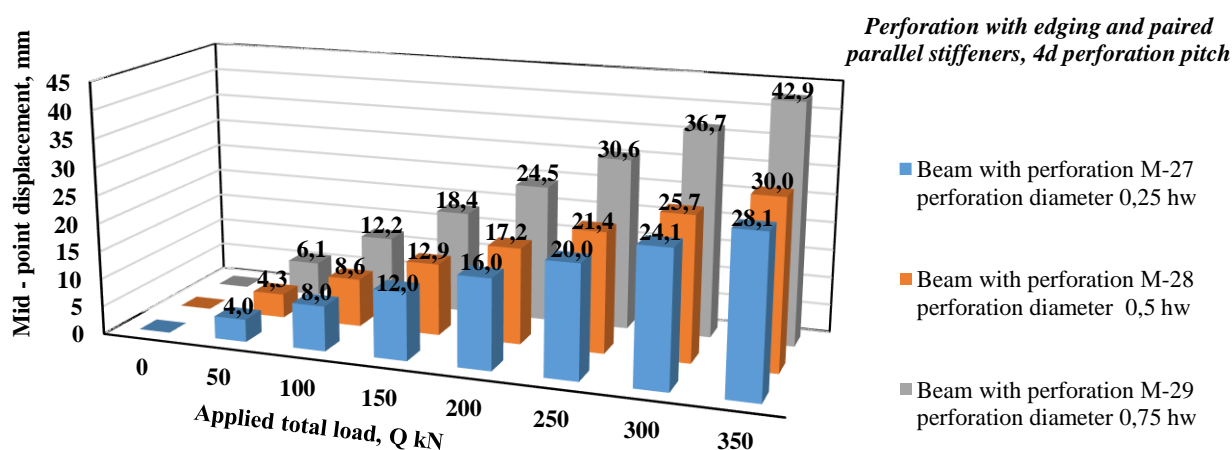




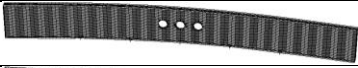
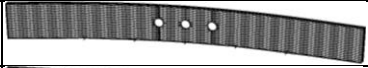




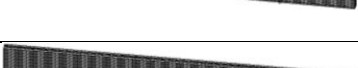




















Figure 17 – The plot of displacement and applied total load value dependence for the M-27, M-28, and M-29 with 4d perforation pitch with perforation edging and paired parallel stiffeners [authors' material].

The final step in stiffening the beam models with perforation pitch 4d, as well as for perforations with spacing 2d, 3d was the inclusion of paired parallel stiffeners in the work of the web with perforations stiffened by edging. The stiffener thickness was assumed to be 10 mm. For beam model M-27 with a perforation diameter of $0.25h_w$, the reinforcement with paired ribs had almost no effect on its load carrying capacity. For beam models M-28 and M-29 with perforations of diameter $0.5h_w$ and $0.75h_w$, strengthening gave better results.

Table 1 shows the deformation shapes of beam models with different perforation diameters, with different perforation pitch under load.

Table 1 – Deflection shape of beam models with different diameters of three perforations without stiffening and with stiffening, with 2d, 3d, 4d perforation pitch.

Grade of the Model	Diameter of the perforation	Deformation shape of beam models with and without perforations	Grade of the Model	Diameter of the perforation	Deformation shape of beam models with perforation
M-1	-		M-16	$0.5h_w$	
M-2	-		M-17	$0.75h_w$	
M-3	$0.25h_w$		M-18	$0.25h_w$	
M-4	$0.5h_w$		M-19	$0.5h_w$	
M-5	$0.75h_w$		M-20	$0.75h_w$	
M-6	$0.25h_w$		M-21	$0.25h_w$	
M-7	$0.5h_w$		M-22	$0.5h_w$	
M-8	$0.75h_w$		M-23	$0.75h_w$	
M-9	$0.25h_w$		M-24	$0.25h_w$	
M-10	$0.5h_w$		M-25	$0.5h_w$	
M-11	$0.75h_w$		M-26	$0.75h_w$	
M-12	$0.25h_w$		M-27	$0.25h_w$	
M-13	$0.5h_w$		M-28	$0.5h_w$	
M-14	$0.75h_w$		M-29	$0.75h_w$	
M-15	$0.25h_w$				

According to the analysis of beam models with perforations of various diameters and pitches, the following main conclusions can be drawn:

- the most effective beam model with perforation diameter $0.25h_w$ with 2d s perforation pitch was beam model M-9, with 3d perforation pitch beam model M-18, with 4d perforation pitch beam model M-27. All the beam models whose perforations were strengthened by sheet steel edging and paired stiffening ribs located on both sides of the perforation showed the best results. For design purposes, can recommend the beam model M-9 which has the best performance with perforation diameter $0.25h_w$ and perforation pitch 2d;

- the most effective beam model with perforation diameter $0.5h_w$ with 2d spacing was the M-10 beam model, with 3d perforation pitch the M-19 beam model, and with 4d perforation pitch the M-28 beam model. All the above models, whose perforations were strengthened by sheet steel edge-

ing and paired stiffening ribs located on both sides of the perforation, showed the best results. For design purposes, can recommend the M-10 beam model which has the best performance with perforation diameter $0.5h_w$ and perforation pitch $2d$;

- the most effective beam model with perforation diameter $0.75h_w$ with $2d$ perforation pitch was beam model M-11, with $3d$ perforation pitch beam model M-18, with $4d$ perforation pitch beam model M-27. All the above models, whose perforations were strengthened by sheet steel edging and paired stiffening ribs located on both sides of the perforation, showed the best results. For design purposes, out of the above three beam models, we can recommend beam model M-11 which has the best performance with perforation diameter $0.75h_w$ and perforation pitch $2d$.

5 CONCLUSIONS

1. In this paper, was investigated operation of a welded I-beam with cross-corrugated web and triangular-shaped corrugations weakened by technological circular perforation.

2. A numerical parametric study of a beam wall with triangular corrugation outline and a thin-walled rib beam was performed, which included the analysis of 29 finite element modeled models. Out of these 29 models, 2 beam models were without perforations and 27 models had perforations in the wall structure with diameters $0.25h_w$, $0.5h_w$ and $0.75h_w$ at $2d$, $3d$ and $4d$ perforation pitch between perforation centers. The parametric study in the finite element analysis software package was carried out for beam models, considering different sizes of perforations in the beam web, perforation pitch, with and without perforation stiffening, as well as cross-corrugated web and triangular-shaped corrugations without perforation and thin-walled beam with stiffeners. The data obtained showed the effectiveness of placing perforations in the corrugated web with perforation $2d$ perforation pitch and with perforation diameters $0.25h_w$ и $0.5h_w$ stiffened with ring plates and parallel stiffeners. Thus, for the models with perforation diameter $0.5h_w$, stiffening with ring plates and parallel stiffeners increased the load carrying capacity of the beam with corrugated web weakened by technological circular perforations up to 20-25% and another 3-5% after stiffening with plate bending elements on the ring stiffener.

3. The methods of stiffening the technological circular perforation with ring plates and paired vertical stiffeners have been investigated, their influence on the operation of beam models with corrugated wall with perforations has been evaluated, as well as the influence of bending the outer edge of the ring plate on the load-bearing capacity of cross-corrugated web and triangular-shaped corrugations with perforation. The proposed methods of stiffening of technological circular perforation weakening the corrugated web of a welded I-beam have shown their effectiveness.

4. It should be noted the necessity and effectiveness of web stiffening in the areas between the belts and the element of stiffening of the perforation with paired stiffeners, in order to eliminate the loss of local stability under the concentrated load in the zone of the ring plate.

REFERENCES

1. **Bryantsev, A.A.** (2017). The effectiveness of the use of I-beams with corrugated webs in an industrial building [Effektivnost' primeneniya dvutavrov s gofrirovannymi stenkami v zdanii proizvodstvennogo naznacheniya], Construction of unique buildings and structures, 3(54), 93 – 104. <https://www.doi.org/10.18720/CUBS.54.8> (In Russ.).
2. **Poltoradnev, A.S.** (2013). Load-bearing capacity and optimization of thin-walled steel beams [Nesushchaya sposobnost' i optimizatsiya stal'nykh tonkostennykh balok], Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, 05.23.04, Moscow. [PDF file]. Retrieved from: <https://www.dissercat.com/content/nesushchaya-sposobnost-i-optimizatsiya-stalnykh-tonkostennykh-balok> (In Russ.).
3. **Coker, E. Failon, L.** (1936). An optical method for studying stresses [Opticheskiy metod issledovaniya napryazhenij.]. [PDF file]. Retrieved from: <https://lib-bkm.ru/10053> (In Russ.).

4. **Tuzi, Z.** (1928). Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research, 156. Retrieved from: <https://catalogue.nla.gov.au/catalog/3640206>
5. **Kudryavtsev, S.V.** (2011). Load-bearing capacity of beams with a corrugated web weakened by a circular perforation [Nesushchaya sposobnost' balok s gofirovannoj stenkoj, oslablennoj krugovym otverstiem], Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, 05.23.01, Yekaterinburg, UrFU. Retrieved from: <https://www.dissercat.com/content/nesushchaya-sposobnost-balok-s-gofirovannoi-stenkoi-oslablennoi-krugovym-otverstiem> (*In Russ.*)
6. **Chung, K.F.** (2001). Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings, Journal of constructional steel research, 57, 467–490. [https://www.doi.org/10.1016/S0143-974X\(00\)00035-3](https://www.doi.org/10.1016/S0143-974X(00)00035-3)
7. **Chung, K.F.** (2003). Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalized moment–shear interaction curve, Journal of constructional steel research, 59, 1177–1200. [https://www.doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00029-4](https://www.doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00029-4)
8. **Richard, R., Soon, H.Ch.**, (1993). Design of steel and composite beams with web openings, American institute of steel construction, Journal of Constructional Steel Research, 25, 23–41. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(93\)90050-3](https://doi.org/10.1016/0143-974X(93)90050-3)
9. **Hagen, N.C.** (2009). Shear capacity of steel plate girders with large web openings, Part 1: Modeling and simulations, Journal of constructional steel research, 65, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.03.014>
10. **Hagen, N.C.** (2009). Shear capacity of steel plate girders with large web openings, Part 2: Design guidelines, Journal of constructional steel research, 65, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.03.005>
11. **Shanmugan, N.E. Lian, V.T. Thevendran, V.** (2002). Finite element modeling of plate girders with web openings, Thin-walled structures, 40, 443–464. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(02\)00008-3](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(02)00008-3)
12. **Ahmed, M.S.** (2022). Numerical study of the effects of web openings on the load capacity of steel beams with corrugated webs, Journal of Constructional Steel Research, September 2022, 107418. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107418>
13. **Romeijn, A., Sarkhosh, R. and Hoop, H.** (2009). Basic parametric study on corrugated web girders with cut outs, Journal of Constructional Steel Research, 65, 395–407. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.02.006>
14. **Kiyamaz, G., Coskun, E., Cosgun, C. and Seckin, E.** (2010). Transverse load carrying capacity of sinusoidal corrugated steel web beams with web openings, Steel and Composite Structures, 10 (1), 69–85, <https://doi.org/10.12989/scs.2010.10.1.069>
15. **Chittaranjan, N. Samadhan, M.** (2019). Comparative study of effect of web openings on the strength capacities of steel beam with trapezoidally corrugated web, Asian Journal of Civil Engineering. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00166-6>
16. **Amr, B.S., Sedky, A.T., Amr, E., Ahmed, A.M.** (2021). Numerical study of flange buckling behavior of high-strength steel corrugated web i-girders, JES Journal of Engineering Sciences, 49(1):85–106. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2021.55553.1025>
17. **Ahmed, S.T., Rabiee, A.S., Amr, B.S., Ahmed A.** (2022). EL-Serwi Behavior Of Trapezoidal Corrugated Girders webs with cutouts: Experimental and Analytical Solution, JES Journal of Engineering Sciences 50 (3), <https://doi.org/10.21608/jesaun.2022.121021.1115>
18. **Bryantsev, A.A., Absimetov, V.E., Lalin, V.V.** (2019). The effect of perforations on the deformability of welded beam with corrugated webs. Magazine of Civil Engineering, 3(87):18–34, <https://www.doi.org/10.18720/MCE.87.2>
19. **Bryantsev, A.A., Absimetov, V.E.** (2020). Laboratory Tests of Welded Corrugated Beams with Perforations, Proceedings of EECE 2019, Energy, Environmental and Construction Engineering, https://www.doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_5

THE IMPACT OF TUNNEL LINING ON THE REACTION OF THE GROUND SURFACE UNDER THE INFLUENCE OF TRANSPORT LOADS

S.R. Girnis^{1*} , V.N. Ukrainets¹ , Zh.O. Otarbaev² , L.V. Gorshkova¹ 

¹Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Kazakhstan

²National Engineering Academy of Kazakhstan, Almaty, 050010, Kazakhstan

Abstract. *When a tunnel is subjected to transport loads (loads from the moving transportation within it), vibrations occur in the tunnel lining and the surrounding massif. Traditional quasi-static methods do not account for the dynamic behavior of tunnel structures. Therefore, this paper aims to develop a dynamic calculation method using modern mechanics. The purpose of this paper is to develop such a method. The relevance of the research in this article is due to the trend of increasing the speed of vehicles in recent years. This paper considers an unsupported and lined circular cylindrical shallow tunnel. The tunnel is modeled as an extended circular cylindrical cavity or reinforcing shell located in an elastic half-space. The surface of the cavity or the inner surface of the shell is subjected to a normal load (the effect of the pressure of a moving object on the tunnel) and a tangential load parallel to this axis (the effect of the friction forces of a moving object on the tunnel) moving uniformly along its axis. The motion of the half-space and the shell are described by the dynamic equations of elasticity theory and the equations of classical shell theory, respectively, in moving coordinate systems. The integral Fourier transform method is used to solve the problem. In the case of moving axisymmetric normal and axial tangential loads acting on the tunnel, a numerical study of the influence of the tunnel lining on the stress-strain state of the ground surface is carried out.*

Keywords: *tunnel, elastic half-space, cylindrical shell, transport load, displacements, stresses.*

***Corresponding author**

Svetlana Girnis, e-mail: girnis@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-06>

Received 30 May 2024; Revised 25 June 2024; Accepted 19 July 2024

ТОННЕЛЬ ҚАПТАМАСЫНЫҢ КӨЛІК ЖҮКТЕМЕЛЕРІ КЕЗІНДЕ ЖЕР БЕТІНІҢ РЕАКЦИЯСЫНА ӘСЕРІ

С.Р. Гирнис^{1*} , В.Н. Украинцев¹ , Ж.О. Отарбаев² , Л.В. Горшкова¹ 

¹Торайғыров университеті, Павлодар, 140008, Қазақстан

²ҚР Ұлттық инженерлік академиясы, Алматы, 050010, Қазақстан

Аңдатпа. Тоннельге көлік жүктемелері (тоннельде қозғалатын көліктің немесе өзге де объектінің жүктемелері) әсер еткен кезде оның қаптамасының және қоршаған массивтің дірілдері пайда болады. Тоннель құрылымдарының көлік жүктемелерін есептеу үшін қолданылатын шамамен квазистатикалық әдіс олардың динамикалық күй-өзгерістің ерекшеліктерін ескермейді. Сондықтан, механиканың заманауи көріністерін қолдана отырып, математикалық модельдерге негізделген осы конструкцияларды динамикалық есептеудің барабар әдістері қажет. Ұсынылған мақаланың мақсаты - осы әдісті әзірлеу болып табылады. Бұл мақалада қаптамамен бекітілмеген және бекітілген дөңгелек цилиндрлік тоннель қарастырылады. Тоннель серпімді жартылай кеңістікте орналасқан ұзартылған дөңгелек цилиндрлік қуыс немесе оны күшейтетін қабық түрінде модельденеді. Қуыстың бетіне немесе қабықтың ішкі бетіне оның осі бойымен біркелкі қозғалатын қалыпты жүктеме (қозғалатын заттан қысым туннеліне әсер ету) және осы оське параллельді жанама жүктеме (қозғалатын заттан үйкеліс күштерінің туннеліне әсер ету) әсер етеді. Жартылай кеңістік пен қабықтың қозғалысы, сәйкесінше, серпімділік теориясының динамикалық теңдеулерімен және жылжымалы координат жүйелеріндегі классикалық қабық теориясының теңдеулерімен сипатталады. Мәселені шешу үшін интегралды Фурье түрлендіру әдісі қолданылады. Қалыпты және осьтік тангенс жүктемелерінің қозғалмалы осьтік симметриялы тоннельге әсер еткен жағдайда, тоннель қаптамасының жер бетінің кернеулі деформацияланған күйіне әсері сандық зерттеу жүргізілді. Есептеу нәтижелерін талдаудан тоннельді қаптамамен нығайту көлік жүктемелерінің жер бетіне динамикалық әсерінің айтарлықтай төмендеуіне әкелетіні шығарылды.

Түйін сөздер: тоннель, серпімді жартылай кеңістік, цилиндрлік қабық, тасымалдау жүктемесі, қозғалыстар, кернеулер.

*Автор-корреспондент

Светлана Гирнис, e-mail: girnis@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-06>

Алынды 30 мамыр 2024; Қайта қаралды 25 маусым 2024; Қабылданды 19 шілде 2024

УДК 539.3: 624.195
МРНТИ 30.19.15
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

ВЛИЯНИЕ ОБДЕЛКИ ТОННЕЛЯ НА РЕАКЦИЮ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТРАНСПОРТНЫХ НАГРУЗКАХ

С.Р. Гирнис ^{1*} , В.Н. Украинец ¹ , Ж.О. Отарбаев ² , Л.В. Горшкова ¹ 

¹Торайгыров университет, Павлодар, 140008, Казахстан

²Национальная инженерная академия РК, Алматы, 050010, Казахстан

Аннотация. При воздействии на тоннель транспортных нагрузок (нагрузок от движущегося в тоннеле транспорта или иного объекта) возникают вибрации его обделки и окружающего массива. Используемый для расчетов на транспортные нагрузки конструкций тоннелей приближенный квазистатический метод не учитывает особенности их динамического поведения. Поэтому необходимы адекватные методы динамических расчётов данных конструкций, основанные на математических моделях с использованием современных представлений механики. Целью представленной статьи является разработка одного из таких методов. В данной статье рассматривается неподкрепленный и подкрепленный обделкой круговой цилиндрический тоннель мелкого заложения. Тоннель моделируется в виде расположенной в упругом полупространстве протяженной круговой цилиндрической полости или подкрепляющей ее оболочки. На поверхность полости или на внутреннюю поверхность оболочки действуют равномерно движущиеся вдоль ее оси нормальная нагрузка (действие на тоннель давления от движущегося объекта) и параллельная этой оси касательная нагрузка (действие на тоннель сил трения от движущегося объекта). Движение полупространства и оболочки описываются соответственно динамическими уравнениями теории упругости и уравнениями классической теории оболочек в подвижных системах координат. Для решения задачи используется метод интегрального преобразования Фурье. В случае действия на тоннель движущихся осесимметричных нормальной и осевой касательной нагрузок проведено численное исследование влияния обделки тоннеля на напряженно-деформированное состояние земной поверхности.

Ключевые слова: тоннель, упругое полупространство, цилиндрическая оболочка, транспортная нагрузка, перемещения, напряжения.

*Автор-корреспондент

Светлана Гирнис, e-mail: girnism@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-06>

Поступило 30 мая 2024 г.; Пересмотрено 25 июня 2024 г.; Принято 19 июля 2024 г.

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС/ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 INTRODUCTION

To date, many complex projects of transport tunnels have been created and implemented, and various analytical and numerical methods have been developed to calculate their structures for various types of loads and impacts (Hrapov et al., 1989). All this is based on the currently existing design standards for underground structures, which practically do not take into account the speed of transportation or other objects moving in the tunnel, and poorly consider the interaction of its lining with the surrounding massif. Therefore, the calculation of tunnel structures on this basis is very approximate. Since, as it is known from the practice of tunnel operation, at high speed of transport load there is a significant increase of vibration of their structures, adequate methods of dynamic calculation of these structures for transport load, based on mathematical models using modern concepts of mechanics, are required. This paper is devoted to the development of such a method.

When a tunnel supported by a homogeneous cylindrical lining is dynamically designed for transport loads, its design scheme is usually represented as an extended cylindrical shell in an elastic medium. A load (transport load) moving along its axis acts on the inner surface of the shell. The shell is considered in an unbounded medium (elastic space) if the tunnel is deep. However, if it is shallow, it is considered in a medium bounded by a plane parallel to the axis of the shell (elastic half-space).

The problem of the action of a moving normal load on a thin-walled cylindrical shell in elastic space (a model problem for a deeply buried tunnel) was solved in (Pozhuev & Lvovskij, 1976). A similar model problem for a shallow buried tunnel is considered in (Ukrainets, 2006). Here, a comparative analysis of the stress-strain state (SSS) of the rock mass in the vicinity of an unsupported and supported by a cylindrical lining shallow tunnel under the action of normal transport load is carried out. Due to the fact that the vehicle (or other object) moving along the tunnel, which transfers the normal compressive load to its surface, can have a significant influence on it by friction in the axial direction, (for example, when the wheels of a rolling stock car jam), it is necessary to perform a similar to (Ukrainets, 2006) study in the case of their joint action. The results of such a study are presented in this paper.

2 LITERATURE REVIEW

Many works are devoted to the study of the dynamics of extended underground structures under the action of various disturbances. A rather detailed bibliography on this subject can be found in the monographs of Zh.S. Erzhanov, Sh.M. Ajtaliyev, (Yerzhanov & Ajtaliyev, 1989), Sh.M. Ajtaliyev, L.A. Alekseeva, Sh.M. Dildabayev, N.B. Zhanbyrbayev (Ajtaliyev et al., 1992) and in the review article of Sh.M. Ajtaliyev (Ajtaliyev, 2004).

The spatial problems of radiation and reflection of elastic waves during the motion of pulsating loads along a tunnel laid in the ground were considered by M.A. Dashevsky (Dashevskij, 1971a), (Dashevskij, 1971b). Here, a beam of annular non-deformable cross-section located in elastic space was taken as the design scheme of the tunnel lining. The solution of the problems was constructed in the form of series for scalar and vector potentials. Subsequent articles of M.A. Dashevsky (Dashevskij, 1974), (Dashevskij, 1982) are devoted to the question of determining the level of ground vibrations in the vicinity of the subway track. In (Dashevskij, 1974), a plane problem of elasticity theory was investigated for a half-plane with a hole. A more precise approach is proposed in (Dashevskij, 1982). Here, the problem of the response of an elastic half-space containing a cavity supported by a cylindrical shell to a pulsating load moving along the shell axis was solved using the reflected source method. Since the method does not allow satisfying the boundary conditions on the free surface of the half-space, the solution of the problem about the normal load moving along the surface of the half-space is used to refine the solution. The paper proposes an iterative process using these two solutions to obtain the exact solution.

An exact solution of the problem of elasticity theory about an axisymmetric normal load

moving along the inner surface of a homogeneous shell located in a boundless elastic medium with a constant subsonic velocity (lower than the shear wave propagation velocities in the shell and the medium) was obtained by V.M. Lvovsky, V.I. Onishchenko and V.I. Pozhuyev ([Lvovsky et al., 1974](#)). Here, the motions of the shell and the medium were described by the dynamic equations of elasticity theory, and the Fourier integral transformation on the axial moving coordinate was used in the solution. The contact between the shell and the medium was assumed to be sliding. The solution is obtained when the load velocity is less than its critical velocity. In a simplified formulation, when the shell motion is described by approximate equations of the shell theory (classical and Timoshenko type), the solution of the problem ([Lvovsky et al., 1974](#)) was obtained by V.I. Pozhuyev and V.M. Lvovsky ([Pozhuyev & Lvovskij, 1976](#)). It was found that if the ratio of the thickness of the shell to the radius of its median surface is less than 0.05, then in this case we can use the classical shell theory as the simplest one. It was found that if the ratio of the thickness of the shell to the radius of its median surface is less than 0.05, then in this case the classical shell theory can be used as the simplest one. This position was reflected in further studies of V.I. Pozhuyev ([Pozhuyev, 1978](#)), ([Pozhuyev, 1980](#)).

The action of a load arbitrarily dependent on axial and angular coordinates on the inner surface of a thin-walled shell located in elastic space and moving along its axis at a constant subsonic velocity (less than the velocity of shear wave propagation in elastic space) was considered in ([Ukrainets & Giris, 2005](#)), ([Ukrainets & Giris, 2006](#)), ([Giris, 2009](#)). Here, the motion of the elastic space was described by the dynamic equations of elasticity theory in Lamé potentials, and the shell vibrations were described by the classical equations of shell theory. The equations were represented in a moving cylindrical coordinate system that moved with the load. Initially, an arbitrary load moving in the circumferential direction was assumed to be sinusoidal along the shell axis. The method of incomplete separation of variables was used to solve this problem. The Lamé potentials were represented as the Fourier-Bessel series. The unknown coefficients were determined from the boundary conditions. The obtained solution was then used to solve the problem of the action of a moving load on the given shell, which has no periodicity but is represented as a Fourier integral. As a result, a steady-state solution of the problem was obtained for precritical load velocities. A similar solution of the model problem for a shallow transport tunnel is presented in ([Alekseeva & Ukrainets, 2009](#)), where the effect of waves reflected from the ground surface, resulting from the movement of the loads on the tunnel lining and the surrounding massif, is additionally taken into account.

In this paper, in contrast to ([Alekseeva & Ukrainets, 2009](#)), the integral Fourier transform of the axial moving coordinate is used to solve the problem, which allows us to consider the load distributed along the axis of the cavity or the supporting shell according to an arbitrary law and to obtain the final solution expressions without summation at once.

3 MATERIALS AND METHODS

The study uses the method of mathematical modeling with the involvement of models and equations from the theory of elasticity. The design scheme of a shallow transport tunnel is considered as an extended circular cylindrical cavity located in an elastic half-space (for an unsupported tunnel) or a supporting shell (for a tunnel supported by a circular cylindrical lining). The surface of the cavity or the inner surface of the shell is subjected to a normal load (the effect of the pressure of a moving object on the tunnel) and a tangential load parallel to this axis (the effect of the friction forces of a moving object on the tunnel) moving uniformly along its axis. It is assumed that the load functions can be decomposed into a Fourier series in the angular coordinate and a Fourier integral in the axial coordinate. The motion of the shell is described by the classical equations of shell theory, and that of the elastic half-space by the dynamic equations of elasticity in the Lamé potentials, for the solution of which the method of Fourier integral transformation in the axial moving coordinate is used.

4 RESULTS AND DISCUSSION

4.1 FORMULATION AND ANALYTICAL SOLUTION OF THE PROBLEM

Considering two design schemes for the tunnel (Figure 1).

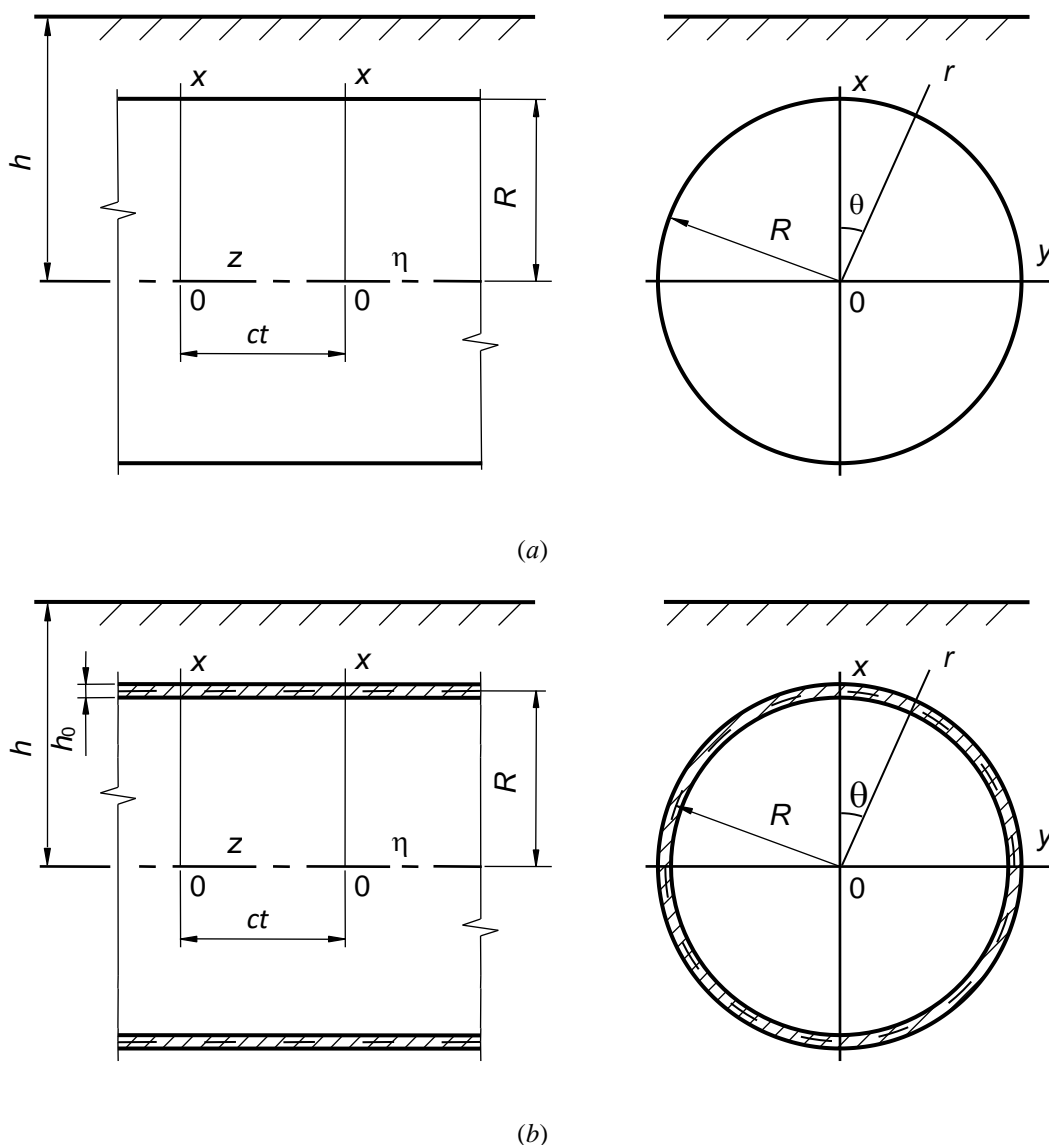


Figure 1 – Design schemes of tunnels: (a) unsupported and (b) supported by a thin-walled (authors' materials).

In the first design scheme for the tunnel, a linear-elastic, homogeneous, and isotropic half-space (massif) in a cylindrical r, θ, z and Cartesian x, y, z coordinate system that remains unchanged in its position was considered. The half-space, with its horizontal boundary (ground surface) free from loads, contains an extended circular cylindrical cavity with a radius of R . The axis of the cavity coincides with the z -axis, which is parallel to the boundary of the half-space. The x -axis is perpendicular to this boundary of the half-space: $x \leq h$ ($h > R$), where h represents the depth of the tunnel embedding (Figure 1 (a)). In the second design scheme of the tunnel, the cavity is fortified with a thin-walled shell (lining) of a thickness, denoted as h_0 , and having a radius of the middle surface R (Figure 1 (b)). Considering the thinness of the shell h_0 it is assumed that it

contacts with the massif along its middle surface. The shell has hard contact with the massif. The massif and the shell materials are characterized by the following constants, representing their physical and mechanical properties. Poisson's ratio: ν (for the massif), ν_0 (for the shell); shear modulus: μ (for the massif), μ_0 (for the shell); density: ρ (for the massif), ρ_0 (for the shell).

At the surface of the cavity (**Figure 1 (a)**) or on the inner surface of the shell (**Figure 1 (b)**), there are normal and tangential acting parallel to the z -axis loads that move in the direction of the z -axis with a constant velocity c (lower than the shear wave propagation velocity in the medium). The next stage is to determine the SSS of the massif.

To solve the problem, moving cylindrical $(r, \theta, \eta = z - ct)$ and Cartesian $(x, y, \eta = z - ct)$ coordinate systems that move together with the load are to be introduced. The motion of the shell in these coordinate systems is described by equation (1), while the motion of the massif – by equation (2) (**Ukrainets, 2006**), (**Alekseeva & Ukrainets, 2009**):

$$\begin{aligned} \left[1 - \frac{(1-\nu_0)\rho_0 c^2}{2\mu_0}\right] \frac{\partial^2 u_{0\eta}}{\partial \eta^2} + \frac{1-\nu_0}{2R^2} \frac{\partial^2 u_{0\eta}}{\partial \theta^2} + \frac{1+\nu_0}{2R} \frac{\partial^2 u_{0\theta}}{\partial \eta \partial \theta} + \frac{\nu_0}{R} \frac{\partial u_{0r}}{\partial \eta} &= \frac{1-\nu_0}{2\mu_0 h_0} (P_\eta - q_\eta), \\ \frac{1+\nu_0}{2R} \frac{\partial^2 u_{0\eta}}{\partial \eta \partial \theta} + \frac{(1-\nu_0)}{2} \left(1 - \frac{\rho_0 c^2}{\mu_0}\right) \frac{\partial^2 u_{0\theta}}{\partial \eta^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 u_{0\theta}}{\partial \theta^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial u_{0r}}{\partial \theta} &= -\frac{1-\nu_0}{2\mu_0 h_0} q_\theta, \\ \frac{\nu_0}{R} \frac{\partial u_{0\eta}}{\partial \eta} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial u_{0\theta}}{\partial \theta} + \frac{h_0^2}{12} \nabla^2 \nabla^2 u_{0r} + \frac{(1-\nu_0)\rho_0 c^2}{2\mu_0} \frac{\partial^2 u_{0r}}{\partial \eta^2} + \frac{u_{0r}}{R^2} &= -\frac{1-\nu_0}{2\mu_0 h_0} (P_r - q_r). \end{aligned} \quad (1)$$

Here q_j and u_{0j} – respective the massif reaction and the displacements of points on the middle surface of the shell (when $r = R$ $q_j = \sigma_{rj}$, where σ_{rj} – the stresses in the massif), $j = \eta, \theta, r$; $P_\eta(\theta, \eta)$ and $P_r(\theta, \eta)$ – the intensity of the axial tangential and normal load.

$$(M_p^{-2} - M_s^{-2}) \text{grad div } \mathbf{u} + M_s^{-2} \nabla^2 \mathbf{u} = \partial^2 \mathbf{u} / \partial \eta^2, \quad (2)$$

where $M_p = c/c_p$, $M_s = c/c_s$ – Mach numbers; $c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$, $c_s = \sqrt{\mu/\rho}$ – the speeds of propagation of compression-expansion and shear waves in the massif, $\lambda = 2\mu\nu/(1-2\nu)$; \mathbf{u} – vector displacement of the elastic medium, ∇^2 – Laplace operator.

Write \mathbf{u} through Lamé potentials φ_j ($j = 1, 2, 3$) (**Novackij, 1975**)

$$\mathbf{u} = \text{grad } \varphi_1 + \text{rot}(\varphi_2 \mathbf{e}_\eta) + \text{rot rot}(\varphi_3 \mathbf{e}_\eta),$$

transform (2) to the form of

$$\nabla^2 \varphi_j = M_j^2 \partial^2 \varphi_j / \partial \eta^2, \quad j = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Here $M_1 = M_p$, $M_2 = M_3 = M_s$.

Let's express the components of the medium's SSS in terms of Lamé potentials φ_j .

Components of the vector \mathbf{u} in Cartesian (4) and cylindrical (5) coordinate systems:

$$\begin{aligned}
u_x &= \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} + \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial x \partial \eta}, \\
u_y &= \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} + \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial y \partial \eta}, \\
u_\eta &= \frac{\partial \varphi_1}{\partial \eta} + m_s^2 \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial \eta^2};
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
u_r &= \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_2}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial \eta \partial r}, \\
u_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial \eta \partial \theta}, \\
u_\eta &= \frac{\partial \varphi_1}{\partial \eta} + m_s^2 \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial \eta^2}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Using Hooke's law, taking into account (4) and (5), expressions for the components of the stress tensor in Cartesian (6) and cylindrical (7) coordinates can be found

$$\begin{aligned}
\sigma_{\eta\eta} &= (2\mu + \lambda M_p^2) \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \eta^2} + 2\mu m_s^2 \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial \eta^3}, \\
\sigma_{yy} &= \lambda M_p^2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \eta^2} + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial y^2 \partial \eta} \right), \\
\sigma_{xx} &= \lambda M_p^2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \eta^2} + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial x^2 \partial \eta} \right), \\
\sigma_{x\eta} &= \mu \left(2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \eta \partial x} + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial y \partial \eta} + (1 + m_s^2) \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial \eta^2 \partial x} \right), \\
\sigma_{\eta y} &= \mu \left(2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y \partial \eta} - \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x \partial \eta} + (1 + m_s^2) \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial y \partial \eta^2} \right), \\
\sigma_{xy} &= 2\mu \left(\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} - \frac{m_s^2}{2} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial x \partial y \partial \eta} \right);
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{\eta\eta} &= (2\mu + \lambda M_p^2) \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \eta^2} + 2\mu m_s^2 \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial \eta^3}, \\
\sigma_{\theta\theta} &= \lambda M_p^2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \eta^2} + \frac{2\mu}{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \theta^2} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_2}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial \theta^2 \partial \eta} + \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial r \partial \eta} \right), \\
\sigma_{rr} &= \lambda M_p^2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \eta^2} + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial \theta \partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \varphi_2}{\partial \theta} + \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial r^2 \partial \eta} \right), \\
\sigma_{r\eta} &= \mu \left(2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \eta \partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial \theta \partial \eta} + (1 + m_s^2) \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial \eta^2 \partial r} \right), \\
\sigma_{\eta\theta} &= \mu \left(\frac{2}{r} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \theta \partial \eta} - \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial r \partial \eta} + \frac{(1 + m_s^2)}{r} \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial \theta \partial \eta^2} \right),
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\sigma_{r\theta} = 2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \theta \partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial r^2} - \frac{m_s^2}{2} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial \eta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^3 \varphi_3}{\partial r \partial \eta \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial \eta \partial \theta} \right).$$

Applying the Fourier transform in η to equations (3), we get

$$\nabla_2^2 \varphi_j^* - m_j^2 \xi^2 \varphi_j^* = 0, \quad j = 1, 2, 3, \tag{8}$$

where $\varphi_j^*(r, \theta, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j(r, \theta, \eta) e^{-i\xi\eta} d\eta$, $m_j^2 = 1 - M_j^2$, $m_1 \equiv m_p$, $m_2 = m_3 \equiv m_s$, ∇_2^2 – two-dimensional Laplace operator.

Applying the Fourier transform to (4) – (7) in η , we obtain expressions for the transforms of displacements u_i^* and stresses σ_{lm}^* in Cartesian ($l, m = x, y, \eta$) and cylindrical ($l, m = r, \theta, \eta$) coordinate systems, represented in terms of φ_j^* . Applying the Fourier transform to equations (4) – (7) in η , expressions for the transforms of displacements u_i^* and stresses σ_{lm}^* in Cartesian ($l, m = x, y, \eta$) and cylindrical ($l, m = r, \theta, \eta$) coordinate systems are obtained, represented in terms of φ_j^* .

If $c < c_s$, then $M_s < 1$ ($m_s > 0$). Therefore, the solutions of equations (8) can be presented in the form of:

$$\varphi_j^* = \Phi_j^{(1)} + \Phi_j^{(2)}, \tag{9}$$

where $\Phi_j^{(1)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj} K_n(k_j r) e^{in\theta}$, $\Phi_j^{(2)} = \int_{-\infty}^{\infty} g_j(\xi, \zeta) \exp(iy\zeta + (x-h)\sqrt{\zeta^2 + k_j^2}) d\zeta$, $K_n(kr)$ – MacDonald functions, $k_j = m_j \xi$; a_{nj} , $g_j(\xi, \zeta)$ – unknown functions and coefficients to be determined, $j = 1, 2, 3$.

The solutions (9) yield the subsequent expressions for φ_j^* in the Cartesian coordinate system:

$$\varphi_j^* = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{e^{-xf_j}}{2f_j} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj} \Phi_{nj} + g_j(\xi, \zeta) e^{(x-h)f_j} \right] e^{iy\zeta} d\zeta, \tag{10}$$

where $f_j = \sqrt{\zeta^2 + k_j^2}$, $\Phi_{nj} = \left(\frac{\zeta + f_j}{k_j} \right)^n$, $j = 1, 2, 3$.

Let's express the functions $g_j(\xi, \zeta)$ using the coefficients a_{nj} ($j = 1, 2, 3$). Considering (10), let's use the boundary conditions when $x = h$:

$$\sigma_{xx}^* = \sigma_{xy}^* = \sigma_{x\eta}^* = 0.$$

Extracting coefficients of $e^{iy\zeta}$ and equating them to zero, due to the arbitrariness of y , a system of three equations is derived from which one can deduce

$$g_j(\xi, \zeta) = \frac{1}{\Delta_*} \sum_{l=1}^3 \Delta_{jl}^* e^{-hf_l} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nl} \Phi_{nl}. \tag{11}$$

Here $\Delta_* = (2\rho_*^2 - \beta^2)^2 - 4\rho_*^2\sqrt{\rho_*^2 - \alpha^2}\sqrt{\rho_*^2 - \beta^2}$,

$$\Delta_{11}^* = \frac{\Delta_*}{2\sqrt{\rho_*^2 - \alpha^2}} - \frac{(2\rho_*^2 - \beta^2)^2}{\sqrt{\rho_*^2 - \alpha^2}}, \Delta_{12}^* = -2\zeta(2\rho_*^2 - \beta^2), \Delta_{13}^* = 2\xi(2\rho_*^2 - \beta^2)\sqrt{\rho_*^2 - \beta^2},$$

$$\Delta_{21}^* = -\frac{M_s^2}{m_s^2}\Delta_{12}^*, \Delta_{22}^* = -\frac{\Delta_{**}}{2\sqrt{\rho_*^2 - \beta^2}}, \Delta_{23}^* = -4\xi\zeta\frac{M_s^2}{m_s^2}\sqrt{\rho_*^2 - \alpha^2}\sqrt{\rho_*^2 - \beta^2},$$

$$\Delta_{31}^* = -\frac{\Delta_{13}^*}{m_s^2\xi^2}, \Delta_{32}^* = \frac{\Delta_{21}^*}{\beta^2}, \Delta_{33}^* = -\frac{\Delta_{**}}{2\sqrt{\rho_*^2 - \beta^2}} + \frac{(2\rho_*^2 - \beta^2)^2}{\sqrt{\rho_*^2 - \beta^2}},$$

$$\alpha = M_p\xi, \beta = M_s\xi, \rho_*^2 = \xi^2 + \zeta^2, \Delta_{**} = (2\rho_*^2 - \beta^2)^2 - 4\rho_*^2\sqrt{\rho_*^2 - \alpha^2}\sqrt{\rho_*^2 - \beta^2},$$

$$\rho_{**}^2 = \xi^2 + (2/m_s^2 - 1)\zeta^2.$$

Note that $\Delta_*(\rho_*)$ – is Rayleigh's determinant, which equals zero when $\rho_{*R}^2 = \xi^2 M_R^2$, or at two points $\pm \zeta_R = \pm|\xi|\sqrt{M_R^2 - 1}$, where $M_R = c/c_R$ – Mach number, c_R – Rayleigh surface wave velocity (Novackij, 1975). From the latter, it follows that $\Delta_*(\rho_*)$ does not equal zero on the real axis if $M_R < 1$, or $c < c_R$.

If $c < c_R$ the relations (11), considering (10), will be rewritten as

$$\Phi_j^* = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{e^{-xf_j}}{2f_j} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nj} \Phi_{nj} + e^{(x-h)f_j} \sum_{l=1}^3 \frac{\Delta_{jl}^*}{\Delta_*} e^{-hf_l} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{nl} \Phi_{nl} \right] e^{iy\zeta} d\zeta. \quad (12)$$

Using relation (Yerzhanov & Ajtaliev, 1989)

$$\exp(iy\zeta + (x-h)\sqrt{\zeta^2 + k_j^2}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(k_j r) e^{in\theta} \left[\left(\zeta + \sqrt{\zeta^2 + k_j^2} \right) / k_j \right]^n e^{-h\sqrt{\zeta^2 + k_j^2}},$$

we obtain (9) in a cylindrical coordinate system (9)

$$\Phi_j^* = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(a_{nj} K_n(k_j r) + I_n(k_j r) \int_{-\infty}^{\infty} g_j(\xi, \zeta) \Phi_{nj} e^{-hf_j} d\zeta \right) e^{in\theta},$$

where $I_n(kr)$ – modified Bessel functions.

If $c < c_R$ the last expression, taking into account (11), can be rewritten as

$$\Phi_j^* = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (a_{nj} K_n(k_j r) + b_{nj} I_n(k_j r)) e^{in\theta}. \quad (13)$$

Here $b_{nj} = \sum_{l=1}^3 \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_{ml} A_{nj}^{ml}$, $A_{nj}^{ml} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta_{jl}^*}{\Delta_*} \Phi_{ml} \Phi_{nj} e^{-h(f_l + f_j)} d\zeta$.

Using (12) and (13), expressions for the displacement transformant u_l^* and stress transformant σ_{lm}^* are obtained in Cartesian ($l, m = x, y, \eta$) and cylindrical ($l, m = r, \theta, \eta$) coordinate

systems with unknown coefficients a_{nj} ($j=1, 2, 3$), which are determined from the boundary conditions on the surface of the cavity $r = R$:

- for a nonreinforced cavity (Figure 1 (a))

$$\sigma_{rr}^* = P_r^*(\theta, \xi), \quad \sigma_{r\theta}^* = 0, \quad \sigma_{r\eta}^* = -P_\eta^*(\theta, \xi), \quad (14)$$

- for a cavity reinforced by a thin shell (Figure 1 (b))

$$u_l^* = u_{0l}^*. \quad (15)$$

Here

$$P_j^*(\theta, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} P_j(\theta, \eta) e^{-i\xi\eta} d\eta = p_j(\theta) p_j^*(\xi), \quad p_j(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_{nj} e^{in\theta}, \quad p_j^*(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} p_j(\eta) e^{-i\xi\eta} d\eta, \quad j = r, \eta;$$

$$u_{0l}^*(\theta, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{0l}(\theta, \eta) e^{-i\xi\eta} d\eta, \quad l = \eta, \theta, r.$$

By performing the Fourier transform on (1) concerning η and decomposing the functions $P_j^*(\theta, \xi)$ and $u_{0l}^*(\theta, \xi)$ ($j = \eta, r, l = \eta, \theta, r$) in the Fourier series in θ , the following is obtained:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^2 u_{0m\eta} + v_* n \xi_0 u_{0n\theta} - 2i v_0 \xi_0 u_{0nr} &= G_0 (P_{m\eta} - q_{m\eta}), \\ v_* n \xi_0 u_{0m\eta} + \varepsilon_2^2 u_{0n\theta} - 2i n u_{0nr} &= -G_0 q_{n\theta}, \\ 2i v_0 \xi_0 u_{0m\eta} + 2i n u_{0n\theta} + \varepsilon_3^2 u_{0nr} &= G_0 (P_{nr} - q_{nr}), \end{aligned} \quad (16)$$

where $\varepsilon_1^2 = \alpha_0^2 - \varepsilon_0^2$, $\varepsilon_2^2 = \beta_0^2 - \varepsilon_0^2$, $\varepsilon_3^2 = \gamma_0^2 - \varepsilon_0^2$, $\xi_0 = \xi R$,

$$\alpha_0^2 = 2\xi_0^2 + v_{**} n^2, \quad \beta_0^2 = v_{**} \xi_0^2 + 2n^2, \quad \gamma_0^2 = \chi^2 (\xi_0^2 + n^2)^2 + 2, \quad \varepsilon_0^2 = v_{**} \xi_0^2 M_{s0}^2,$$

$$v_{**} = 1 - v_0, \quad v_* = 1 + v_0, \quad M_{s0} = c / c_{s0}, \quad c_{s0} = (\mu_0 / \rho_0)^{1/2}, \quad \chi^2 = \frac{h_0^2}{6R^2}, \quad G_0 = -\frac{v_{**} R^2}{\mu_0 h_0};$$

P_{nj} , u_{0nl} – the coefficients of decomposition $P_j^*(\theta, \xi)$, $u_{0l}^*(\theta, \xi)$ respectively, in the Fourier series by the angular coordinate θ ($j = \eta, r, l = \eta, \theta, r$). When $r = R$ $q_{nl} = (\sigma_{rl}^*)_n$ ($l = \eta, \theta, r$).

Resolving (16) concerning u_{0nl} ($l = \eta, \theta, r$), one can find:

$$\begin{aligned} u_{0m\eta} &= G_0 \sum_{j=1}^3 \frac{\delta_{\eta j}}{\delta_n} (P_{nj} - q_{nj}), \\ u_{0n\theta} &= G_0 \sum_{j=1}^3 \frac{\delta_{\theta j}}{\delta_n} (P_{nj} - q_{nj}), \\ u_{0nr} &= G_0 \sum_{j=1}^3 \frac{\delta_{rj}}{\delta_n} (P_{nj} - q_{nj}). \end{aligned}$$

Here $\delta_n = \delta_{|n|} = (\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3)^2 - (\varepsilon_1 \xi_1)^2 - (\varepsilon_2 \xi_2)^2 - (\varepsilon_3 \xi_3)^2 + 2\xi_1 \xi_2 \xi_3$,

$$\delta_{\eta 1} = (\varepsilon_2 \varepsilon_3)^2 - \xi_1^2, \quad \delta_{\eta 2} = \xi_1 \xi_2 - \xi_3 \varepsilon_3^2, \quad \delta_{\eta 3} = i(\varepsilon_2^2 \xi_2 - \xi_1 \xi_3),$$

$$\delta_{\theta 1} = \delta_{\eta 2}, \quad \delta_{\theta 2} = (\varepsilon_1 \varepsilon_3)^2 - \xi_2^2, \quad \delta_{\theta 3} = i(\varepsilon_1^2 \xi_1 - \xi_2 \xi_3),$$

$$\delta_{r1} = -\delta_{\eta 3}, \quad \delta_{r2} = -\delta_{\theta 3}, \quad \delta_{r3} = (\varepsilon_1 \varepsilon_2)^2 - \xi_3^2,$$

$$\xi_1 = 2n, \quad \xi_2 = 2v_0\xi_0, \quad \xi_3 = v_*\xi_0n; \quad P_{n1} = P_{m\eta}, \quad P_{n2} = P_{n\theta} = 0, \quad P_{n3} = P_{nr}, \quad q_{n1} = q_{m\eta}, \quad q_{n2} = q_{n\theta}, \quad q_{n3} = q_{nr}.$$

By substituting the appropriate expressions into (14) or (15) and equating the coefficients of the Fourier-Bessel series at $e^{in\theta}$, obtain an infinite system ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) linear algebraic equations for determining coefficients a_{nj} ($j=1, 2, 3$). This system of equations has a unique solution if the corresponding determinant $\Delta_n(\xi, c) \neq 0$ is nonzero for each value of n . Research on determinants $\Delta_n(\xi, c)$, has demonstrated that for an unsupported cavity (**Figure 1 (a)**) this requirement can be fulfilled by satisfying the condition $c < c_R$. However, for a supported cavity (**Figure 1 (б)**), the speed ($c < c_R$) of load movement must be lower than its critical speeds: $c < c_{(n)*}$. The values of the critical speeds $c_{(n)*}$ are determined from the dispersion equations $\Delta_n(\xi, c) = 0$ and may be less than the Rayleigh speed c_R . As studies based on numerical calculations show, the lowest critical speed of the load corresponds to the number $n = 0$ ($\min c_{(n)*} = c_{(0)*}$).

We can compute the displacements u_l and stresses σ_{lm} ($l, m = r, \theta, \eta$) in the massif by determining the coefficients a_{nj} ($j=1, 2, 3$) and applying the inverse Fourier transform.

4.2 NUMERICAL EXPERIMENTS

Apply the obtained solution to calculate the SSS of the ground surface. For example, consider an unsupported and supported circular cylindrical tunnel with a thin cast iron lining ($h_0 = 0.05$ m; $v_0 = 0.3$, $\mu_0 = 5.77 \cdot 10^{10}$ Pa, $\rho_0 = 7.2 \cdot 10^3$ kg/m³), with a radius of $R = 1$ m, passing through siltstone ($v = 0.2$, $\mu = 2.532 \cdot 10^9$ Pa, $\rho = 2.5 \cdot 10^3$ kg/m³, $c_s = 1006.4$ m/s, $c_R = 917$ m/s) at a shallow depth $h = 2R$.

An axially symmetric normal load P_r (pressure of a moving body on the surface of the tunnel) and an axially symmetric tangential load P_η (the result of the friction forces acting on the surface of the tunnel from the moving object), uniformly applied in the interval $|\eta| \leq l_0 = 0.2R$, moving along the tunnel at a constant speed $c = 100$ m/s. In this case $P_{0j} = 1$, $P_{nj} = 0$, $n = \pm 1, \pm 2, \dots$, $j = \eta, r$. Let the intensity of the normal load be Q (Pa), and the intensity of the tangential load – $0.2Q$. Then $p_r^*(\xi) = -2Q \sin(\xi l_0) / \xi$, $p_\eta^*(\xi) = 0,4Q \sin(\xi l_0) / \xi$. If selected Q in such a way that the overall normal load throughout the length $2l_0$ of the load section is equal to an equivalent concentrated radial normal load of intensity $P^{\circ\circ}$ (N/m), i.e. $Q = P^{\circ\circ} / 2l_0$, obtain

$$p_r^*(\xi) = -P^{\circ\circ} \sin(\xi l_0) / (\xi l_0), \quad p_\eta^*(\xi) = 0,2P^{\circ\circ} \sin(\xi l_0) / (\xi l_0).$$

In **Figure 2** the curves of axial displacements $u_\eta^\circ = u_\eta \mu / P^\circ$ (m) and normal stresses $\sigma_{\eta\eta}^\circ = \sigma_{\eta\eta} / P^\circ$ (where $P^\circ = P^{\circ\circ} / \mu$, Pa) of the ground surface are shown in the $x\eta$ coordinate plane. The curves labeled 1 represent the unsupported tunnel, while the curves labeled 2 represent the tunnel reinforced with a thin-walled cast iron lining.

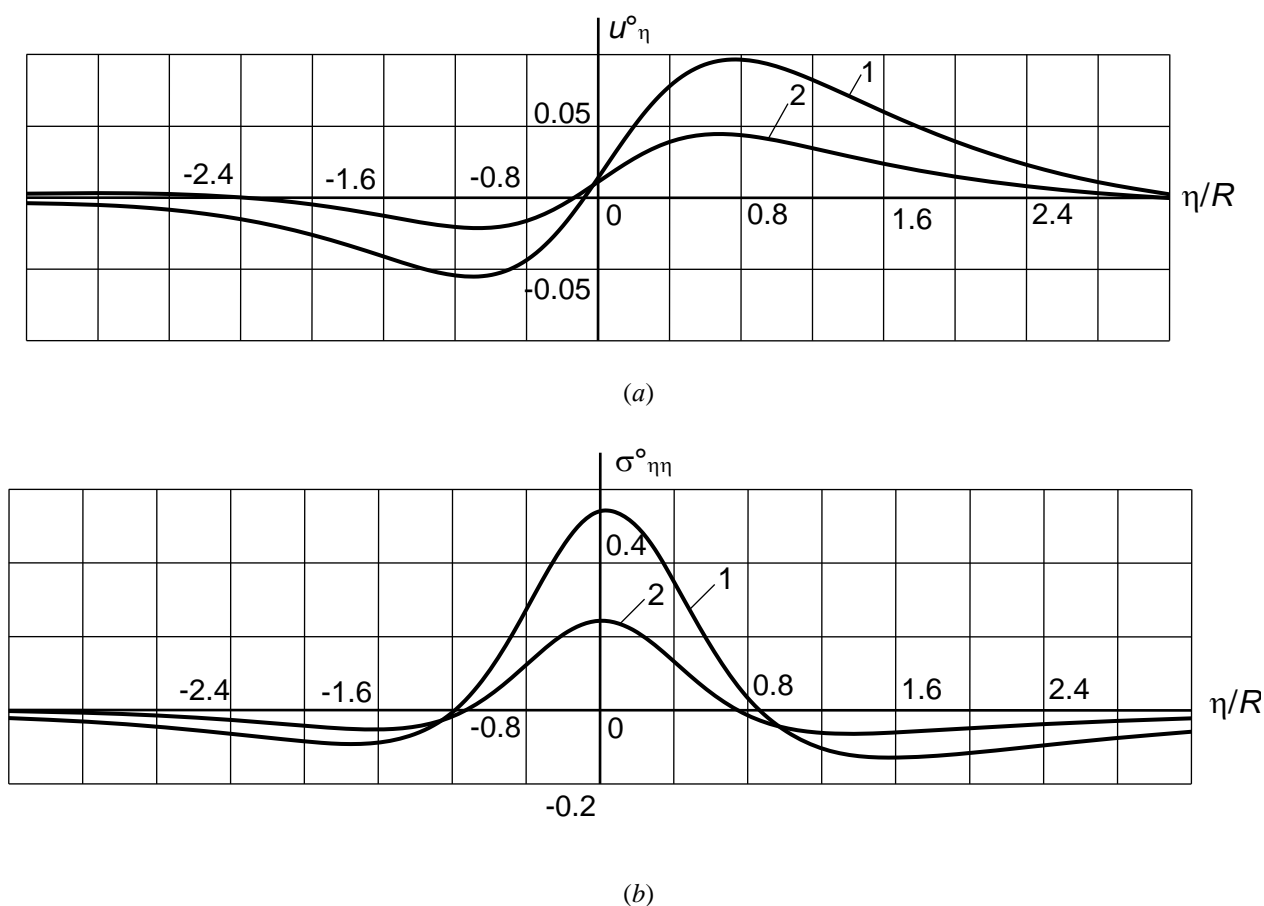


Figure 2 – Changes in axial displacements (a) and normal stresses (b) of the ground surface (authors' materials).

From the analysis of the behaviour of the curves, it follows that in the case of a tunnel reinforced with a cast iron lining extreme axial displacements u_{η} and normal stresses $\sigma_{\eta\eta}$ of the ground surface are significantly smaller in absolute magnitude than in the case of an unsupported tunnel. For any of the considered tunnels, when $\eta \approx 0$ displacement $u_{\eta}=0$, while the stresses $\sigma_{\eta\eta}$ have the maximum value. When $|\eta|$ increases, $|u_{\eta}|$ increase and reach the extreme values when $|\eta| \approx 0.7R$. Moreover, when $|\eta| \approx -0.7R$ $u_{\eta} < 0$, and when $|\eta| \approx 0.7R$ $u_{\eta} > 0$ and are almost 2 times the value of $|u_{\eta}|$, found when $\eta \approx -0.7R$. With a further increase in $|\eta|$ there is a damping effect on the displacement of the earth's surface, represented by $|u_{\eta}|$. As **Figure 2 (b)** shows in the interval $|\eta| \leq 0.8R$ there is a decrease in tensile stress $\sigma_{\eta\eta}$ from its maximum value to zero. With increasing in $|\eta|$, there is an increase in absolute value from zero to certain values of compressive stresses $\sigma_{\eta\eta}$ (smaller than the maximum stress $\sigma_{\eta\eta}$ occurring when $\eta \approx 0$) and their further decay.

The graphs obtained from mentally visualizing the deformation of the ground surface under the influence of these loads support this representation. As the numerical results of the study are unprecedented in the existing literature, no comparison with similar results is made here. The validity of these results is ensured by the correct formulation of the problem, the application of accurate mathematical methods of elasticity theory in its analytical solution, the rigor of the mathematical apparatus used, and the high degree of satisfaction of boundary conditions in the numerical realization of the set problem.

5 CONCLUSIONS

The model problem for an unsupported or supported circular cylindrical tunnel with a thin lining of shallow embedment under the action of transport loads, including normal and tangential

loads parallel to the tunnel axis has been solved. This action occurs when taking into account the frictional forces that arise when transport or other objects move through a tunnel.

In contrast to similar model problems for deep-buried transport tunnels, where the massif is typically represented as an elastic space, this model takes into account the impact of waves reflected by the ground surface and arising during the movement of loads on both the tunnel structure and the surrounding massif.

Computer programs developed from the obtained solution were used to conduct a numerical study on the influence of shallow tunnel lining on the SSS of the ground surface. The study involved the application of axisymmetric normal and tangential loads, uniformly distributed within a certain interval and moving at a constant speed. The analysis of the calculation results shows that the reinforcement of the tunnel with the lining leads to a significant reduction of the dynamic impact of the transport loads on the ground surface. The vibration of the ground surface, which can negatively affect the seismic resistance of nearby buildings and structures, depends on the physical and mechanical properties of the material and the thickness of the tunnel lining. Therefore, the choice of material and its thickness can reduce this effect. The obtained solution allows us to study the dynamics of a circular cylindrical tunnel at any depth of its embedment and various permissible speeds of transport loads.

REFERENCES

1. **Hrapov, V.G., Demeshko, E.A., & Naumov, S.N.** (1989). Tunnels and subways [Тоннели и метрополитены]. Transport: Moscow (In Russ.).
2. **Pozhuev, V.I., & Lvovskij, V.M.** (1976). Reaction of a cylindrical shell in an elastic medium to the action of a moving load [Реакция цилиндрической оболочки в упругой среде на действие подвижной нагрузки]. News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture [Izvestija Vuzov. Stroitel'stvo i Arhitektura], 2, 61–66 (In Russ.).
3. **Ukrainets, V.N.** (2006). Vlijanie obdelki tonnelja melkogo zalozhenija na NDS massiva porod pri dejstvii begushhej nagruzki [Influence of shallow tunnel lining on the rock mass SSS under the action of running load]. Bulletin of Eurasian National University [Vestnik Evrazijskogo Nacional'nogo Universiteta], 50(4), 126–132 (In Russ.).
4. **Yerzhanov, Zh.S. & Ajtaliev, Sh.M.** (1989). Dinamika tonnej i podzemnyh truboprovodov [The dynamics of tunnels and underground pipelines]. Nauka (In Russ.).
5. **Ajtaliev, Sh.M., Alekseeva, L.A., Dil'dabaev, Sh.M., & Zhanbyrbaev, N.B.** (1992). Metod granichnyh integral'nyh uravnenij v zadachah dinamiki uprugih mnogosvjaznyh tel [Method of boundary integral equations in problems of dynamics of elastic multilinked bodies]. Gylym (In Russ.).
6. **Ajtaliev, Sh.M.** (2004). Razvitie mehaniki podzemnyh i special'nyh sooruzhenij v Kazahstane za poslednie 40 let [Development of mechanics of underground and special constructions in Kazakhstan for the last 40 years]. Applied Mechanics, 40(10), 3–36 <https://doi.org/10.1007/s10778-004-0001-4>.
7. **Dashevskij, M.A.** (1971a). Izluchenie i otrazhenie uprugih voln podkrepljonnymi polostjami v sploshnoj uprugoj srede pri dvizhenii pul'sirujushhej nagruzki [Radiation and reflection of elastic waves by reinforced cavities in a continuous elastic medium under pulsating load motion]. In Issledovanija po dinamike sooruzhenij [Researches on dynamics of structures], CNIISK im. V.A. Kucherenko [Central Research Institute of Structural Engineering of V.A. Kucherenko] 17, 91–115. (In Russ.).
8. **Dashevskij, M.A.** (1971b). Izluchenie uprugih voln pri dvizhenii pul'sirujushhej nagruzki vdol' tonnelja, prolozhennogo v grunte [Elastic wave radiation when a pulsating load moves along a tunnel in the ground. Stroitel'naja Mehanika i Raschet Sooruzhenij [Construction Mechanics and Calculation of Structures], 5, 10–13 (In Russ.).

9. **Dashevskij, M.A.** (1974). Rasprostranenie voln pri kolebanijah tonnelej metro [Wave propagation during underground tunnel vibrations]. *Stroitel'naja Mehanika i Raschet Sooruzhenij* [Construction Mechanics and Calculation of Structures], 6, 29–34 (In Russ.).
10. **Dashevskij, M.A.** (1982). Prognoz dinamicheskikh vozdeystvij na sooruzhenija, raspolozhennyh vblizi trass metro [Forecast of dynamic impacts on structures located in the vicinity of metro routes]. *Stroitel'naja Mehanika i Raschet Sooruzhenij* [Construction Mechanics and Calculation of Structures], 4, 36–40 (In Russ.).
11. **Lvovsky, V.M., Onishchenko, V.I., & Pozhuev, V.I.** (1974). Ustanovivshiesja kolebanija cilindricheskoj obolochki v uprugoj srede pod dejstviem podvizhnoj nagruzki [Steady-state vibrations of a cylindrical shell in an elastic medium under the action of a moving load]. In *Voprosy prochnosti i plastichnosti* [Issues of strength and ductility], 98–110, (In Russ.).
12. **Pozhuev, V.I.** (1978). Dejstvie podvizhnoj nagruzki na cilindricheskiju obolochku v uprugoj srede [The action of a moving load on a cylindrical shell in an elastic medium]. *Stroitel'naja Mehanika i Raschet Sooruzhenij* [Construction Mechanics and Calculation of Structures], 1, 44–48 (In Russ.).
13. **Pozhuev, V.I.** (1980). Reakcija cilindricheskoj obolochki, nahodjashhejsja v transversal'no-izotropnoj srede, na dejstvie podvizhnoj nagruzki [Reaction of a cylindrical shell in a transversal-isotropic medium to the action of a mobile load]. *Prikladnaja Mehanika* [Applied Mechanics], 16(11), 28–35 (In Russ.).
14. **Ukrainets, V.N., & Girnis, S.R.** (2005). Zadacha o dejstvii neosesimmetrichnoj podvizhnoj nagruzki na podkrepljonnuju polost' v uprugom prostranstve [Problem about the action of a non-axisymmetric mobile load on a reinforced cavity in elastic space]. *Vestnik PGU. Serija Fiziko-Matamaticeskaja* [Bulletin of PSU. Physico-Mathematical Series], 4, 33–41 (In Russ.).
15. **Ukrainets, V.N., & Girnis, S.R.** (2006). Vlijanie obdelki na tolshhinu dinamicheski aktivnogo sloja massiva pri dejstvii dvizhushhejsja po zaglublennomu tonnelju neosesimmetrichnoj nagruzki [Influence of the lining on the thickness of the dynamically active layer of the massif under the action of a non-axisymmetric load moving along a buried tunnel]. *Vestnik PGU. Serija Fiziko-Matamaticeskaja* [Bulletin of PSU. Physico-Mathematical Series], 1, 95–103 (In Russ.).
16. **Girnis, S.R.** (2009). Vlijanie geometricheskikh parametrov obdelki na naprjazhjonno-deformirovannoe sostojanie zaglublennogo tonnelja [Influence of geometrical parameters of the lining on the stress-strain state of a buried tunnel]. *Vestnik BGU. Serija Himija, Fizika* [Bulletin of Buryat State University. Series Chemistry, Physics], 3, 132–139, <https://elibrary.ru/item.asp?id=11929303> (In Russ.).
17. **Alekseeva, L.A., & Ukrainets, V.N.** (2009). Dynamics of an elastic half-space with a reinforced cylindrical cavity under moving loads. *International Applied Mechanics*, 45(9), 981–990, <https://doi.org/10.1007/s10778-010-0238-z>.
18. **Novackij, V.** (1975). *Teorija uprugosti* [Theory of elasticity]. Mir (In Russ.).

UDC 624.138.2
IRSTI 67.13.21
REVIEW ARTICLE

INJECTION OF TWO-COMPONENT GEOPUR RESIN FOR STRENGTHENING SANDY SOILS

S.Zh. Jumadilova 

International Educational Corporation, Almaty,
050043, Kazakhstan

Abstract. *The article explores the use of GEOPUR, a two-component polyurethane resin, for strengthening sandy soils. It highlights the process of soil stabilization through high-pressure grouting, which improves water resistance, stabilizes soil structures, and enhances anchoring strength. The research investigates the application of this resin in consolidating weak, loose soils and its effect on their physical and mechanical properties. Laboratory experiments were conducted on sand samples to simulate real-world conditions, testing the resin's effectiveness in improving soil density, compressive strength, and overall stability. The study analyzes how the resin's expansion within the soil structure impacts soil behavior, concluding that the GEOPUR resin significantly enhances the soil's load-bearing capacity. Various parameters, such as the volume of injected resin, consolidation efficiency, and the strength-density relationship, are evaluated to provide practical recommendations for soil stabilization using this innovative material. The findings demonstrate the resin's potential in geotechnical applications, particularly in situations where traditional stabilization methods are not feasible or efficient. The article concludes with suggestions for optimizing the resin injection process to maximize its effectiveness in both laboratory and field conditions, making it a promising solution for future ground improvement projects.*

Keywords: *resins, polyurethane, injection, sand, resin fixation, sandy soils.*

***Corresponding author**

Saule Dzhumadilova, e-mail: saule_dzhumadilo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-07>

Received 10 May 2024; Revised 09 July 2024; Accepted 20 August 2024

ӘОЖ 624.138.2
FTAMP 67.13.21
ШОЛУ МАҚАЛАСЫ

ҚҰМ ТОПЫРАҚТАРДЫ НЫҒАЙТУҒА АРНАЛҒАН ЕКІ КОМПОНЕНТТІ GEOPUR ШАЙЫРЫ ИНЪЕКЦИЯСЫ

С.Ж. Джумадилова 

Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы,
050043, Қазақстан

Аңдатпа. Мақалада құмды топырақты нығайту үшін GEOPUR екі компонентті полиуретанды шайырын қолдану зерттеледі. Бұл мақалада топырақты тұрақтандыру процесі жоғары қысымды цементациялау арқылы жүзеге асатыны, суға төзімділікті жақсартатыны, топырақ құрылымын тұрақтандыратыны және бекіту күшін арттыратыны атап өтіледі. Зерттеу осы шайырды әлсіз және бос топырақты бекітуге қолдануды және оның физикалық және механикалық қасиеттеріне әсерін қарастырады. Шайырдың топырақ тығыздығын, сығылу беріктігін және жалпы тұрақтылығын арттырудағы тиімділігін тексеру үшін зертханалық эксперименттер нақты жағдайларды модельдеу арқылы құм үлгілерінде жүргізілді. Зерттеуде шайырдың топырақ құрылымында кеңеюі топырақ сипаттамасына әсері талданады және GEOPUR шайыры топырақтың жүк көтергіш қабілетін айтарлықтай арттыруы туралы қорытынды жасалады. Инъекцияланған шайырдың көлемі, консолидация тиімділігі және беріктік пен тығыздық арасындағы қатынас сияқты әртүрлі параметрлер топырақты тұрақтандырудың практикалық көрсеткіштерін ұсыну үшін бағаланады. Зерттеу нәтижелері шайырдың дәстүрлі тұрақтандыру әдістері тиімсіз немесе мүмкін болмайтын жағдайлардағы геотехникалық мәселелердің әлеуетін көрсетеді. Мақалада жоғары тиімділікті зертханалық және далалық жағдайларда шайыр инъекциясы процесін оңтайландыру бойынша ұсыныстар келтірілген. Аталған әдіс топырақтарды жақсартудағы болашақ жобалар үшін перспективті шешім болып табылады.

Түйін сөздер: шайырлар, полиуретан, инъекция, құм, шайыр бекіту, құмды топырақ.

***Автор-корреспондент**

Сауле Джумадилова, e-mail: saule_dzhumadilo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-07>

Алында 10 мамыр 2024; Қайта қаралды 09 шілде 2024; Қабылданды 20 тамыз 2024

УДК 624.138.2
МРНТИ 67.13.21
ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

ИНЪЕЦИРОВАНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СМОЛОЙ GEOPUR ПРИ УКРЕПЛЕНИИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

С.Ж. Джумадилова 

Международная образовательная корпорация, Алматы,
050043, Казахстан

Аннотация. В статье рассматривается использование двухкомпонентной полиуретановой смолы GEOPUR для укрепления песчаных грунтов. Особое внимание уделяется процессу стабилизации грунта посредством высоконапорного цементационного нагнетания, которое улучшает водонепроницаемость, стабилизирует структуру грунта и повышает прочность анкеровки. Исследование изучает применение этой смолы для консолидации слабых и рыхлых грунтов и ее влияние на их физические и механические свойства. Лабораторные эксперименты проводились на образцах песка, чтобы смоделировать реальные условия, и проверялась эффективность смолы в повышении плотности грунта, его прочности на сжатие и общей стабильности. В исследовании анализируется, как расширение смолы в структуре грунта влияет на его поведение, и делается вывод, что смола GEOPUR значительно увеличивает несущую способность грунта. Оцениваются различные параметры, такие как объем инъецируемой смолы, эффективность консолидации и взаимосвязь между прочностью и плотностью, чтобы дать практические рекомендации по стабилизации грунта с использованием этого инновационного материала. Полученные результаты демонстрируют потенциал применения смолы в геотехнических задачах, особенно в случаях, когда традиционные методы стабилизации грунта не являются эффективными или целесообразными. В статье даются предложения по оптимизации процесса инъекции смолы для максимальной эффективности как в лабораторных, так и в полевых условиях, что делает этот метод перспективным решением для будущих проектов по улучшению грунтов.

Ключевые слова: смолы, полиуретан, инъекция, песок, закрепление смолы, песчаные грунты.

*Автор-корреспондент

Сауле Джумадилова, e-mail: saule_dzhumadilo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-07>

Поступило 10 мая 2024; Пересмотрено 09 июля 2024; Принято 20 августа 2024

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС/ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 INTRODUCTION

The stabilization of sandy soils is a major problem in geotechnical engineering, especially in construction projects where soil consolidation and strength are key to ensuring the stability of the foundation. Traditional methods of soil stabilization, although effective, often face problems related to cost, efficiency and environmental impact. In response to these challenges, the use of innovative materials such as two-component polyurethane resins has become a promising solution to improve the physical and mechanical properties of weak soils.

GEPUR Technologies offers a two-component polyurethane resin system designed for injection under high pressure into soils in order to increase their bearing capacity and water resistance. This method has gained popularity due to its ability to penetrate loose soils and fill voids, which leads to an improvement in the structure of the soil and an increase in its stability. When resin is injected into sandy soils, voids and cracks are filled, thereby increasing the overall density and strength of the soil, providing a reliable solution for stabilizing the foundation.

This article discusses the use of GEOPUR resin to stabilize sandy soils, with an emphasis on its effectiveness in improving soil properties such as density, compressive strength and water resistance. Laboratory tests conducted on sand samples demonstrate the resin's ability to improve soil performance under difficult conditions. The study also provides practical recommendations for optimizing the resin injection process, making it a valuable tool for future soil improvement projects.

2 LITERATURE REVIEW

The utilization of polyurethane expanding resins for foundation stabilization and soil improvement has gained significant attention in recent years due to its efficiency and non-invasiveness. Apuani et al. (2015) introduced a method of strengthening settled foundations by injecting polyurethane expanding resins. They combined traditional geotechnical tests with a non-invasive geophysical technique, Electrical Resistivity Tomography (ERT), which provides accurate 3D images of the soil before, during, and after the injection process. This technique enables real-time monitoring of soil consolidation and ensures the effectiveness of the injection process. Similarly, Fischanger et al. (2015) investigated the potential of ERT in evaluating improvements in the mechanical properties of treated sands, specifically those prone to liquefaction. Their study demonstrated the value of ERT in monitoring soil compaction and consolidation by analyzing resistivity changes. (Apuani et al., 2015), (Fischanger et al., 2015).

The use of polyurethane resin has also been explored in the context of the pultrusion process for injecting thermoset resin. Sandberg et al. (2021) analyzed non-isothermal flow during the pultrusion process and found that heating configurations and convective flows led to unique phase transitions not previously described in literature. This suggests that the behavior of polyurethane resin under different conditions can vary significantly, affecting its mechanical properties (Sandberg et al., 2021).

Sabri and Shashkin (2020) conducted laboratory experiments to examine the mechanical properties of polyurethane resin, particularly how its density, influenced by expansion during the injection process, affects stabilization efficiency. The study showed a direct relationship between the resin's density and its strength, highlighting the importance of understanding the resin's behavior during expansion (Sabri & Shashkin, 2020).

Recent studies have also investigated the long-term performance and practical applications of polyurethane injections in foundation repair. Dominijanni et al. (2022) presented case studies demonstrating the effectiveness of resin injections in improving soil stiffness and shear strength. Their findings emphasized the importance of estimating horizontal stress and volumetric strain changes near injection sites. Furthermore, the research by Miranda et al. (2023) on closed-cell expansive polyurethane resin in sand masses revealed that this material behaves like soft rock with high shear strength, making it a promising tool for ground improvement (Dominijanni et al., 2022; Miranda et al., 2023).

Dirgėlienė and Kordušas (2024) reviewed the properties, applications, and limitations of polyurethane resin injection for soil stabilization, noting its efficiency in preventing settlement and enhancing load-bearing capacity. However, they also highlighted challenges such as achieving uniform resin distribution and accurately estimating injection parameters. Despite these challenges, the use of polyurethane resins continues to grow, offering a reliable solution for foundation stabilization and structural reinforcement in geotechnical engineering (Dirgėlienė & Kordušas, 2024).

3 MATERIALS AND METHODS

GEOPUR technologies products are based on the high-pressure grouting technique with the two-component GEOPUR polyurethane material from GME.

The result of this technology is a triple effect: (1) improving water resistance and sealing - stopping or reducing water inflow into underground structures; (2) stabilizing soil grouting - increasing the stability of the foundations of buildings and underground structures; (3) soil, rocks and structures are structured and strengthened.

Application of GEOPUR technology allows to fill voids and cracks in the rock by injection of polyurethane resin, as well as to reduce the porosity of macroporous soils by filling the pores with cementitious material (Golovanov, 2013).

The application possibilities of GEOPUR material tend to be used in various fields: Underground construction and tunneling involve activities such as filling depressions and voids, protecting structures when crossing fault zones, stabilizing loose material in open-pit mines, securing cavities during tunneling, improving the mechanical properties of rock masses, sealing and preventing water inflow, anchoring ground and rock, and strengthening overburden rock. Self-tapping micropiles and anchors are used for insertion into the soil.

Cementitious self-tapping micro-piles and anchors are made by drilling into threaded reinforced steel rods and then cemented with a polyurethane or cement mixture. Micro-piles are installed in the ground, on rock, and in building structures.

The main element of the anchor / micro-pile is an adjustable steel anchor (IBO type anchor rod) with thread (4). The units include: hexagonal nuts (1), washer under the anchor rod with even load distribution (2), couplings (3), cross drill head (5), clamping and adjustable couplings (6). Part of the system is also an adapter for connection to the rod by drilling equipment (Sabri & Shashkin, 2020). The grouting system adapter is used for connection to the grouting equipment.

The anchor rods can be adjusted by means of couplings to the desired length up to a maximum of 15 m. The anchors are manufactured as temporary or stationary anchors (Sabri & Shashkin, 2020).

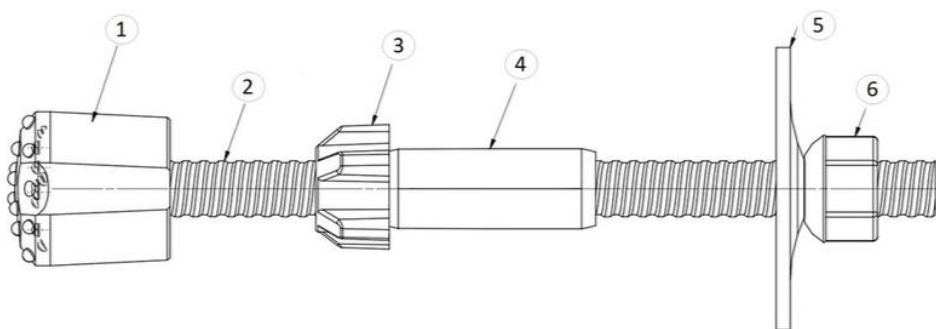


Figure 1 – Schematic diagram of the anchor (Ground anchors, 2023)

As shown in Figure 1, the IBO anchor rod has three functions: first, it functions as a drill pipe to achieve the required depth; secondly, it acts as a channel for the injection of cement through its hollow core; and thirdly, after the cement hardens, it acts as an anchor or micropile. Table 1 shows the technical specifications of the anchor rods that are in use. The following types of anchor rods are currently in use.

Table 1

Technical characteristics of anchor rods

Type anchor / micropile	R25	R32N	R32S	R38	R51	R76
Outer / inner diameter, mm	25 / 14	32 / 18,5	32 / 15	38 / 12	51 / 12	76 / 12
Maximum load, kN	200	280	360	500	550	1600
Weight, kg/m	2,3	3,4	4,2	6,0	7,0	8,4
Dimensions of the coupling sleeve, mm: width / length	35 / 150	40 / 160	40 / 160	50 / 220	63 / 200	95 / 220

Self-tapping anchors and micropiles offer several advantages, including suitability for use in difficult geological conditions (e.g., shifting sands, water-bearing sands and gravel), as well as in confined spaces (under technological installations, on ceilings, and in narrow areas), high mobility of technology, and the ability to apply full load on the anchors or micropiles within 1 hour to 1 day after the completion of cementing work when using cement mortar with polyurethane (Sabri et al., 2021).

3.1 METHODOLOGY OF LABORATORY TESTS

Table 2

Program of laboratory tests

Type of soil	Condition or the soil type to be consolidated	Component composition		Defined parameters			
		A	B	Physical		Mechanical	
				Density, t/m ³	Prim	Compressive strength, MPa	Modulus of deformation pressure, MPa
Sand	Medium coarse	1	1,7	+		+	+

Note: the number of tested samples is not less than 6 pcs.

For laboratory tests, samples of sandy type of soil were prepared according to the test program **Table 2**. A cylinder made of high-strength plastic pipe with dimensions of height from 35cm to 50cm and diameter of 20cm-40cm was used for sample preparation, below is a picture.

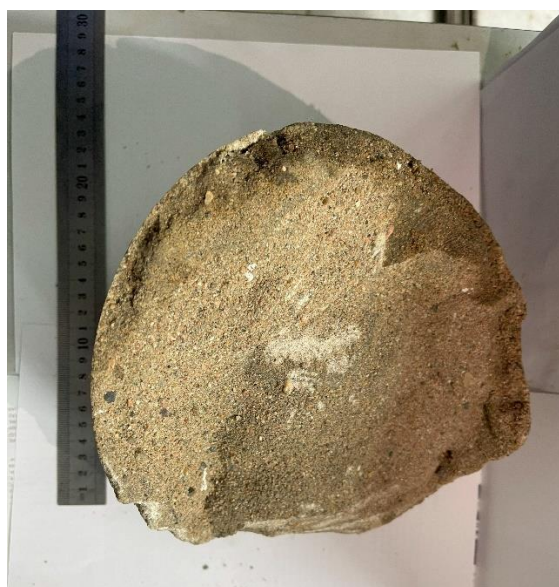


Figure 2 – Sandy sample in cylindrical shape (author's material).

The method of laboratory research was as follows: the pipe was filled with a type of soil of given moisture and density (Usmanov, 2014). The end walls of the pipe were grouted with reinforced mortar of M100 grade. A hole was drilled in the pipe wall and a "packer" R8 device was installed for injection of the mixture component according to the test program. By means of a special plunger-type pump and equipment that allows dosing individual components in the volume ratio of 1:1.1 two-component polyurethane resin (Geopur brand 082/90) under pressure by means of the pump was injected into the specimen until complete failure (Fischanger, 2015). Failure was defined as the state when the mixture escaped through the gaps in the end faces of the cover or back through the packer (Kondratov, 2005).

GEOPUR material can be applied in various geological and technical works, including the stabilization of slopes, embankments, and surface mines, anchoring supporting walls, constructing underground barriers with low permeability, stabilizing unconsolidated soil, sealing temperature joints, designing micro-pile foundations, and stabilizing landslides.

GEOPUR, a cementitious material, offers a wide range of applications in civil engineering, including strengthening foundation soil (even below the water table), ensuring the stability of structures threatened by mining or construction activities, reinforcing brick or stone masonry, restoring thermal insulation, sealing utility inlet openings, caulking, stopping water inflow, constructing building foundations, sealing and anchoring construction pit walls (including under the water table), improving soil conditions before construction, and installing micro-piles in soils with low bearing capacity

GEOPUR polyurethane material consists of components A and B: (1) Composition of component A - the color of liquid honey; a mixture of simple polyether polyol, accelerating additives, flammability-reducing admixtures, foam stabilizers and water; (2) Composition of component B is a dark brown to yellow colored liquid (all species); polymethylene polyphenylene isocyanates, defenylmethane-4, 4, 4-diisocyanate, diphensthetamine-4, 4-diisocyanate (MDI) and a mixture of polycyclic oligomers depending on function.

After mixing the two basic components in this ratio, the polyurethane resin is formed by an exothermic reaction.

After injection, the specimens were allowed to stand for 24 hours, for foam formation and consolidation with the soil. The next step was to remove the samples from the cylinders and separate the consolidated mass from the unconfined mass (Figure 2, 3). Special measurements, mass and volume calculations were carried out to determine the volumes of the consolidated soil (Apuni et al., 2015).



Figure 3 – Example of sand consolidation with two-component resin in laboratory conditions (author's material).

Then from the hardened mass samples of rectangular or circular shape up to 10 cm high are cut out, which were tested on a hydraulic test press C055 with a capacity of 2000 kN MATEST company on the scheme of loading statically increasing load (Figure 4).

Designed for testing cylindrical specimens up to 160 mm in diameter and 320 mm in height, as well as concrete cubes with sides of 150 and 100 mm.

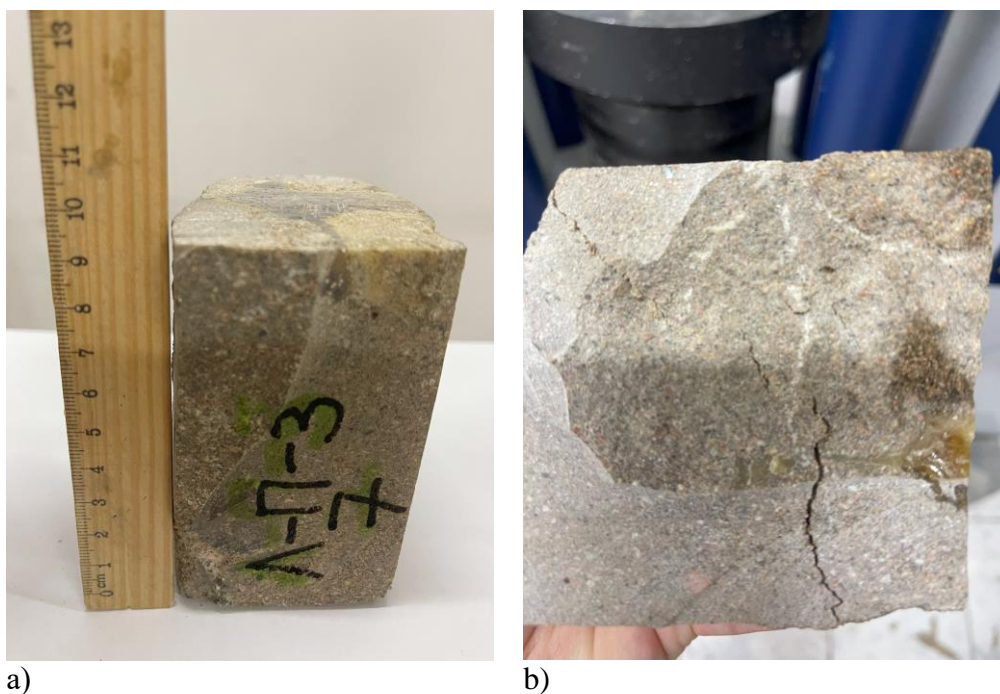


Figure 4 – Tests of sand specimens: a) at the moment of testing and b) after testing them in compression (author's material).

4 RESULTS AND DISCUSSION

Below there are two tables in which the samples were divided into 3 groups for further testing. **Table 3** shows parameters such as soil condition, density, initial volume, injection volume, consolidated soil volume and flow rate.

Table 3

Results of hardening of arrays with GEOPUR resin (laboratory tests)

Soil type	№ sample	Ground condition	p-density, t/m ³	Initial volume, m ³	Injection volume, kg	Volume of hardened soil, m ³	Percentage of consumption kg/m ³
Sand	L-P-1	compacted	1,798	0,06	1	0,01	100,00
	L-P-2	compacted	1,721	0,05	0,47	0,0042	111,90
	L-P-3	loose	1,59	0,06	0,417	0,0052	80,19

Table 4 shows the geometric parameters, maximum compressive load on the press, tensile strength, stability and flow rate.

Table 4
Compression test results of sand samples

Sample designation	Height, cm	Width, cm	Length, cm	Weight, kg	Maximum load, F (kN)	Tensile strength, Rc, (MPa)	Density, p (kg/m ³)	Note
L-P-1,6	8,9	5	6	0,548	120,476	40,159	2052,43	group 1
L-P-1,3	8	6	8	0,76	152,818	31,837	1979,16	
L-P-3,6	9,2	5,3	5,5	0,516	78,668	26,987	1924,08	
L-P-1,4	8,5	7,2	7,2	0,934	133,698	25,791	2119,64	
L-P-3,2	9	5	6,15	0,566	74,15	24,114	2045,16	
L-P-3,1	9,6	5,3	5,8	0,548	60,547	19,696	1856,97	group 2
L-P-3,4	8,2	5	6,3	0,542	56,226	17,850	2098,33	
L-P-1,1	9,2	6,1	7	0,874	75,675	17,722	2224,82	
L-P-1,5	10	6,6	9	1,306	104,78	17,640	2198,65	
L-P-3,7	10	6,3	7,1	0,766	72,105	16,120	1712,49	
L-P-3,3	9,1	5,6	6	0,502	53,793	16,010	1641,81	group 3
L-P-2,2	10	6,7	9,3	1,024	49,275	7,908	1643,39	
L-P-2,1	8,8	8,7	8,7	1,216	49,227	6,504	1825,62	
L-P-3,5	9,7	6	7,6	0,614	26,825	5,883	1388,13	
L-P-1,2	9,7	6	6	0,75	17,36	4,822	2147,76	
L-P-2,4	10,1	5,3	5,5	0,45	13,42	4,604	1528,45	
L-P-2,3	10	6	5,5	0,37	14,364	4,353	1121,21	

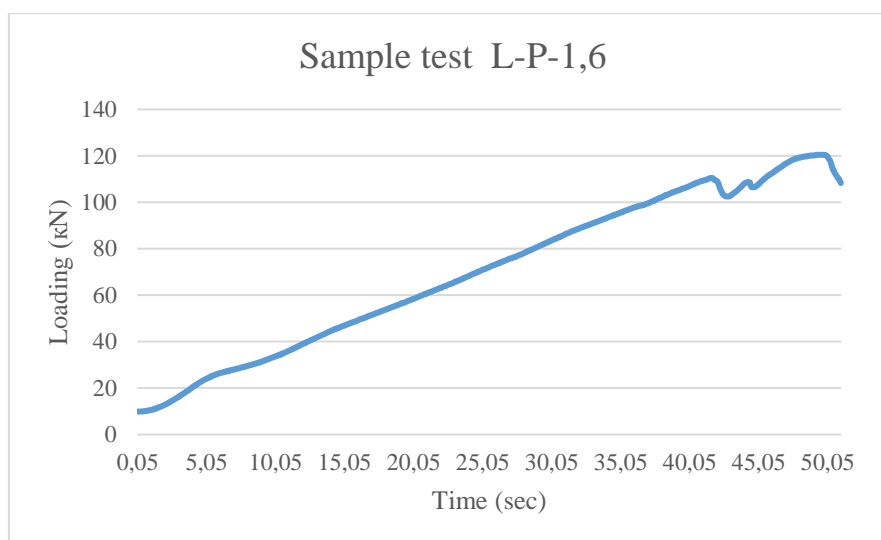


Figure 5 – Results of strengthening arrays with GEOPUR resin

As can be seen in **Figure 5**, the load gradually increases from 0 to approximately 80 kN during the first 10 seconds. This indicates that the material is undergoing a uniform loading phase, which is likely indicative of elastic properties where the sample deforms along a line in response to an applied load. From about 10 to 35 seconds, the load continues to increase, but more slowly. Between approximately 35 and 45 seconds the load peaks at around 135 kN. After the peak (about 45 seconds), the load decreases slightly, indicating potential failure or damage to the material. This means that the sample has exceeded its tensile strength and is beginning to fail.

5 CONCLUSIONS

1. The use of resin in weak loose soils significantly improves the dynamic properties of the soil. Application of resin technology is effective for consolidation of weak loose soils.

2. The samples were divided into 3 groups; 1 compacted sand ($p=1.798 \text{ t/m}^3$), 2 compacted sand ($p=1.721 \text{ t/m}^3$), 3 group loose sand ($p=1.59 \text{ t/m}^3$). Group 1 and 2 compacted sand, group 3 with loose sand. In 1 sample 1 kg of resin was injected, in 2 0.47 kg, in 3 0.417 kg. The volume of hardened soil amounted to 0.01 m^3 in group 1, 0.0042 m^3 in group 2, 0.0052 in group 3.

3. During the test on the hydraulic press MATEST C055 were obtained values of the tensile strength of each sample. The average value of tensile strength in the compacted samples of group 1 29.78 MPa, in the second group 17.51 MPa, in group 3 with loose sand 5.68 MPa

4. Based on the test results, it can be concluded that the use of polyurethane resin in weak loose soils will improve the bearing capacity of the soil.

REFERENCES

1. **Golovanov, A.M., Pashkov, V.I., Revo, G.A., Pashkov, D.V., Nerchinsky, O.V., Turenko, R.I.** (2013) Experience of fixing structurally unstable soils by cementation. [Opyt zakrepleniya strukturno-neustojchivyh gruntov cementaciej] Vestnik MGSU, 8, 59-67. <https://clck.ru/3DPjq2> (In Russ.).
2. **Sabri, M.M., Shashkin, K. G., Zakharin, E., Ulybin, A.** (2018b). Soil stabilization and foundation restoration using an expandable polyurethane resin. Magazine of Civil Engineering, 82(6). <https://clck.ru/3DPjtB>
3. **Sabri, M.M., & Shashkin, K.G.** (2018). Improvement of the soil deformation modulus using an expandable polyurethane resin. Magazine of Civil Engineering, 7(83), 222–234. <https://clck.ru/3DPjva>
4. **Usmanov, R., Vatin, N., Murgul, V.** (2014). Experimental research of a highly compacted soil beds. Applied Mechanics and Materials, 633-634, 1082–1085. <https://clck.ru/3DPjxn>
5. **Fischanger, F., D'Attoli, M., Morelli, G., & Occhi, M.** (2015). Use of resistivity to estimate porosity variations in loose sands after compaction by resins injection treatments. Near Surface Geoscience 2015 - 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. <https://clck.ru/3DPjz9>
6. **Kondratov, A. B.** (2005). Resin-injection soil stabilization techniques used in underground construction carried on in big cities in Russia. Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future [Tekhnologii stabilizacii grunta putem in"ekcii smoly, primenyaemye pri podzemnom stroitel'stve, prodolzhayut primenyat'sya v krupnyh gorodah Rossii] - Proceedings of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress, 2. <https://clck.ru/3DPk33> (In Russ.).
7. **Sabri, M.M.S., Vatin, N.I., & Alsaffar, K.A.M.** (2021). Soil injection technology using an expandable polyurethane resin: A review. In Polymers, 13 (21). <https://doi.org/10.3390/polym13213666>
8. **Sabri, M.M., & Shashkin, K.G.** (2020). The mechanical properties of the expandable polyurethane resin based on its volumetric expansion nature. Magazine of Civil Engineering, 98(6). <https://doi.org/10.18720/MCE.98.11>
9. **Apuani, G.P. Giani, M. d'Attoli, F. Fischanger, G. Morelli, G. Ranieri, G. Santarato** (2015) Assessment of the Efficiency of Consolidation Treatment through Injections of Expanding Resins by Geotechnical Tests and 3D Electrical Resistivity Tomography. Scientific World Journal. <https://doi.org/10.1155/2015/237930>
10. **Dirgėlienė, N., Kordušas, (2024).** Stabilization of Soil Using Polyurethane Resin Injection Technology. Lecture Notes in Civil Engineering. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44603-0_62

11. **Dominijanni, A. Gabassi, A. Minardi, S. Pavan,** (2022) The use of dynamic probing tests and cone penetration tests to verify the effectiveness of expanding polyurethane resin injections for ground improvement. Cone Penetration Testing - Proceedings of the 5th International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003308829-135>
12. **Fischanger, F., Attoli M.D, Morelli G., Occhi M.,** (2015). Use of resistivity to estimate porosity variations in loose sands after compaction by resins injection treatments. Near Surface Geo-science 2015 - 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201413790>
13. **Hassona, F., Hakeem, B. M.** (2024). Numerical investigation of the carrying capacity of single polyurethane foam pile in clay and sand soils. Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture. T. 15. № 2. <https://doi.org/10.1007/s43995-023-00043-z>
14. **Miranda, L. Caldeira, L., Serra, J. B. Gomes, R. C.** (2023). Geotechnical characterization of a novel material obtained by injecting a closed cell expansive polyurethane resin into a sand mass. Transportation Geotechnics. T. 42. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101051>
15. **Safan, M.A., Etman, Z.A., Konswa, A.** (2019). Evaluation of polyurethane resin injection for concrete leak repair. Case Studies in Construction Materials. T. 11. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00307>
16. **Escolano Sánchez, F., Mazariegos de la Serna, A., Ramón Sánchez Lavín, J., & María del Campo Yagüe, J.** (2017). Underpinning of shallow foundations by expansive polyurethane resin injections. Case study: Cardinal Diego de Espinosa Palace in Segovia (Spain). Revista de la Construcción. T. 16. № 3. <https://doi.org/10.7764/RDLC.16.3.420>
17. **Sandberg, M. Yuksel, O. Baran, I. Hattel, J. H. Spangenberg, J.** (2021). Numerical and experimental analysis of resin-flow, heat-transfer, and cure in a resin-injection pultrusion process. Compos Part A Appl Sci Manuf. T. 143. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106231>
18. **Ground anchors.** (2023). [Gruntovye ankery] Retrieved from: <https://vinto-svai.ru/> (In Russ.).

UDC 699.841
IRSTI 67.03.03
RESEARCH ARTICLE

CALCULATION OF FLAT SHELLS BY THE BOUNDARY ELEMENT METHOD

B.K. Duissenbekov , B.T. Erimbetov , B.M. Chalabaev ,
Ya.B. Kunanbayeva , F.Kh. Aubakirova 

M. Auezov South Kazakhstan University, 160012,
Shymkent, Kazakhstan

Abstract. *This article describes the iterative process of solving the problem of the stress-strain state of a long flexible cylindrical panel. Stress-strain state and the study of the stability of flat shells taking into account the physical, mechanical properties of the material, the process of deformation change. It is based on sequential approximation methods and the boundary element method (MGE). The results of algorithmic weighting are presented in the form of a table showing what value each band represents. The equations are determined by solving twelve unknown values of functions at the ends of the segment. Linear problems of elasticity theory and plate theory fundamental solutions have a simple form, so the method is widely used here. For flat shells, the matrix of fundamental solutions is determined by complex volumetric expressions, and for flat shells - by special functions. Therefore, there is little research on solving problems in the theory of flat shells by the boundary element method. In this regard, an urgent topic of research is the development of methods of boundary integral equations for solving linear and nonlinear problems in the theory of flat shells based on the application of fundamental solutions defined by simple analytical expressions. The scientific novelty of the work consists in the development of a methodology for assessing the reliability of thin-walled spatial structures using the boundary element method.*

Keywords: *cylindrical panel, stress-strain state, shell, stiffness, integral, boundary conditions, algorithm.*


***Corresponding author**
YairakhanKunanbayeva, e-mail: aira.kunaeva@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-08>

Received 16 January 2024; Revised 27 February 2024; Accepted 26 June 2024

ӘОЖ 699.841
ҒТАМР 67.03.03
ҒЫЛЫМИ МАҚАЛА

ШЕКАРАЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕР ӘДІСІМЕН ДОҒАЛ ҚАБЫҚШАЛАРДЫ ЕСЕПТЕУ

Б.К. Дуйсенбеков , Б.Т. Ерімбетов , Б.М. Чалабаев ,
Я.Б. Құнанбаева , Ф.Х.Аубакирова 

М. Өуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160012, Шымкент, Қазақстан

Андатпа. Бұл мақалада ұзын иілгіш цилиндрлік панельдің кернеулі-деформацияланған күйінің есебін шешудің итерациялық процесі баяндалады. Кернеулі деформативтік күйі және материалдың физикалық, механикалық қасиеттерін, деформацияның өзгеру процесін ескере отырып, доғал қабықшалардың орнықтылығын зерттеу. Дәйекті жуықтау әдістері мен шекаралық элементтер әдісіне (ШЭӘ) негізделген. Алгоритмдік есептеу нәтижелері кесте түрінде көрсетіліп, әр жолақтың қандай мәнді білдіретінін көрсетілген. Теңдеулер, сегменттің ұштарындағы функциялардың он екі белгісіз мәндерін шешу арқылы анықталады. Серпімділік теориясының және пластиналар теориясының сызықтық есептер фундаменталдық шешімдер қарапайым формаға ие, сондықтан бұл жерде әдіс кеңінен қолданылады. Доғал қабықшалар үшін фундаменталдық шешімдердің матрицасы күрделі көлемді өрнектермен анықталады, ал доғал сфералық қабық үшін арнайы функциялар арқылы өрнектеледі. Сондықтан доғал қабықшалар теориясындағы есептерді шекаралық элементтер әдісімен шешуге арналған зерттеулер аз. Осыған байланысты қарапайым аналитикалық өрнектермен анықталатын фундаменталдық шешімдерді қолдану негізінде доғал қабықшалар теориясындағы сызықтық және сызықтық емес есептерді шешуге арналған шекаралық интегралдық теңдеулердің әдістерін жасау зерттеудің өзекті тақырыбы болып табылады. Жұмыстың ғылыми жаңалығы – шекаралық элементтер әдісін қолдана отырып, жұқа қабыршақты кеңістікті конструкциялардың сенімділігін бағалау әдістемесін әзірлеу.

Түйін сөздер: цилиндрлік панель, кернеулі-деформацияланған күй, қабықша, қатаңдылық, интеграл, шекаралық шарттар, алгоритм.

*Автор-корреспондент




Яйрахан Құнанбаева, e-mail: aira.kunaeva@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-08>

Алынды 16 қаңтар 2024; Қайта қаралды 27 ақпан 2024; Қабылданды 26 маусым 2024

УДК 699.841
МРНТИ 67.03.03
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

РАСЧЕТ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Б.К. Дуйсенбеков , Б.Т. Еримбетов , Б.М. Чалабаев ,
Я.Б. Кунанбаева , Ф.Х.Аубакирова 

Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова,
160012, Шымкент, Казахстан

Аннотация. В этой статье описывается итерационный процесс решения задачи напряженно-деформированного состояния длинной гибкой цилиндрической панели. Напряженно-деформированное состояние и исследование устойчивости пологих оболочек с учетом физических, механических свойств материала, процесса изменения деформации. Основан на методах последовательного приближения и методе граничных элементов (МГЭ). Результаты алгоритмического взвешивания представлены в виде таблицы, показывающей, какое значение представляет каждая полоса. Уравнения определяются путем решения двенадцати неизвестных значений функций на концах отрезка. Линейные задачи теории упругости и теории пластин фундаментальные решения имеют простую форму, поэтому метод здесь широко используется. Для пологих оболочек матрица фундаментальных решений определяется сложными объемными выражениями, а для пологих – специальными функциями. Поэтому мало исследований по решению задач в теории пологих оболочек методом граничных элементов. В связи с этим актуальной темой исследования является разработка методов граничных интегральных уравнений для решения линейных и нелинейных задач в теории пологих оболочек на основе применения фундаментальных решений, определяемых простыми аналитическими выражениями. Научная новизна работы заключается в разработке методики оценки надежности тонкостенных пространственных конструкций с использованием метода граничных элементов.

Ключевые слова: цилиндрическая панель, напряженно-деформированное состояние, оболочка, жесткость, интеграл, граничные условия, алгоритм.

*Автор-корреспондент
Яйрахан Кунанбаева, e-mail: aira.kunaeva@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-08>

Поступила 16 января 2024 г.; Пересмотрено 27 февраля 2023 г.; Принято 26 июня 2024 г.

ACKNOWLEDGEMENTS / SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС / ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 КІРІСПЕ

Практиканың қажеттілігіне байланысты қабықшалар мен пластиналар теориясының қарқынды дамуы байқалады (**Zhangabay & Tursunkululy, 2023, 2022**). Жұқа қабырғалы құрылымдарды есептеуге байланысты мәселелер қазіргі заманғы өнеркәсіптің көптеген салаларында, соның ішінде авиацияда, ракеталық ғылымда, кеме жасауда, химия техникасында, құрылыста және т.б. қолданыс табуда. Осыған байланысты жұқа қабырғалы конструкциялар теориясының негізгі міндеттерінің бірі әртүрлі жүктемелер әсер ету кезіндегі қалыңдығының өзгеруі, тесіктердің, кірмелердің, қабаттардың, арматураның қабырғаларының әртүрлі заңдылықтары бар күрделі пішінді тақталар мен қабықтарды есептеу және жобалау әдістерін жетілдіру болып табылады.

Бұл жұмыстың мақсаты материалдың физико-механикалық қасиеттерін ескере және сандық есептеу әдістерін қолдана отырып, ҚДК-і нақтылау негізінде оң Гаусс қисығының доғал темірбетон қабықтарын есептеудің жаңа әдісін бағалау болып табылады.

Доғал қабықшаларды есептеу әдістеріне зерттеу нәтижелерін (**Beglov & Maksimiyuk, 2011, 2013**) талдай отырып, белгілі бір функционалдардың стационарлық күштерін қалыптастыруға негізделген вариациялық принциптерді тікелей қолдану қажет екені анықталды. Сайып келгенде, тиісті Вариациялық есептер үшін Эйлер-Остроградский теңдеулері ретінде қарастыруға болатын дифференциалдық теңдеулерді (қарапайым немесе жеке туындыларды) шешуге негізделген.

Сонымен қатар, белгілі бір Вариациялық тапсырманың (**Mityakina, 2014**) стационарлық жағдайларын қамтамасыз ететін шешімдерді құру идеясына негізделген Вариациялық есептерді шешудің тікелей әдістері ұсынылды.

Осы мақалада ұзын иілгіш цилиндрлік панельдің кернеулі-деформацияланған күйінің есебін шешудің итерациялық процесі баяндалады. Дәйекті жуықтау әдістері мен ШЭӨ-не негізделген. ШЭӨ үшін негізгі шешім ретінде тұрақты қалыңдықтағы ұзын пластина үшін шешім қолданылады. Панельдің негізгі шешімінен гөрі қарапайым құрылымы бар элементтер пайдаланылады. Екі өлшемді тапсырмалар үшін итерация процесі (**Ledenev, 2016**) жұмысында көрсетілген. Итерацияларда сызықтық есептерді шешу үшін қолданылатын ШЭӨ қатынасы өлшенген тепе-теңдік әдісімен алынады.

2 ӘДЕБИЕТКЕ ШОЛУ

Неғұрлым кеңінен қолданылатын вариациялық әдістері қарастырайық.

Ритц Әдісі.

Әдетте Ритц әдісі функционалдылықтың жалпы потенциалдық энергиясын төмендететін шешім жасау үшін қолданылады. Ритц әдісін қолдана отырып шешім құруда өте қиын қадамдар жасалады. Айтпақшы, бұл ескерту толығымен төменде қарастырылған басқа тікелей әдістерге қатысты. Белгіленген еңбек сыйымдылығы келесі жағдайларды айтарлықтай жеңілдетеді.

Бубнов-Галеркин әдісі.

Бубнов-Галеркин әдісі, атап айтқанда, кез келген Вариациялық принципті қолданумен байланысты емес және бастапқыда жеке туындылардағы қарапайым немесе дифференциалдық теңдеулерді жуықтау әдісі ретінде ұсынылған. Егер бұл теңдеулерде Эйлер-Остроградскийдің кейбір вариациялық есептерінің теңдеулері болса, онда Бубнов-Галеркин әдісін вариациялық деп түсіндіруге болады.

Доғал қабықтарды коллокациялық әдісімен есептеу.

Тұрақты және өзгермелі қалыңдықтағы доғал қабықтардың механикасында сызықтық және геометриялы сызықты емес шекаралық есептердің кең класын шешу үшін коллокациялық әдістерді практикалық қолдану қарастырылған (**Lindgaard, 2011**).

Шекті элементтер әдісі.

Шекті элемент әдісінің (ШЭӘ) негізгі ережелері 1943 жылы Р.Курант тұжырымдаған. Бұл ең танымал және жоғары практикалық құндылыққа ие әдістердің бірі болып саналады. Кең мақсаттағы бағдарламалық және есептеу кешендерінің үлкен саны ШЭӘ негізінде құрылған. Шекті элементтер әдісінің танымалдылығы екі маңызды қасиетіне байланысты: алгоритмдік және әмбебаптылық.

Пластинаның иілу есептерін шешуде негізгі және толықтырылатын шешімдердің қосындысы ретінде қарастырылады (Buksha, 2007).

3 МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Біз келесі белгілерді қабылдаймыз: s – басқару панеліндегі доғаның координаты; p – беттік көлденең жүктеменің қарқындылығы; l, k, h – панельдің ені, қисықтығы және қалыңдығы; E, ν – серпімділік модулі және Пуассон коэффициенті; $B = Eh/(1 - \nu^2)$, $D = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$ – созылуға және иілуге қатандылық; u, w – тангенциалдық орын ауыстыру және иілу; ω – нормальді бұрылу, $\omega = dw/ds$ -ке тең; ε, k – ұзартудың деформациясы және қисықтықтың өзгеруі; T, Q – тангенциалдық және кесу күштері; M – июші момент.

Ұзын панельдің кернеулі-деформацияланған күйі келесі қатынастармен сипатталады (Agapov, 2013):

а) тепе-теңдік теңдеулері

$$\frac{dT}{ds} = 0, \quad \frac{dQ}{ds} = kT - p, \quad \frac{dM}{ds} = Q - \omega T; \quad (1)$$

б) «деформация-орын ауыстыру» тәуелділіктері

$$\varepsilon = \frac{du}{ds} + kw + \frac{\omega^2}{2}, \quad k = \frac{d\omega}{ds}; \quad (2)$$

в) температураны есепке алу кезіндегі серпімділік заңы

$$t = t_0 + \frac{z}{h} t_1;$$

$$T = B[\varepsilon - (1 + \nu)\alpha t_0], \quad M = D[k - (1 + \nu)\alpha t_1/h]; \quad (3)$$

Дәйекті жуықтау процесі келесідей ұйымдастырылған. $(n + 1)$ жақындауға көшу формулалар бойынша жүзеге асырылады (Duissenbekov, 2020):

$$\begin{aligned} Y^{(n+1)} &= Y^n + \tau_w(Y - Y^n); \\ T^{(n+1)} &= T^n + \tau_i(T - T^n); n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

мұндағы $Y = (w, \omega, M)$ τ_w, τ_i - дәйекті жуықтау процесінің жинақталуын қамтамасыз ететін параметрлер. Нөлдік жуықтау үшін $Y^{(0)}=0, T^{(0)} = 0$ қабылдауға болады. Y және T компоненттері сызықтық теңдеулер жүйесінің шешімінен анықталады (Krivoshein, 2014):

$$\frac{dT}{ds} = 0, \quad \frac{dQ}{ds} = kT^n - p, \quad \frac{dM}{ds} = Q + \omega^n T^n; \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{du}{ds} + kw^n + \frac{(\omega^n)^2}{2}, \quad k = -\frac{d\omega}{ds} \quad \omega = -\frac{dw}{ds}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T &= B_0[\varepsilon - (1 + \nu)c] + (B_1/B)T^n \\ M &= D_0[k - (1 + \nu)\alpha t_1/h] + (D_1/D)M^n \end{aligned} \quad (7)$$

мұндағы $B=B_0+B_1$, $D=D_0+D_1$. Қатаңдылықтың бұл көрінісі өзгермелі қалыңдықтағы панельдерді есептеу жағдайында енгізіледі, ал B_0 , D_0 шамалары h_0 , $h = h_0 + h_1$, тұрақты қалыңдығы үшін есептелген қатаңдылықтың мағынасына ие. Жүйесі (5), (6), (7) бастапқы есепті шешуге және жақындауға байланысты жалған жүктемелер кезінде ұзын пластинаның кернеулі-деформацияланған күйін анықтайтын қатынастардың мағынасын беруге болады.

(5), (6) теңдеулерін шешу үшін ШЭӘ қатынасы, (7) өлшенген қалдық әдісінің арақатынасын қолдана отырып аламыз (Korenev, 1980), оны былай жазуға болады:

$$\int_0^1 \left[\frac{dT}{ds} \tilde{u} + \left(\frac{dQ}{ds} - kT^n + p \right) \tilde{w} - \left(\frac{dM}{ds} - Q + \omega^n T^n \right) \tilde{\omega} \right] ds = 0; \quad (8)$$

мұндағы \tilde{u} , \tilde{w} , $\tilde{\omega}$ - бірнеше рет сараланған салмақ функциялары. Бөлшектерді біріктіру (8) және белгілерді енгізу

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{d\tilde{u}}{ds}, \quad \tilde{k} = \frac{d\tilde{\omega}}{ds}, \quad \tilde{\omega} = -\frac{d\tilde{w}}{ds}; \quad \tilde{T} = B_0\tilde{\varepsilon}, \quad \tilde{M} = D_0\tilde{k}, \quad \tilde{Q} = \frac{d\tilde{M}}{ds}; \quad (9)$$

біз келесі қатынасты аламыз:

$$\int_0^1 \left[\frac{d\tilde{T}}{ds} u + \frac{d\tilde{Q}}{ds} w - A^n \right] ds + J_0 = 0; \quad (10)$$

мұндағы

$$A^n = \tilde{T} \left[\frac{B_1}{B_0 B} T^n - (1 + \nu) \alpha t_0 \right] + \tilde{M} \left[\frac{D_1}{D_0 D} M^n - (1 + \nu) \alpha t_1 / h \right] + \tilde{w} (k\tilde{T}^n - p) + \\ + \tilde{\omega} \omega^n T^n + \tilde{T} \left[-k w^n + \frac{(\omega^n)^2}{2} \right]; \\ J_0 = (T\tilde{u} - \tilde{T}u + Q\tilde{w} - \tilde{Q}w + M\tilde{\omega} - \tilde{M}\omega) \Big|_0^1;$$

(5), (6), (7) жүйелерін, (10) қатынасын шешу үшін кез келген \tilde{u} , \tilde{w} , $\tilde{\omega}$ тегіс функцияларға қатысты болады. $[0, l]$ кесіндісінде жанама қозғалысын анықтайтын интегралдық теңдеуді шығару үшін (10)

$$\tilde{w} = 0, \quad \frac{d\tilde{T}}{ds} = \delta(s - \xi); \quad (11)$$

мұндағы $\delta(s)$ - Дирактың дельта функциясы. (11) теңдеулерден аламыз:

$$\tilde{T}(s, \xi) = E(s - \xi), \quad \tilde{u} = \frac{|s - \xi|}{2B_0}; \quad (12)$$

мұндағы

$$s < 0 \text{ кезінде, } E(s) = -\frac{1}{2}, \quad s > 0 \text{ кезінде, } E(s) = \frac{1}{2}$$

(11), (12) қатынастарын (10) алмастыра отырып, біз өрнекке келеміз:

$$u(\xi) = \frac{u(l) + u(0)}{2} - T(l) \frac{l - \xi}{2B_0} + J_u(\xi); \quad (13)$$

мұндағы

$$J_u(\xi) = \int_0^1 E(s - \xi) \left[\frac{B_1}{B_0 B} T^n - (1 + \nu) \alpha t_0 + k w^n + \frac{(\omega^n)^2}{2} \right] ds;$$

Сол сияқты, (10)

$$\tilde{u} = 0, \quad \frac{d\tilde{Q}}{ds} = \delta(s - \xi); \quad (14)$$

w иілу ауытқуы үшін интегралдық теңдеуі шешіледі. (14) қатынасынан аламыз

$$\tilde{Q} = E(s - \xi), \quad \tilde{M} = \frac{|s - \xi|}{2}, \quad \tilde{\omega} = \frac{(s - \xi)^2}{2D_0} E(s - \xi), \quad \tilde{w} = -\frac{|s - \xi|^3}{12D_0}; \quad (15)$$

(10) қатынасынан (14), (15) ескергендегі арақатынастардан:

$$w(\xi) = \frac{w(l) + w(0)}{2} + \omega(l) \frac{l - \xi}{2} - \omega(0) \frac{\xi}{2} - M(l) \frac{(l - \xi)^2}{4D} - M(0) \frac{\xi^2}{4D_0} + Q(l) \frac{(l - \xi)^3}{12D_0} - Q(0) \frac{\xi^3}{12D_0} + J_w(\xi); \quad (16)$$

мұндағы

$$J_w(\xi) = \int_0^1 \left(p - kT^n \frac{|s - \xi|^3}{12D_0} + \omega^n T^n \frac{(s - \xi)^2}{2D_0} E(s - \xi) + \left[\frac{D_1}{D_0 D} M^n - (1 + \nu) \alpha t_1 / h \right] \frac{|s - \xi|}{2} \right) ds;$$

Интегралдарды есептеу үшін $J_u(\xi)$, $J_w(\xi)$ және т.б., сондай-ақ шекаралық интегралдық теңдеулерді шығару кезінде T ішкі күші, ω бұрылуы және M моменті үшін (13), (16) типті өрнектер қажет болады. (13), (16), (6), (7) және (9) қатынасын ескере отырып, саралау арқылы алынған осы өрнектерді жазамыз:

$$T(\xi) = \frac{T(l) + T(0)}{2};$$

$$\omega(\xi) = \frac{\omega(l) + \omega(0)}{2} - M(l) \frac{l - \xi}{2D_0} + M(0) \frac{\xi}{2D_0} + Q(l) \frac{(l - \xi)^2}{4D_0} + Q(0) \frac{\xi^2}{4D_0} + J_\omega(\xi)$$

$$M(\xi) = \frac{M(l) + M(0)}{2} - Q(l) \frac{l - \xi}{2} + Q(0) \frac{\xi}{2} + J_\omega(\xi) \quad (17)$$

мұндағы

$$J_\omega = -\frac{dJ_w}{d\xi} = \int_0^1 \left(p - kT^n \frac{(|s - \xi|^2)}{2D_0} E(s - \xi) + \omega^n T^n \frac{|s - \xi|}{2D_0} + \left[\frac{D_1}{D_0 D} M^n - (1 + \nu) \alpha t_1 / h \right] E(s - \xi) \right) ds;$$

$$J_m = -\int_0^1 \left(p - kT^n \frac{|s - \xi|}{2} - \omega^n T^n E(s - \xi) \right) ds;$$

Қатынастардан (13), (16), (17) $\xi \rightarrow 0$ және $\xi \rightarrow l$ мынадай мәнді алуға:

$$u(0) - u(l) + T(l) \frac{l}{B_0} = 2J_u(0)$$

$$\begin{aligned}
u(l) - u(0) - T(0)\frac{l}{c} &= 2J_u(l) & (18) \\
w(0) - w(l) - \omega(l)l + M(l)\frac{l^2}{2D_0} - Q(l)\frac{l^3}{6D_0} &= 2J_w(0) \\
w(l) - w(0) + \omega(0)l + M(0)\frac{l^2}{2D_0} - Q(0)\frac{l^3}{6D_0} &= 2J_w(l) \\
\omega(0) - \omega(l) + M(l)\frac{l}{D_0} - Q(l)\frac{l^2}{2D_0} &= 2J_\omega(0) \\
\omega(l) - \omega(0) + M(0)\frac{l}{D_0} - Q(0)\frac{l^2}{2D_0} &= 2J_\omega(l) & (19)
\end{aligned}$$

Алты теңдеу (18), (19) сегменттің ұштарындағы функциялардың он екі белгісіз мәндерін қамтиды $[0, l]$. Шекаралық шарттардан алты белгісізді алып тастай отырып, біз алты белгісіз алты теңдеулер жүйесін аламыз. Осы жүйені шеше отырып, формулалар бойынша есептеу үшін қажетті функциялардың шекаралық мәндерін анықтаймыз (13), (16), (17). $[0, l]$ кесіндісінің ішкі нүктелеріндегі функциялардың мәндерін есептеп, (4) формулалары бойынша $Y^{(n+1)}, T^{(n+1)}$ мәндерін табамыз. Интегралдар $J_u(\xi), J_w(\xi), J_\omega(\xi), J_m(\xi)$ есептеу трапецияның формуласы бойынша қолданылады, оны интегралдық өрнектердегі соңғы үзілістер жағдайында қолдануға ыңғайлы.

Тұрақты қалыңдықтағы панельдерді есептеудің сызықтық міндеттері. Өлшемсіз шамаларды енгіземіз:

$$\begin{aligned}
\bar{s} &= \frac{s}{l}, & \bar{p} &= \frac{p}{E} \left(\frac{l}{h_0}\right)^4, & \bar{k} &= \frac{l^2 k}{h_0}, & \bar{h} &= \frac{h}{h_0} \\
\bar{w} &= \frac{w}{h_0}, & \bar{u} &= \frac{u}{h_0} \frac{l}{h_0}, & \bar{\omega} &= \omega \frac{l}{h_0}, & \bar{\varepsilon} &= \varepsilon \left(\frac{l}{h_0}\right)^2, & \bar{k} &= k h_0 \left(\frac{l}{h_0}\right)^2 \\
\bar{T} &= \frac{T}{E h_0} \left(\frac{l}{h_0}\right)^2, & \bar{Q} &= \frac{Q}{E h_0} \left(\frac{l}{h_0}\right)^3, & \bar{M} &= \frac{M}{E h_0^2} \left(\frac{l}{h_0}\right)^2
\end{aligned}$$

Қысқартуларды қабылдаймыз: сызықты есептеу (СЕ), сызықты емес есептеу (СЕЕ) - (1) - (3) ескерусіз есепті аналитикалық шешудің нәтижелері және геометриялық сызықты емес функциясы. Есептеу кезінде қатаң байланыстың (ҚБ) және топсалы бекітудің (ТБ) шекаралық шарттары қаралды. Дәйекті жуықтау процесінің қажетті дәлдігіне қол жеткізу критерийі шарт алынды:

$$\sqrt{\Delta} < \varepsilon_0, \quad (20)$$

мұндағы $\Delta = \frac{\sum_i (w_i - w_i^n)^2}{\sum_i (w_i)^2}$, i - $[0, l]$ кесіндінің кейбір бөлу түйінінің нөмірі; ε_0 - берілген дәлдік.

Процестің жуықтауының ең аз санын қамтамасыз ететін τ_w, τ_i , параметрлерін таңдауға басты назар аударылды (4). Осы параметрлердің оңтайлы мәндері үшін τ_w^*, τ_i^* мәндерін аламыз. $\tau_w^*(\bar{k}), \tau_i^*(\bar{k})$ тәуелділігін зерттеу үшін сандық эксперимент топсалы бекіту және контурды қатаң бекіту үшін жасалды. Эксперимент көрсеткендей, жеткілікті үлкен \bar{k} ($\bar{k} > 20$) кезінде көрсетілген тәуелділіктер арақатынаспен ұсынылуы мүмкін:

$$\tau_w^*(\bar{k}) = 1, \quad \tau_i^*(\bar{k}) = \frac{\lambda}{\bar{k}^2} \quad (21)$$

мұндағы λ - кейбір параметр. Қатты тығыздау үшін сандық эксперименттің нәтижелері **1-суретте** көрсетілген. График бойынша $\lambda=60$ мәні анықталды. Есепті дәл шешу үшін төменгі формуланы ескереміз

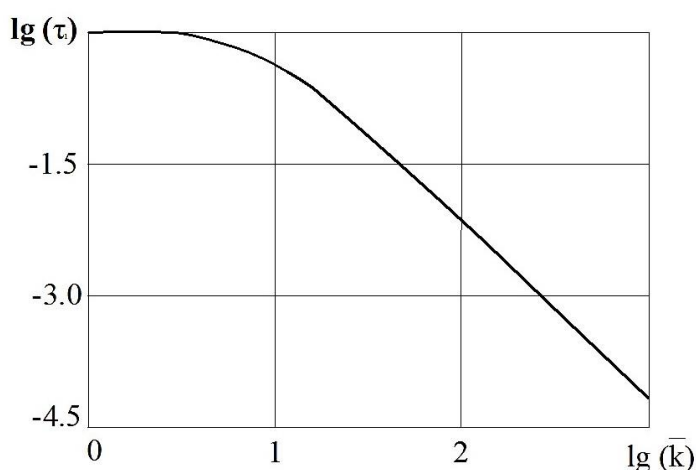
$$T = -\frac{pR}{(1 + \lambda k^{-2})} \quad (22)$$

мұндағы $R = \frac{1}{k}$, $\lambda=60$ шарты ҚБ үшін, $\lambda=10$ шарты ТБ үшін. Формуланың құрылымы (22) және λ мәндері (21) және (22) формулаларындағы λ параметрлерінің мәндері бірдей болуы тиіс деген қорытынды үшін негіз береді. ТБ жағдайындағы сандық эксперимент тәуелділіктің әділдігін растады (21).

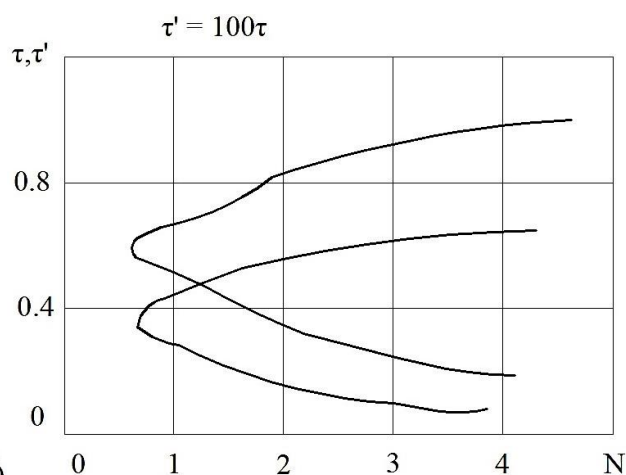
4 НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Қатаң байланыстың шекаралық шарттары үшін **2-суретте** $N(\tau_i)$ тәуелділіктері көрсетілген, мұндағы $N - \varepsilon = 10^{-5}$ дәлдікке жету үшін қажет жуықтаулар саны, $\bar{k} = 10$ және $\bar{k} = 100$ ($\tau_w = 1$) кезінде. τ_i параметрлерінің, τ_i^* мәнінен ауытқуымен жуықтаулар санының айтарлықтай өсетінін көруге болады; $\tau_i = \tau_i^*$ кезінде әдетте $N < 8$.

ҚБ шарттары үшін сандық тәжірибенің кейбір нәтижелері **1-кестеде** келтірілген, мұнда $N(\tau_i)$ мәндері $\tau_i = \tau_i^*$ және $\tau_i(\bar{k})$, арқылы алынған \bar{k} -нің әртүрлі мәндері үшін берілген мәндері (21) формулалардан табылған. Екі жағдайда да $\tau_w = 1$ алынады. \bar{k} өскен сайын τ_i^* және $\tau_i(\bar{k})$ айырмашылықтары азаятынын көруге болады.



1-сурет – Сандық эксперименттің нәтижелері (авторлық материал)



2-сурет – Шекаралық шарттары (авторлық материал)

1-кесте

Сандық тәжірибенің нәтижелері

\bar{k}	τ_i^*	$N(\tau_i^*)$	$\tau_i(\bar{k})$	$N(\tau_i)$
5	0,7	5	2,4	шығын
10	0,4	7	0,6	27
20	0,13	5	0,15	10
50	0,023	6	0,024	7

Сонымен қатар интегралды есептеу үшін қажетті $[0, l]$ интервалының m бөлімдерінің санының әсерін $J_u(\xi)$, $J_w(\xi)$, $J_\omega(\xi)$, $J_m(\xi)$ трапеция формуласы бойынша және есептің шешімінің дәлдігі бойынша зерттедік. Есептеу нәтижелері **2-кестеде** келтірілген.

2-кестеден көріп отырғанымыздай, бөлулердің бірдей санымен есептеудің қателігі k параметрінің өсуімен артады және контурдың қатаң аяқталуына қарағанда топсалы бекіту кезінде үлкен болады.

Тұрақты қалыңдықтағы иілгіш панельдерді есептеу. Есептердің бұл класын шешудің жеткілікті сенімді әдісі әртүрлі нысандары бар параметрді жалғастыру әдісі болып табылады

(Kunanbayeva, 2022). Бұл жұмыстың аясында біз бұл әдіске тоқталмаймыз, орнықтылықты жоғалтудың p^* жоғарғы критикалық жүктемелерінен аспайтын жүктемелерге арналған мәселелерді шешумен шектелеміз. Мұндай шешімдерді $\bar{u}^{(0)} = \bar{w}^{(0)} = 0$ бастапқы жуықтау ретінде алып, жоғарыдағы әдіспен алуға болады.

Үлкен ауытқулар үшін формулалар (21) τ_w^* , τ_i^* оңтайлы мәндерін анықтап қана қоймайды, сонымен қатар көбінесе жақындауды мүлде қамтамасыз етпейтін шешімге келтіреді, кейде тепе-теңдіктің тұрақсыз түріне сәйкес шешімге жақындау болады. Сандық эксперимент сызықты емес есептердегі жинақтылыққа, параметрді өзгерту арқылы қол жеткізілетінін көрсетеді. Бұл жағдайда $\tau_i = 1$ деп қарастыруға болады. t_m параметрін өзгерту қажеттілігі пластинадағы иілгіш элементтегідей, бір жүктеме кезінде панельге қарағанда айтарлықтай жоғары болатынымен түсіндіруге болады. Демек, $\tau_w = 1$ үшін тіпті бірінші жуықтау тепе-теңдіктің басқа формасына сәйкес шешімге қандай да бір мағынада «жақынырақ» болуы мүмкін; процесс осы шешімге жақындайды.

2-кесте

Сандық тәжірибенің нәтижелері

Нұсқа	m	$\bar{w}(l/2)$	\bar{T}
$\bar{k} = 20$	6	0.3712	-4.347
$\bar{p} = 100$	12	0.3709	4.348
ҚБ	Сызықты есеп	0.3709	4.348
$\bar{k} = 20$	6	0.3514	-4.987
$\bar{p} = 100$	12	0.3476	-4.905
ТБ	24	0.3470	-4.885
	Сызықты есеп	0.3468	-4.878
$\bar{k} = 200$	6	0.6495	-76.08
$\bar{p} = 152381$	12	0.6491	-76.08
ҚБ	24	0.6490	-76.08
	Сызықты есеп	0.6490	-76.08
$\bar{k} = 200$	24	0.419	-76.28
$\bar{p} = 152381$	48	0.511	-76.20
ТБ	96	0.534	-76.18
	Сызықты есеп	0.542	-76.17

3-кестеде сыртқы қысымдағы панельдерге арналған кейбір есептерді шешу нәтижелері көрсетілген. Мұндай есептердің аналитикалық шешімі (Amosov, 2009) берілген. Шешім $\varepsilon_0 = 10^{-4}$ үшін алынды.

ҚБ шекаралық шарты бар $\bar{k} = 6\frac{2}{3}$ нұсқасы үшін жоғарғы критикалық жүктеме $\bar{p}^* = 8,10$, ол $\bar{w}(l/2) = 0,48$, $\bar{T}^* = -1,60$ мәндеріне сәйкес келетінін ескереміз; нұсқасы үшін $\bar{k} = 20$ - $\bar{p}^* = 104$, $\bar{w}(l/2) = 0,988$, $\bar{T}^* = -6,80$; $\bar{k} = 10$ нұсқасы үшін $\bar{p}^* = 21,3$, $\bar{w}(l/2) = 0,606$, $\bar{T}^* = -3,18$. Есептеу практикасы критикалық мәнге жақын жүктемелер кезінде n жуықтау саны көп болатынын көрсетеді, параметрлер τ_w^* , τ_i^* таңдау қиынға соғады; τ_w^* , τ_i^* әртүрлі мәндері әртүрлі шешімдерге әкелуі мүмкін (**3-кестені** қараңыз).

Интенсивтілігі p біркелкі таралған қысымның әсерінен болатын тұрақты қалыңдығы $h \neq h_0$ ($B_1 \neq 0$, $D_1 \neq 0$) ұзын, топсалы, көлбеу цилиндрлік панель үшін есептеулер жүргізілді.

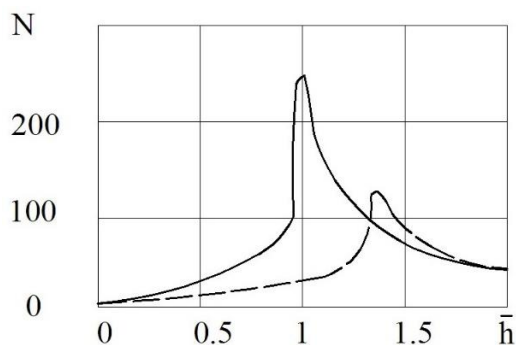
3-кесте

Сандық тәжірибенің нәтижелері

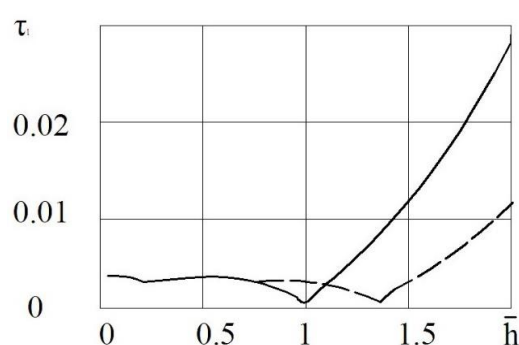
Нұсқа	Шешілуі	τ_w, τ_i	N	$\bar{w}(l/2)$	\bar{T}
$\bar{k} = 6\frac{2}{3}$ $\bar{p} = 47.91$ ҚБ	Сызықты есеп	-		0.7827	-3.058
	Сызықты емес есеп	-		1.401	-0.2000
	Нақты жұмысы	0.7, 1.0	13	1.401	-0.1997
$\bar{k} = 6\frac{2}{3}$ $\bar{p} = 7.591$ ТБ	Сызықты есеп	-		0.1982	-0.930
	Сызықты емес есеп	-		0.3511	-1.300
	Нақты жұмысы	0.2, 1.0	65	0.3421	-1.302
$\bar{k} = 20$ $\bar{p} = 89.86$ ҚБ	Сызықты есеп	-		0.3333	-3.907
	Сызықты емес есеп	-		0.5221	-4.800
	Нақты жұмысы	0.12, 1.0	86	0.5233	-4.804
	Нақты жұмысы	1.0, 0.15	88	3.907	-2.654
$\bar{k} = 10$ $\bar{p} = 19.17$ ТБ	Сызықты есеп	-		0.2478	-1.742
	Сызықты емес есеп	-		0.4091	-2.381
	Нақты жұмысы	0.1, 1.0	78	0.4103	-2.385
	Нақты жұмысы	1.0, 0.1	8	2.586	0.0962

$h = h_0$ үшін панель параметрлері $\nu = 0,3$, $\bar{k} = 20$, $\bar{p} = 100$. Есептеулер мақсаты h тұрақты қалыңдығы бар процестің (4) жинақтылығына h_0 параметрінің әсерін зерттеу болып табылады. Нәтижелер **3,4-суреттерде** келтірілген, мұндағы тұтас сызықтар $\tau_i^*(\bar{h})$ және $n(\bar{h})$, $n - \tau_i = \tau_i^*$ кезіндегі процесс (4) итерацияларының саны тәуелділіктерін көрсетеді. τ_i^* максималды мәні мен ең аз n мәніне $\bar{h} = 1$ ($B_1 = 0$) кезінде қол жеткізілетінін көруге болады, ал τ_i^* (21) формуласы бойынша алынған мәнге тең. \bar{h} өскен сайын τ_i^* параметрі азаяды, ал n саны шексіз өседі; азайған сайын τ_i^* параметрі де азаяды, бірақ n қайталану саны шектеулі болып қалады.

Есептеулер $\nu = 0,3$, $\bar{k} = 20$, $\bar{p} = 100$, $\varepsilon = 10^{-5}$ параметрлерінің мәндерінде топсалы жиктері бар айнымалы қалыңдықтағы көлбеу цилиндрлік панель үшін жасалды. Қалыңдықтың өзгеру заңы екі буыны бар бөліктік сызықтық функциямен берілген: $\bar{h}(0) = 1,5$, $\bar{h}(l/2) = 0,5$, $\bar{h}(l) = 1,5$. Қалыңдықтың мұндай өзгеру заңымен доға бойындағы орташа айнымалы қалыңдық $\bar{h} = 1$. Есептеулер нәтижелері **4-кестеде** және **3,4-суреттерде** үзік сызықтармен көрсетілген.



3-сурет – Бойлық күш нәтижелері



4-сурет – Жанама кернеу нәтижелері

4-кесте

Есептеулер нәтижелері

Есептеу әдісі	$\bar{w}(l/2)$	\bar{T}	$\bar{M}(l/2)$	$\bar{\omega}(0)$
ШЭӘ	0,4285	-4,950	-0,1245	1,070
Ортогональды есеп	0,4276	-4,950	-0,1246	1,068
ШЭӘ	0,3469	-4,878	-0,3051	1,110
Аналитикалық есептеу	0,3468	-4,878	-0,3049	1,110

5 ҚОРЫТЫНДЫ

1. Кестенің бірінші жолында жоғарыда сипатталған әдіс бойынша алынған нәтижелер, екінші жолында алгоритм бойынша ортогональды есептеу әдісімен сол есепті шешудің нәтижелері келтірілген (**Tokmuratov, 2020**). Үшінші қатарда салыстыру үшін ШЭӘ көмегімен алынған тұрақты қалыңдығы $\bar{h} = 1$ панеліне арналған нәтиже берілген, соңғы қатарда $\bar{h} = 1$ үшін аналитикалық есептеудің нәтижелері келтірілген.

2. **3,4-суреттерде** 2-ші тармақта сипатталғанға ұқсас қалыңдығы өзгермелі панель үшін сандық тәжірибе; (4) процестің жинақтылығына h_0 мәнін таңдаудың әсері зерттелді.

3. Абсцисса осі s доғасы бойымен \bar{h} функциясының орташа мәнін көрсетеді. Суреттен бұл жағдайда мәнің де болатынын көруге болады ($h_{op}/h_0 \approx 1,35$, h_{op} - панельдің орташа қалыңдығы s доғасы бойынша), бұл кезде ең жоғары жылдамдық дәйекті жуықтау процесінің ықтимал жинақталуы ($n = 8$, $\tau_i^* = 0,012$). $h_{op}/h_0 < 0,5$ кезінде $\tau_i^*(h_{op}/h_0)$ тәуелділігі тура пропорционалды тәуелділікке жақын екенін атап өткен жөн. Бұл факт тұрақты қалыңдықтағы панель үшін де орын алады.

4. Асимметриялық жүктемелердің әсеріне доғал қабықтарды есептеу кезінде ұсынылған есептеу әдісінің артықшылықтарын көрсетілді.

5. Жүктеме деңгейіне байланысты қатаң параметрлердің өзгеруін ескеруге мүмкіндік беретін жарықтың пайда болуын ескере отырып, жүктеменің қысқа мерзімді әрекеті үшін топсалы мен қатаң тірелген доғал темірбетон қабықтарын есептеу үшін, аралас формадағы шекаралық элементтер теңдеулер жүйесі құрылды.

ӘДЕБИЕТТЕР:

1. **Zhangabay, N., Suleimenov, U., Utelbayeva, A., Baganova, S., Tolganbayev, A., Duissembekov, B., Galymzhan, K., Dossybekov, S., Baibolov, K., Fediuk, R., Amran, M., & Kolesnikov, A.** (2023). Experimental research of the stress-strain state of prestressed cylindrical shells taking into account temperature effects. *Case Studies in Construction Materials*, 18, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01776>
2. **Tursunkululy, T., Zhangabay, N., Avramov, K., Chernobryvko, M., Suleimenov, U., Utelbayeva, A., B. Duissenbekov, Aikozov, Y., Dautbek, B., & Abdimanat, Z.** (2022). Strength analysis of prestressed vertical cylindrical steel oil tanks under operational and dynamic loads. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (116), 14–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254218>
3. **Beglov, A.D., & Sanzharovskij, R.S.** (2011). European standards and nonlinear theory of reinforced concrete [Evrostandarty` i nelinejnaya teoriya zhelezobetona]. SPb.: SPbSUACE (In Russ.).
4. **Maksimyuk, V.A., Storozhuk, E.A., & Chernyshenko, I.S.** (2013). Nonlinear Deformation of Thin Isotropic and Orthotropic Shells of Revolution with Reinforced Holes and Rigid Inclusions. *International Applied Mechanics* 49, 685–692. <https://doi.org/10.1007/s10778-013-0602-x>
5. **Mityakina N.A.** (2014) Experimental and theoretical studies of composite coatings from shell panels [Eksperimentalno-teoreticheskie issledovaniya sostavnykh pokrytii iz panelei-obolochek]. – Belgorod: BGTU (in Russ.).
6. **Ledenev V.V., & Khudyakov A.V.** (2016) Shell structures in construction. Theory, design, constructions, calculation examples [Obolochecnyye konstruktsii v stroitelstve. Teoriya, proektirovanie, konstruktsii, primery rascheta]. – Tambov: FGBOU VO «TGTU» (in Russ.).
7. **Lindgaard E., & Lund E.** A unified approach to nonlinear buckling optimization of composite structures // *Computers & Structures*. 2011. Vol. 89, issues 3–4. Pp. 357–370. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2010.11.008>

8. **Buksha, V.V., Mashkin, O.V., & Rogalevich, V.V.** (2007). Calculation of plates and flat shells using collocation methods [Raschet plastin i pologikh obolochek ollokacziorny`mi metodami] Ekaterinburg: AMB (In Russ.).
9. **Agapov V.P., Kovrigin I.I., Malakhova A.N., & Savostyanov V.N.** (2013) Physically nonlinear processes in building structures [Fizicheski nelineinye protsessy v stroitelnykh konstruktsiyakh]. – M.:MGSU (in Russ.).
10. **Duisenbekov, B., Tokmuratov, A., Zhangabay, N., Orazbayev, Zh., Yerimbetov, B., & Aldiyarov, Zh.** (2020). Finite-difference equations of quasistatic motion of the shallow concrete shells in nonlinear setting. *Curved and Layered Structures*, 7, 48-55. <https://doi.org/10.1515/cls-2020-0005>
11. **Krivoshein, I.V.** (2014). Iterative methods for calculating nonlinearly deformable flat shells and plates [Iteracziorny`e metody` rascheta nelinejno deformiruemy`kh pologikh obolochek i plastinok] Saratov: Sarat. state tech. university (In Russ.).
12. **Korenev, B.G.** (1980). Problems of the theory of thermal conductivity and thermoelasticity [Zadachi teorii teploprovodnosti i termouprugosti] Moscow: Science (In Russ.).
13. **Kunanbayeva, Y., Yerimbetov, B., Chalabayev, B., Aubakirova, F., & Duisenbekov, B.** (2022) Application of Mixed Load-Bearing Structures in Earthquake Engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(11), 5527-5537. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02230-6>
14. **Amosov A.A.** (2009) Technical theory of thin elastic shells [Tekhnicheskaya teoriya tonkikh uprugikh obolochek]. – M.:ASV (in Russ.).
15. **Tokmuratov A.M., Duisenbekov B.K., Varenik A.S., Varenik K.A.** (2020). Dependencies of nonlinear hereditary creep theory for concrete and creep type equations of hardening under plane stress. [PDF file]. Retrieved from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/939/1/012079/meta>

UDC 624.138.2
IRSTI 67.13.21
REVIEW ARTICLE

STUDIES OF THE EFFECT OF REINFORCEMENT WITH GEOSYNTHETIC MATERIALS ON THE STRENGTH OF SOILS UNDER CONDITIONS OF TRIAXIAL COMPRESSION AND SINGLE-PLANE SECTION

Zh.K. Kanatova , S.Zh. Jumadilova* , F.B. Temirbekova , I.O. Aliev 

International Educational Corporation, Almaty, 050043, Kazakhstan

Abstract. *The study is a comprehensive analysis of the effect of geosynthetic materials on the strength characteristics of soils under triaxial compression and single plane shear conditions. The triaxial compression method is used to investigate the complex effects on soil specimens, which reflects real conditions and ensures the reliability of the results. The aim of the study is to evaluate the effectiveness of geosynthetic materials as a means of soil reinforcement. Particular attention is paid to analysing changes in the mechanical properties of soils reinforced with different types of geosynthetics compared to unreinforced samples. The study includes laboratory tests, during which the parameters of strength, deformability and stability of soils under different loads and variations of test conditions are evaluated. The results of the study provide important information for specialists in geotechnical design and construction. They help to evaluate the effectiveness of geosynthetic materials in strengthening soil structures under high loads and complex conditions. Additionally, the study includes an analysis of the effect of geogrid on the strength of weak soils, which allows to identify optimal strengthening options and compare their effectiveness. Thus, the study is a relevant contribution to the development of knowledge on the interaction between geosynthetic materials and soil structures, contributes to the optimisation of design and increases the durability of soil structures*

Keywords: *geogrids, sandy soils, geosynthetic materials, triaxial compression method.*

* Corresponding author

Saule Dzhumadilova, e-mail: saule_dzhumadilo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-09>

Received 15 May 2024; Revised 10 July 2024; Accepted 20 August 2024

ӘОЖ 624.138.2
FTAMP 67.13.21
ШОЛУ МАҚАЛАСЫ

ҮШ ОСЬТІ ҚЫСУ ЖӘНЕ БІР ЖАЗЫҚТЫҚТЫ КЕСУ ЖАҒДАЙЫНДА ГЕОСИНТЕТИКАЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРМЕН НЫҒАЙТУДЫҢ ТОПЫРАҚ БЕРІКТІГІНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Ж.К. Канатова , С.Ж. Джумадилова* , Ф.Б. Темирбекова , И.О. Алиев 

Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, 050043, Қазақстан

Андатпа. Зерттеу үш осьті қысу және бір жазықтықты кесу жағдайында геосинтетикалық материалдардың топырақ беріктігі сипаттамаларына әсерін кешенді талдаудан тұрады. Үш осьті қысу әдісі нақты жағдайларды көрсететін және нәтижелердің дұрыстығын қамтамасыз ететін топырақ үлгілеріне кешенді әсерді зерттеу үшін қолданылады. Зерттеудің мақсаты – топырақты нығайту құралы ретінде геосинтетикалық материалдардың тиімділігін бағалау. Бекітілмеген үлгілермен салыстырғанда геосинтетиканың әртүрлі түрлерімен нығайтылған топырақтың механикалық қасиеттеріндегі өзгерістерді талдауға ерекше назар аударылған. Зерттеу барысында әртүрлі жүктемелер мен сынақ жағдайларының вариациялары кезінде топырақтың беріктігі, деформациясы және тұрақтылығы параметрлері бағаланатын зертханалық сынақтарды жүргізуді қамтиды. Зерттеу нәтижелері геотехникалық жобалау және құрылыс мамандары үшін маңызды ақпаратты ұсынады. Жоғары жүктемелер мен қиын жағдайларда топырақ құрылымдарын нығайтудағы геосинтетикалық материалдардың тиімділігін бағалауға көмектеседі. Сонымен қатар, зерттеу нығайтудың оңтайлы нұсқаларын анықтауға және олардың тиімділігін салыстыруға мүмкіндік беретін геотордың әлсіз топырақтың беріктігіне әсерін талдауды қамтиды. Бұл зерттеу геосинтетикалық материалдар мен топырақ құрылымдарының өзара әрекеттесуі туралы білімді дамытуға өзекті үлес береді, жобалауды оңтайландыруға және геотехникалық тәжірибеде инженерлік құрылымдардың беріктігін арттыруға ықпал етеді.

Түйін сөздер: гео торлар, құмды топырақтар, геосинтетикалық материалдар, үш осьті қысу әдісі.

*Автор-корреспондент

Сауле Джумадилова, e-mail: saule_dzhumadilo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-09>

Алында 15 мамыр 2024; Қайта қаралды 10 шілде 2024; Қабылданды 20 тамыз 2024

УДК 624.138.2

МРНТИ 67.13.21

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АРМИРОВАНИЯ ГЕОСЕНТЕТИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ПРОЧНОСТЬ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ И ОДНОПЛОСКОСТНОГО СРЕЗА

Ж.К. Канатова , С.Ж. Джумадилова* , Ф.Б. Темирбекова , И.О. Алиев 

Международная образовательная корпорация, Алматы, 050043, Казахстан

Аннотация. Исследование представляет собой комплексный анализ влияния геосинтетических материалов на прочностные характеристики грунтов в условиях трехосного сжатия и одноплоскостного среза. Метод трехосного сжатия используется для исследования комплексного воздействия на грунтовые образцы, что отражает реальные условия и обеспечивает достоверность результатов. Цель исследования заключается в оценке эффективности геосинтетических материалов как средства укрепления грунтов. Особое внимание уделено анализу изменений в механических свойствах грунтов, укрепленных различными типами геосинтетики, по сравнению с неукрепленными образцами. Исследование включает в себя проведение лабораторных испытаний, в ходе которых оцениваются параметры прочности, деформируемости и устойчивости грунтов при действии различных нагрузок и вариаций условий испытания. Результаты исследования представляют собой важную информацию для специалистов в области геотехнического проектирования и строительства. Они помогают оценить эффективность геосинтетических материалов в укреплении грунтовых структур при высоких нагрузках и сложных условиях. Дополнительно, исследование включает анализ влияния геосетки на прочность слабых грунтов, что позволяет выявить оптимальные варианты укрепления и сравнить их эффективность. Данное исследование является актуальным вкладом в развитие знаний о взаимодействии геосинтетических материалов и грунтовых структур, способствует оптимизации проектирования и повышению долговечности инженерных конструкций в геотехнической практике.

Ключевые слова: георешетки, песчаные грунты, геосинтетические материалы, метод трехосного сжатия.

*Автор-корреспондент

Сауле Джумадилова, e-mail: saule_dzhumadilo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-09>

Поступило 15 мая 2024; Пересмотрено 10 июля 2024; Принято 20 августа 2024

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС/ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 ВВЕДЕНИЕ

Плохие геологические условия, особенно связанные с наличием слабых грунтов, могут представлять серьезные вызовы для строительных проектов. Слабые грунты, такие как торф, глины или высоковлажные пески, часто характеризуются низкой несущей способностью, что затрудняет строительство устойчивых фундаментов, решением этих проблем обычно включает в себя проведение тщательных геотехнических исследований, разработку инженерных решений, таких как укрепление грунта и использование геосинтетических материалов.

Одним из важных аспектов актуальности исследований геосинтетических материалов является их эффективность в повышении прочности и устойчивости строительных конструкций. Геосинтетики позволяют значительно снизить риски разрушения и повреждения сооружений, таких как дамбы, земляные насыпи, автомобильные и железнодорожные дороги. Исследования позволяют определить оптимальные свойства и параметры геосинтетических материалов, чтобы обеспечить максимальную защиту и долговечность конструкций.

Другой важной сферой исследований является использование геосинтетиков в экологически чувствительных зонах, таких как зоны защиты водных ресурсов и заповедники. Геомембраны и геосетки могут использоваться для создания барьеров, которые предотвращают проникновение загрязненных вод или грунта в водоемы или экологически важные территории.

Таким образом, актуальность исследований геосинтетических материалов в строительстве обусловлена их важными функциями в области укрепления и защиты конструкций, а также потенциалом для создания новых материалов и технологий. Эти исследования позволяют улучшить качество и долговечность строительных проектов, а также сэкономить ресурсы и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Геосетка – геосинтетический плоский полимерный рулонный материал с сетчатой структурой, образованный эластичными рёбрами из высокопрочных пучков нитей, скреплёнными в узлах прошивочной нитью, переплетением, склеиванием, сплавлением или иным способом, с образованием ячеек, размеры которых больше образующих сетку рёбер, обработанных специальными составами для улучшения свойств и повышения их стабильности. Для защиты грунта на склонах от эрозии и осыпания при землеустройстве и строительстве дорог невозможно обойтись без применения геоматериалов. Чаще всего для этой цели используются геосинтетики, они прочны, хорошо удерживают частицы грунта, но не подвержены биоразложению и остаются в грунте десятки и сотни лет, создавая экологические проблемы (Li et al., 2008). Материалы из натурального сырья безопасны для окружающей среды по сравнению с их синтетическими прототипами, так как за несколько лет подвергается полному биоразложению, а сами волокна являются возобновляемым ресурсом. При использовании текстильной сетчатой структуры существенно увеличивается сцепление грунта, поскольку частицы мелкообломочного грунта уплотняются и заклиниваются в ячейках геосеток. При этом образуется устойчивая система геосетка-грунт, т.е. геоконкомпозит, в которой внешняя нагрузка равномерно распределяется по всему объему. (Shukla, 2016)

Геосетка создается из различных материалов и с разным размером ячеек. Вид материала подбирается в зависимости от того, какие задачи необходимо выполнить на том или ином объекте. В отличие от георешеток — трехмерных конструкций — геосетки плоские. Это рулонный материал, удобный в транспортировке и монтаже (Cook, 2003).

Использование геотекстиля и георешеток обладают более высокой прочностью, меньшей массой и лучшим взаимодействием с геосинтетикой, что позволяет сократить объем армирования и использовать меньше материала для насыпей с крутыми склонами, повышая их устойчивость к боковому скольжению и оседанию (Tatlisoz et al., 1998).

Сварные и тканые георешетки, а также более прочные интегральные георешетки обеспечивают лучшую стабилизацию, в то время как геотекстильные материалы и более слабые интегральные георешетки менее эффективны. Деформации связаны с прочностью материа-

лов в поперечном направлении. Необходимо дальнейшее исследование для определения ключевых параметров геосинтетиков в таких условиях (Cuelho et al., 2011).

Геосетки эффективнее для песчаных грунтов с низким содержанием мелких частиц, тогда как геотекстиль предпочтительнее для грунтов с высокой влажностью (Razeghi & Ensani, 2023).

Давление и свойства грунта оказывают существенное влияние на эффективность армирования георешёткой. Гравийные грунты повышают устойчивость прочности, чем песчаные, а увеличение давления влияет на эффект армирования, что подчёркивает необходимость учёта этих факторов при проектировании. (Zakarka et al., 2023).

Маэгава и др. исследовали использование георешёток для защиты от камнепадов. Испытания на насыпях, усиленными георешётками и геоячейками, показывают, что георешётки эффективно смягчают удары валунов, однако инерция катящихся объектов может обеспечить перспективу их движения вверх. (Maegawa et al., 2011).

Тагави и Мосалланезад предложили новую систему «анкерных георешёток», в которой стальные горизонтальные элементы увеличивают мощность, вырывающуюся на 65%, что открывает новые перспективы для руководства земляческих стен. (Taghavi & Mosallanezhad, 2017).

Наконец, Хасен и Аббас отметили, что георешётки снижают осадку фундаментов при землетрясениях, особенно при низких ускорениях, однако их эффективность в насыщенных грунтах ниже, чем в условиях сопротивления (Hasen & Abbas, 2024).

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

3.1 ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С НЕСВЯЗНЫМ ГРУНТОМ

Предметом испытаний являются образцы песка. Образец нарушенного состояния имеет плотность $1,89 \text{ г/см}^3$ и естественная влажность $W=6.719\%$. В соответствии с результатами испытаний на гранулометрический состав, песок представляют собой крупные пески (по ГОСТ 25100). Данные по гранулометрическому составу приведены в [таблице 1](#).

Таблица 1

Гранулометрический состав образца

Размер частиц d, мм	>2	>0,5	>0,25	>0,10	<0,10
Содержание частиц, % по массе	8,62	49,64	28,14	7,37	6,23

В программе испытаний предусмотрено два типа набора образцов, которые отличаются наличием геосеток не только по высоте, но и по торцам образца. Считаем, что при передаче вертикальной нагрузки, по торцам образца могут формироваться касательные напряжения, которые приводят к изменению напряженно-деформированного состояния и приводят к изменению разрушающей нагрузки. Целью исследований является изучение этого фактора.

Образцы нарушенной структуры изготавливаются в лаборатории. Для этого следует подготовить материал песка естественной влажности. Далее следует подготовить песок определенной массы для получения плотности $\rho=1,89 \text{ г/см}^3$. Затем материал уплотняется в разъемной форме высотой 20 см, диаметром 10 см. После готовности образца, разъемная форма извлекается. Впоследствии, образец фиксируется и незамедлительно прикладывается нагрузка ступенями, которая увеличивается с последующим нагружением.

Для подготовки упрочненного геосетками образца применяется вышеуказанная методика. Геосетка используется во время уплотнения в соответствии с программой испытаний в таблице. Тип геосетки подобран с использованием методов физического моделирования под размер образца диаметром $d=10 \text{ см}$. Сетка укладывается в горизонтальном положении, не меняя своей первоначальной формы как показано на [Рисунке 1](#).

Таблица 1

Программа испытаний образцов цилиндрической формы с несвязным грунтом


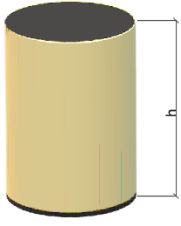
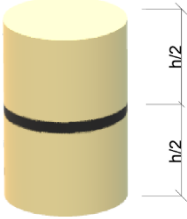
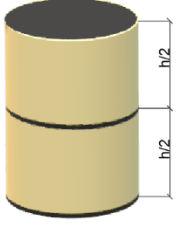
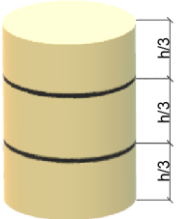
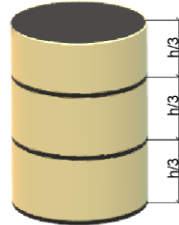
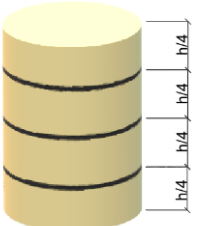
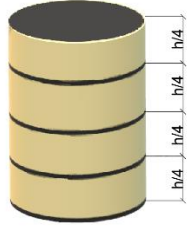
Название образца	Без геосеток по границам	С геосетками по границам
Без геосеток		
С 1 геосеткой		
С 2 геосетками		
С 3 геосетками		


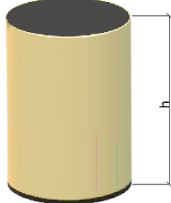
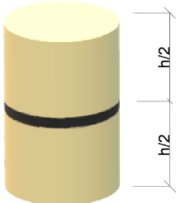
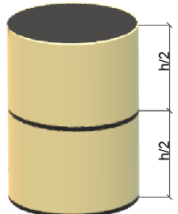
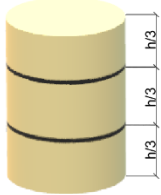
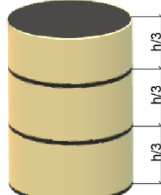


Рисунок 1 – Процесс подготовки образца для испытаний (материал авторов).

3.2 ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ СО СВЯЗНЫМ ГРУНТОМ

Таблица 2

Программа испытаний образцов цилиндрической формы с связным грунтом

	Без геосеток по границам	С геосетками по границам
Без геосеток		
С 1 геосеткой		
С 2 геосетками		

Для проведения исследований использовался псевдосвязный материал, которых получен как композит пылеватого песка, веретенного масла и резиновой крошки. Все образцы композитного материала изготавливаются в лаборатории. Для подготовки материала использовали песок пылеватый естественной влажности, резиновая крошка в количестве 10-15% и веретенное масло 8-10% от объема итоговой смеси. Образец нарушенного состояния имеет плотность $1,89 \text{ г/см}^3$ и естественную влажность $w=6.8\%$. В соответствии с результатами испытаний на гранулометрический состав, песок представляют собой пылеватый песок согласно ГОСТ 25100-2011. По гранулометрическому можно понять, что в испытании был использован песок с размерами частиц $d=0.10\text{мм}$. В ходе подготовки образца добавляем в песок резиновую крошку объемом 10% от объема песка. Также добавляем 180мл веретенного масла в подготовленную смесь. Далее следует подготовить песок определенной массы для получения плотности $\rho=1,89\text{г/см}^3$. Затем материал уплотняется в разъемной форме высотой 20 см, диаметром 10 см. После готовности образца, разъемная форма извлекается. Впоследствии, образец фиксируется, и вертикальная нагрузка прикладывается ступенями, до разрушения образца согласно ГОСТ 12248.3-2020.


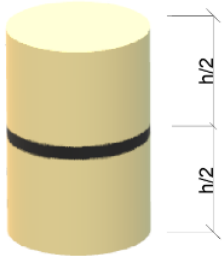
Для подготовки образца упрочненного геосетками применяется аналогичная методика. Геосетка используется во время уплотнения в соответствии с программой испытаний в таблице.

Геосетка для исследований использовалась в упрощенном варианте. Изготавливалась под диаметр образца $d=10\text{см}$. Должна укладываться в горизонтальном положении, не теряя своей формы.

3.3 ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НА СДВИГОВОМ ПРИБОРЕ

Таблица 3

Программа испытаний образцов цилиндрической формы в сдвиговом приборе

Вариант, №	1	2
Описание испытаний	Без геосетки	С 1 геосеткой посередине
Иллюстрация		

Сдвиговой прибор (срезающий прибор) используется для определения прочностных характеристик всех видов грунтов, таких как угол внутреннего трения и сцепление. Этот метод является важным в геотехнической инженерии для оценки устойчивости грунтовых массивов и проектирования различных инженерных сооружений. Основные компоненты сдвигового прибора включают срезающую коробку, систему загрузки, механизм сдвига и датчики нагрузки и деформации. Срезающая коробка состоит из двух половин, в которых размещается образец грунта: верхняя половина подвижна относительно нижней. Система загрузки используется для приложения вертикальной нагрузки к образцу, механизм сдвига обеспечивает горизонтальное перемещение верхней половины срезающей коробки относительно нижней, а датчики измеряют вертикальную нагрузку, горизонтальную силу сдвига и деформации образца (Болдырев, Г. Г. 2014)

Процедура испытания согласно программе испытаний (Таблица 3). начинается с отбора проб песчаного грунта с места проведения испытаний и изготовления образцов путем трамбовки или прессования в срезающей коробке. Образец грунта помещается в срезающую коробку и уплотняется для достижения необходимой плотности. Затем к образцу прикладывается вертикальная нагрузка с помощью системы загрузки, моделирующая давление вышележащих слоев грунта. Верхняя половина срезающей коробки начинает перемещаться горизонтально относительно нижней половины с постоянной скоростью, создавая сдвиговое напряжение в образце. В процессе испытания постоянно измеряются вертикальная нагрузка, горизонтальная сила сдвига и деформации образца, а данные фиксируются автоматически при помощи датчиков и регистрирующего устройства. Испытания в кинематическом режиме нагружения позволяют получить параметры, характеризующие пиковую и остаточную прочность грунта (Мирный А. Ю., 2021).

Анализ данных включает построение графиков зависимости касательного напряжения от горизонтальной деформации и определение предельного касательного напряжения, при котором происходит разрушение образца. Из результатов испытаний определяются основные параметры прочности грунта, такие как угол внутреннего трения и сцепление, используя уравнение предельного состояния Мора-Кулона. Испытание сдвиговым прибором является важным инструментом в геотехнической инженерии для определения прочностных характеристик песчаного грунта. Эти данные необходимы для проектирования и строительства различных инженерных сооружений, таких как фундаменты, насыпи, подпорные стенки и другие конструкции, где важна оценка устойчивости грунтовых массивов.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

4.1 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ С НЕСВЯЗАННЫМ МАТЕРИАЛОМ

В первом варианте был испытан образец без использования геосеток. В результате выяснилось, что образец без геосеток способен выдержать груз весом $m=1.85$ кг. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $m=0,76$ кг.

Во втором варианте был испытан образец с использованием одной геосетки посередине. Геосетка размещалась ровно посередине, то есть на высоте $h=10$ см. Разрушающая нагрузка образца составляет $N=2.620$ кг. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=1,93$ кг.

В третьем варианте был испытан образец с использованием двух геосеток. Геосетки были размещены на высоте $h=6,66$ и $h=13,4$. Образец выдержал нагрузку весом $N=3.420$ кг. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=2,69$ кг (Таблицы 4,5).

Таблица 4

Испытание без геосеток по границам (1 испытания)

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	Без георешеток	20	10	1,89	1,85
2	С 1 георешеткой	20	10	1,89	2,62
3	С 2 георешетками	20	10	1,88	3,42
4	С 3 георешетками	20	10	1,88	4,62

Таблица 5

Испытание без геосеток по границам (2 испытания)

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	Без георешеток	20	10	1,72	0,76
2	С 1 георешеткой	20	10	1,83	1,93
3	С 2 георешетками	20	10	1,77	2,69
4	С 3 георешетками	20	10	1,84	3,69

Таблица 6

Испытание с геосетками по границам (1 испытания)

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	С георешеткой сверху и снизу	20	10	1,89	1,85
2	С 1 георешеткой, сверху и снизу	20	10	1,88	2,62
3	С 2 георешетками, сверху и снизу	20	10	1,85	3,62
4	С 3 георешетками, сверху и снизу	20	10	1,86	4,62

Таблица 7

Испытание с геосетками по границам (2 испытания)

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	С георешеткой сверху и снизу	20	10	1,70	0,83
2	С 1 георешеткой, сверху и снизу	20	10	1,67	2,31
3	С 2 георешетками, сверху и снизу	20	10	1,73	3,31
4	С 3 георешетками, сверху и снизу	20	10	1,89	6,70

В четвертом варианте испытаний был образец с тремя геосетками. Геосетки размещались на высоте $h=5\text{см}$, $h=10\text{см}$, $h=15\text{см}$. Разрушающая нагрузка составляет $N=4,620\text{кг}$. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=3,69\text{кг}$.

В пятом варианте испытаний был образец с геосетками по границам, то есть геосетка размещалась снизу и сверху. В результате выяснилось, что образец без геосеток способен выдержать груз весом $N=1,858\text{кг}$. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=0,83\text{кг}$

В шестом варианте был испытан образец с геосетками по границам и посередине. Геосетка размещалась снизу образца, на высоте $h=10\text{см}$, также сверху. Образец был разрушен при нагрузке весом $N=2,620\text{кг}$. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=2,31\text{кг}$.

В седьмом варианте был испытан образец с использованием двух геосеток и геосеток по границам. Геосетки размещались в том же порядке, что при третьем варианте испытаний. Разрушающая нагрузка составляет $N=3,620\text{кг}$. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=3,31\text{кг}$

В последнем, восьмом варианте испытаний был образец с 3 геосетками и геосетками по границам. Геосетки размещались в том же порядке, что и в четвертом варианте испытаний. Образец выдержал нагрузку весом $N=4,620\text{кг}$. Во втором варианте результат показал предел разрушающей нагрузки $N=6,70\text{кг}$ (Таблицы 6,7).

В графическом виде результаты испытаний указаны на **Рисунках 2-9**.

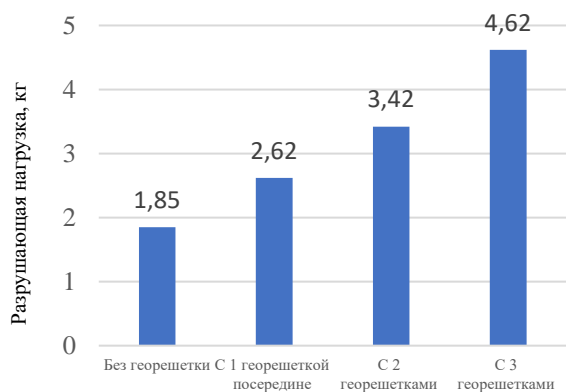


Рисунок 2 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка без геосеток по границам (1- испытания) (материал авторов)

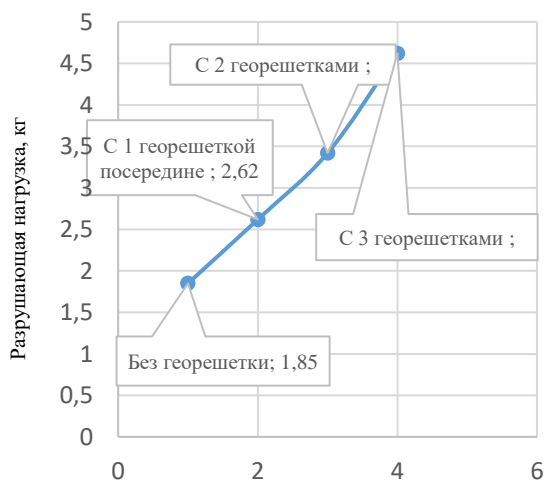


Рисунок 4 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка без геосеток по граница (1 испытания) (материал авторов)

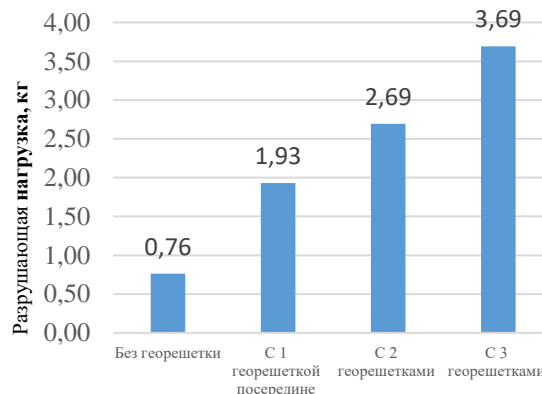


Рисунок 3 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка без геосеток по границам (2 испытания) (материал авторов)

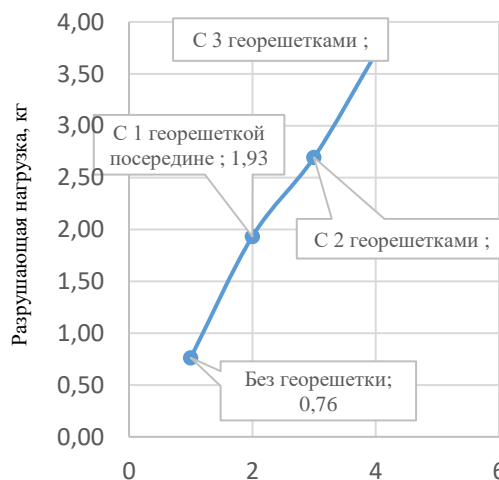


Рисунок 5 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка без геосеток по границам (2 испытания) (материал авторов)

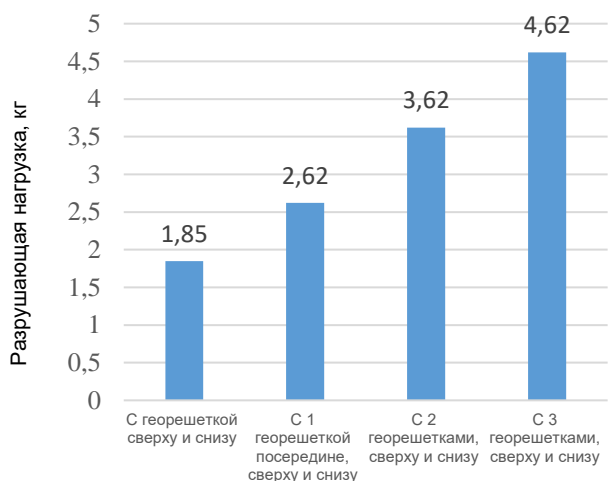


Рисунок 6 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка с геосетками по границам (1 испытания) (материал авторов)

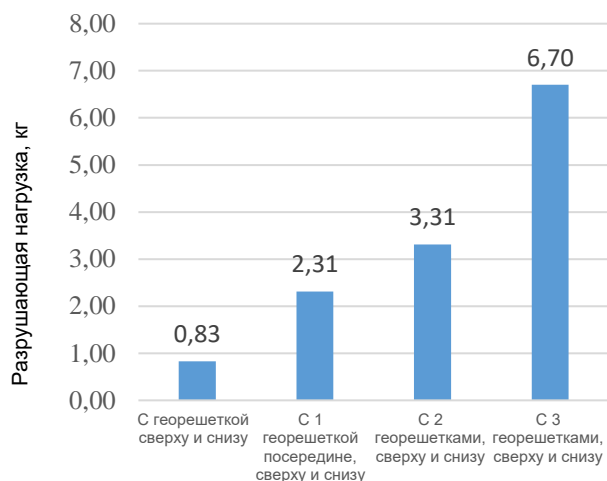


Рисунок 7 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка с геосетками по границам (2 испытания) (материал авторов)

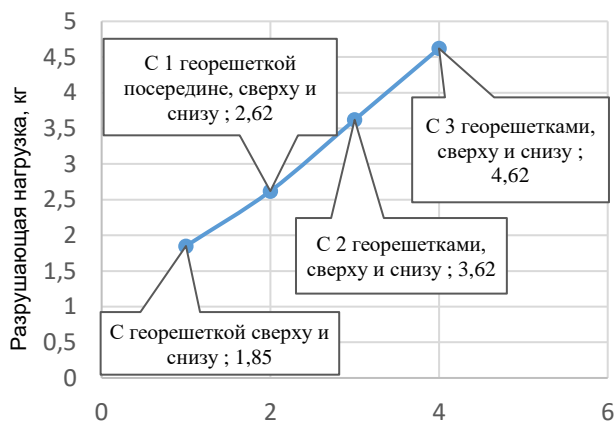


Рисунок 8 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка с геосетками по границам (1 испытания) (материал авторов)

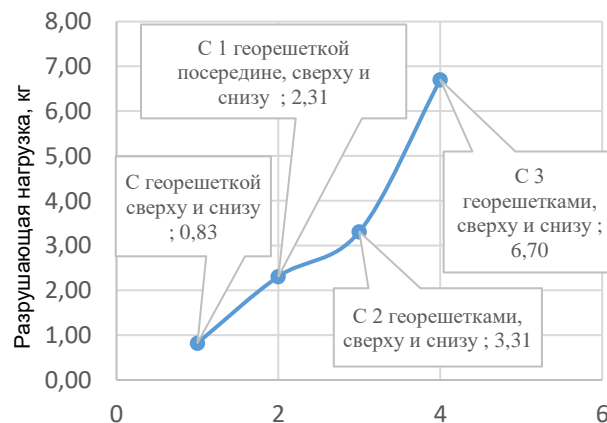


Рисунок 9 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка с геосетками по границам (2 испытания) (материал авторов)

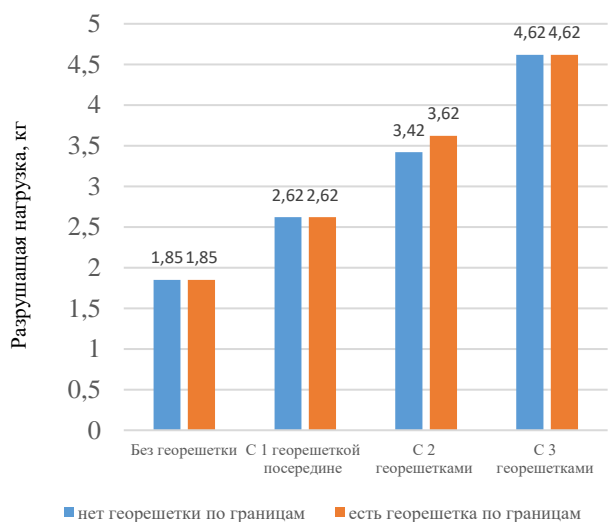


Рисунок 10 – Сравнительный график испытаний с геосетками и без (1 испытания) (материал авторов)

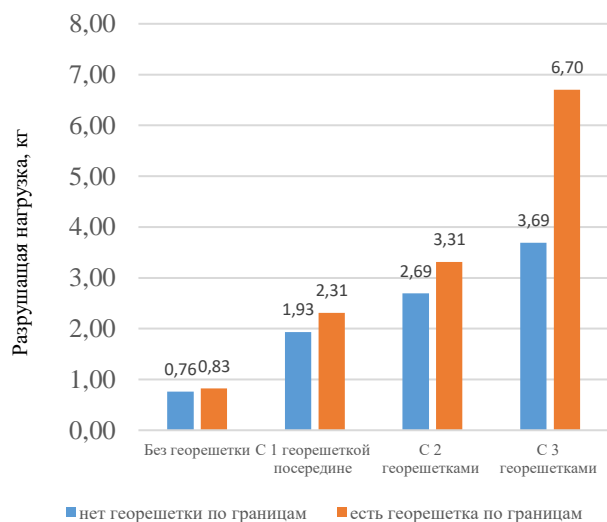


Рисунок 11 – Сравнительный график испытаний с геосетками и без (2 испытания) (материал авторов)

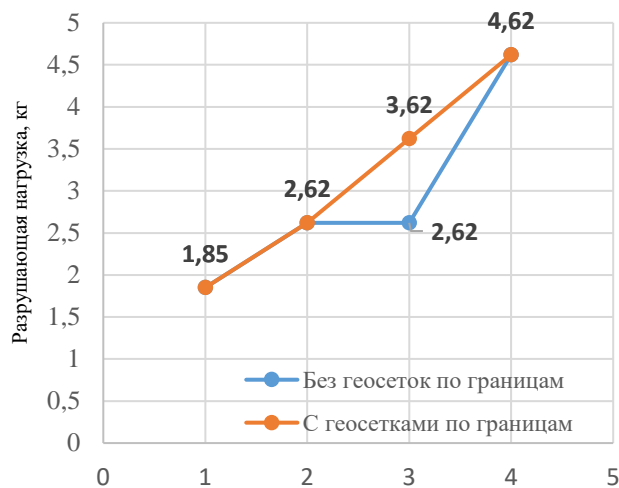


Рисунок 12 – Сравнительный график испытаний с геосетками и без (1 испытания) (материал авторов)

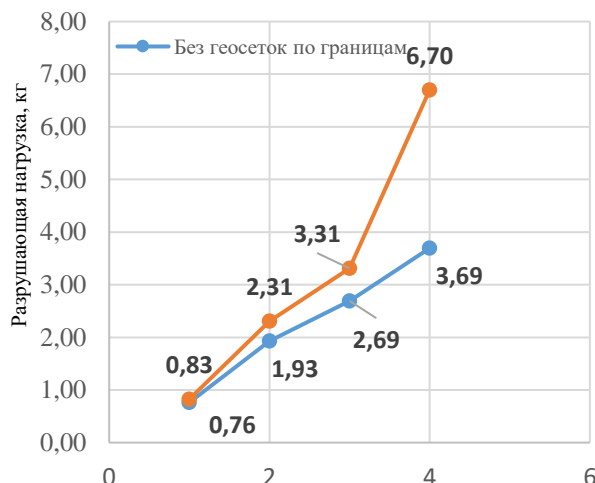


Рисунок 13 – Сравнительный график испытаний с геосетками и без (2 испытания) (материал авторов)

Исследование составляло 8 вариантов испытаний согласно программе. Кратность проведения испытаний составляла не менее два раза. В результате испытаний было выявлено, что при отсутствии геосетки по границам образца прочности повышается на 149,7% в первом варианте, на 385% во втором варианте. Испытания с использованием геосеток по торцам образца показали следующие результаты: в первом варианте процент прочности повышается на 151%, во втором варианте – на 707%. Из чего следует сделать вывод, что благодаря геосеткам по границам процент прочность повышается. Сравнительный анализ в графическом виде представлен на **Рисунках 10-13**.

В ходе испытаний было выявлено, что геосетки играют важную роль в формировании прочности образца. Кроме того, использование геосеток способствует снижению деформативности и разрушению под воздействием вертикальных нагрузок. Присутствие геосетки способствуют более равномерному распределению нагрузки, предотвращая образование колеи и трещин (**Рисунки 14,15**).

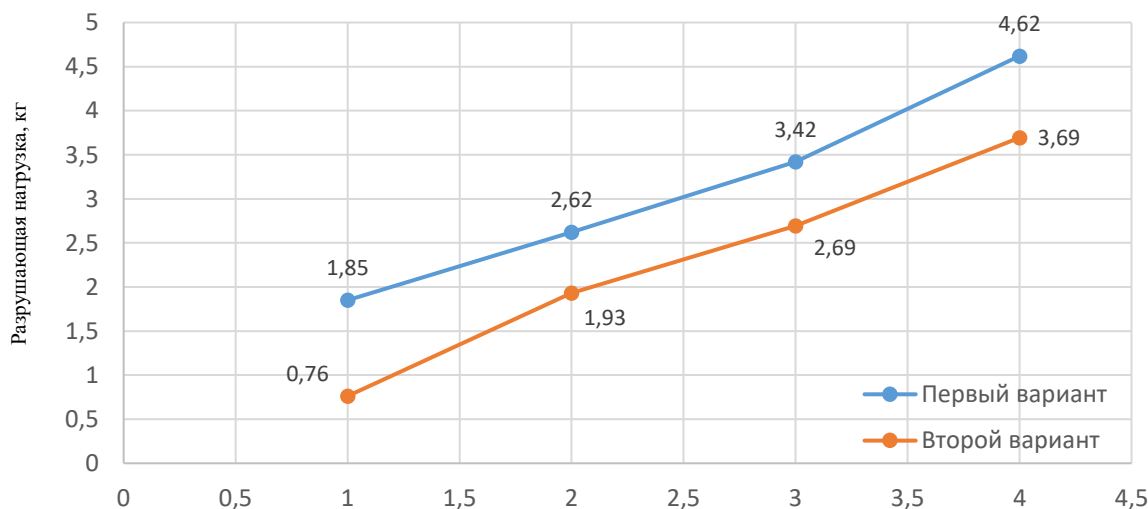


Рисунок 14 – Сравнительный график результатов испытаний двух вариантов без геосеток по границам (материал авторов)

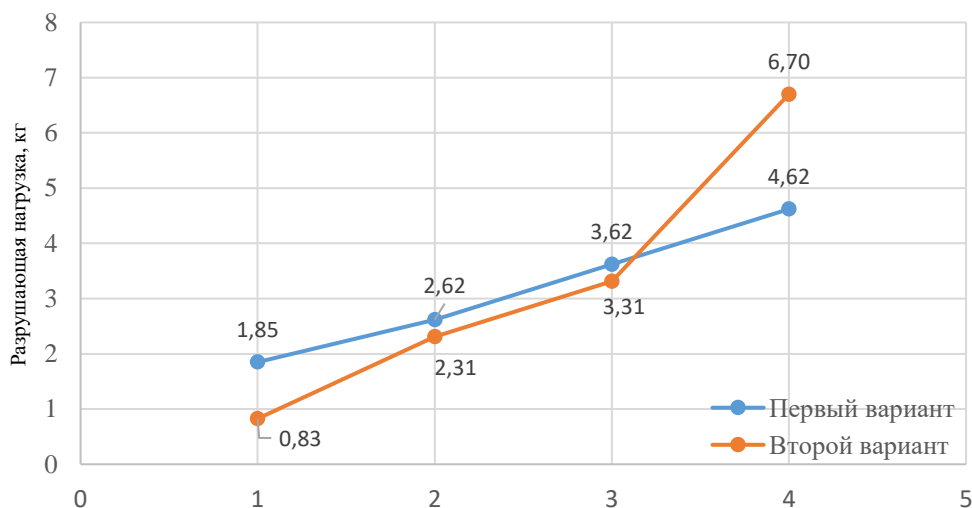


Рисунок 15 – Сравнительный график результатов испытаний двух вариантов с геосеткой по границам (материал авторов)

Результаты испытаний показали, что применение геосеток повышает прочность грунта. В первом испытании без использования геосеток максимальное значение разрушающей нагрузки упрочненного грунта оказалось близким к теоретическому. Из чего можно заключить: применение геосеток в дорожном и гражданском строительстве повышает прочность грунта и способствует применению более эффективных решений в процесс упрочнения грунтов в строительстве.

Данный упрочняющий материал требует дальнейших исследований в применения в гражданском строительстве.

4.2 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ СО СВЯЗНЫМ МАТЕРИАЛОМ

В первом варианте был испытан образец без использования геосеток. В результате выяснилось, что образец без геосеток способен выдержать груз весом $N=2,0$ кг (Таблица 10).

Во втором варианте был испытан образец с использованием одной геосетки посередине. Геосетка размещалась ровно посередине, то есть на высоте $h=10$ см. Разрушающая нагрузка образца составляет $N=2,60$ кг (Таблица 10).

В третьем варианте был испытан образец с использованием двух геосеток. Геосетки были размещены на высоте $h=6,66$ и $h=13,4$. Образец выдержал нагрузку весом $N=3,0$ кг (Таблица 10).

В четвертом варианте испытаний был образец с геосетками по границам, то есть геосетка размещалась снизу и сверху. В результате выяснилось, что образец без геосеток способен выдержать груз весом $N=2,0$ кг (Таблица 11).

В пятом варианте был испытан образец с геосетками по границам и посередине. Геосетка размещалась снизу образца, на высоте $h=10$ см, также сверху. Образец был разрушен при нагрузке весом $N=2,70$ кг (Таблица 11).

Таблица 10

Испытание без геосеток по границам

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	Без георешеток	20	10	1,89	2,0
2	С 1 георешеткой посередине	20	10	1,89	2,6
3	С 2 георешетками	20	10	1,88	3,0

Таблица 11

Испытание с геосетками по границам

№	Описание испытания	Высота, см	Диаметр, см	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг
1	С георешеткой сверху и снизу	20	10	1,89	2,0
2	С 1 георешеткой, сверху и снизу	20	10	1,88	2,7
3	С 2 георешетками, сверху и снизу	20	10	1,85	3,2

В шестом варианте был испытан образец с использованием двух геосеток и геосеток по границам. Геосетки размещались в том же порядке, что при третьем варианте испытаний. Разрушающая нагрузка составляет $N = 3,2$ кг (Таблица 11). На Рисунках 16 и 17 указаны результаты испытаний в графическом виде.

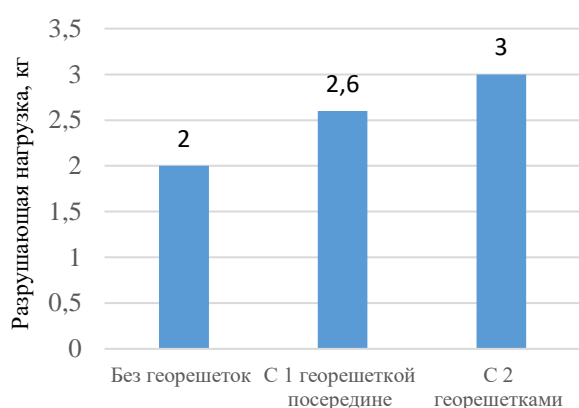


Рисунок 16 - Результаты испытаний: разрушающая нагрузка без геосеток по границам (1 испытания) (материал авторов)

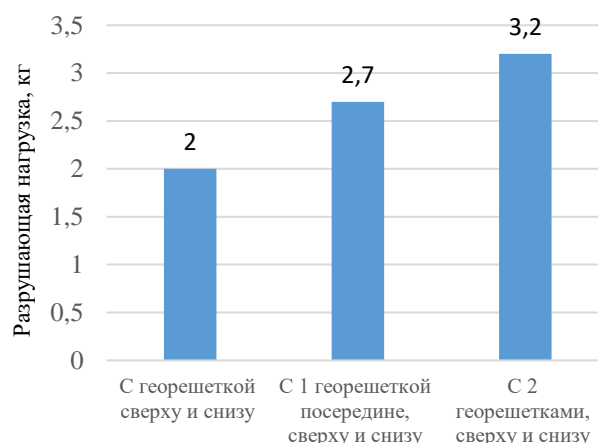


Рисунок 17 – Результаты испытаний: разрушающая нагрузка с геосетками по границам (2 испытания) (материал авторов)

Проведенные исследования показывают, что наличие георешеток по краям конструкции не оказывает значительного влияния на её упрочнение при отсутствии георешеток в середине. При использовании одной георешетки, размещенной в середине конструкции, эффект упрочнения остается минимальным, независимо от наличия георешеток по краям. Существенный рост разрушающей нагрузки (на 15%) наблюдается только при использовании двух георешеток, расположенных в середине конструкции. Таким образом, небольшая разница в упрочнении наблюдается лишь при наличии или отсутствии георешеток по краям, тогда как ключевым фактором является наличие двух георешеток в середине (Рисунок 18)

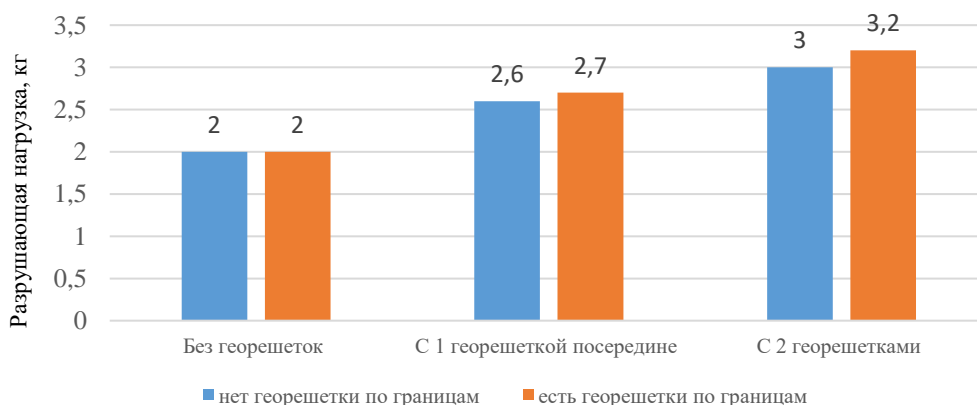


Рисунок 18 – Результаты испытаний: сравнение испытаний без георешеток по границам и с георешетками по границам (материал авторов)

4.3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ НА СДВИГОВОМ ПРИБОРЕ

В испытании используется псевдосвязный грунт, состав которого описан был ранее. Для упрочнения данного образца используется геосетка с ячейками 5x5 мм и размерами в плане не более диаметра испытуемого образца. Исследование составляло 6 вариантов испытаний.

Таблица 12

Результаты испытания на одноплоскостной срез

Описание испытаний	Без геосетки	С одной геосеткой посередине
Угол внутреннего трения, φ (полная)	31,1	29,3
Угол внутреннего трения, φ (остаточная)	32,8	31,2
Сцепление, с кПа (полная)	38,23	17,9
Сцепление, с кПа (остаточная)	28,08	8,33

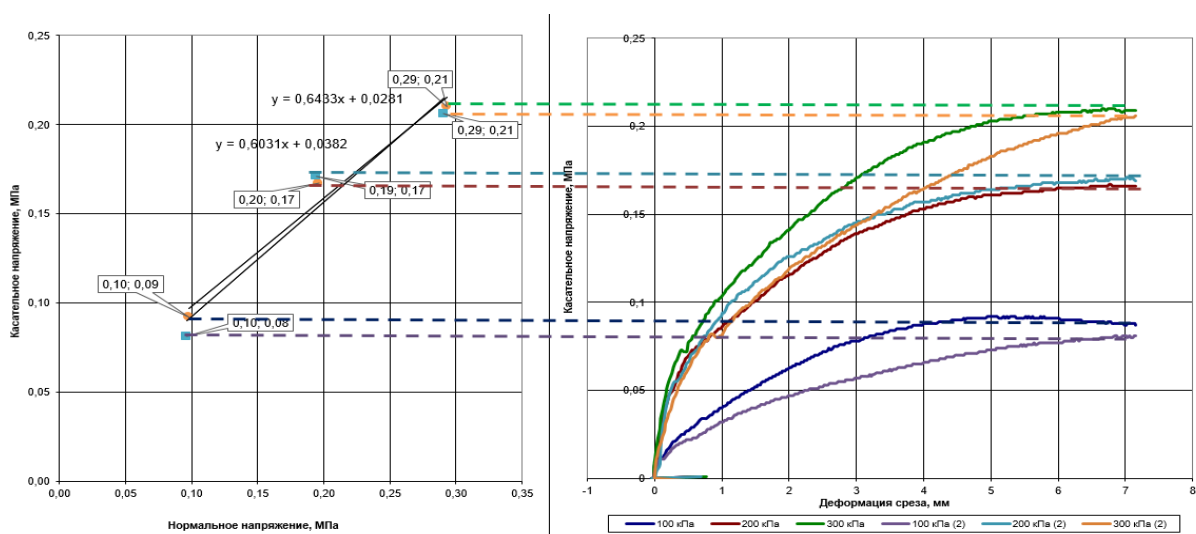


Рисунок 19 – Результаты испытаний на одноплоскостной срез в образце без использования геосеток (материал авторов)

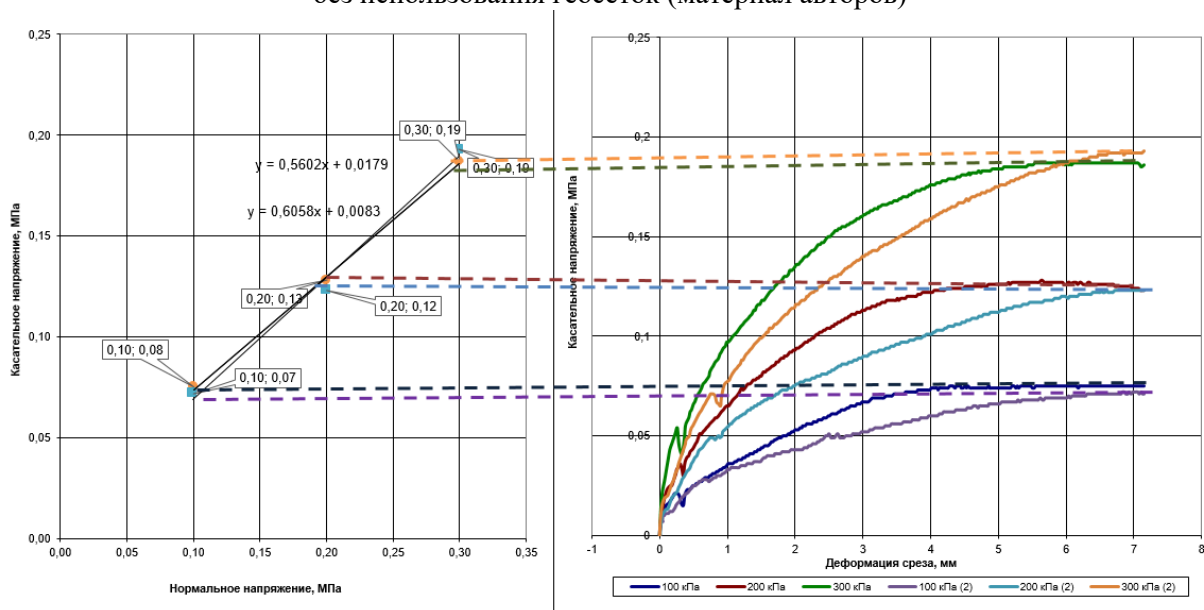


Рисунок 20 – Результаты испытаний на одноплоскостной срез в образце с использованием геосетки (материал авторов)

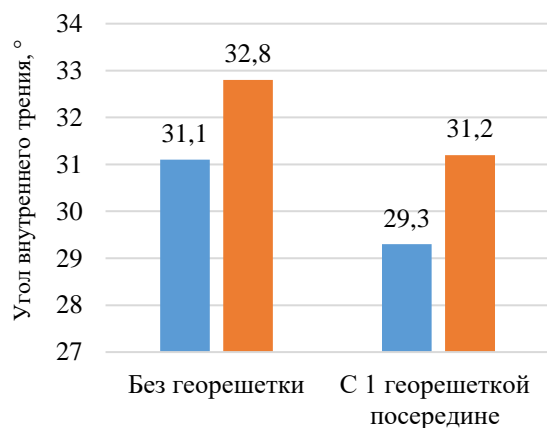


Рисунок 21 – Угол внутреннего трения грунта (материал авторов)

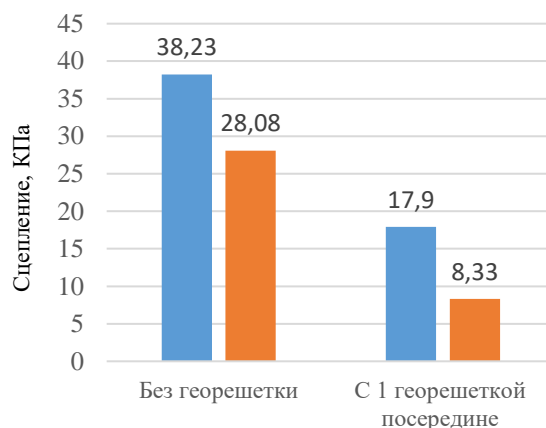


Рисунок 22 – Сцепление грунта (материал авторов)

По результатам испытаний отмечено, что использование 1 геосетки посередине дает разницу в 1,3 раза.

В результате испытаний было выявлено, что без геосетки сцепление и угол внутреннего трения равны $C=38,23$ кПа, $\phi=31,1^\circ$, при использовании геосетки посередине в горизонтальном положении значение сцепления и угла внутреннего трения меняется на $C=17,9$ кПа, $\phi=29,3^\circ$. Такое снижение сопротивления сдвигу закономерно, поскольку в плоскости сдвига присутствует разделительный слой в виде сетки согласно ГОСТ 12248.1-2020.

Данный метод упрочнения основания требует дальнейших исследований в части количества слоев геоматериалов, применяемых для при упрочнении грунта.

5 ВЫВОДЫ

Использование геосинтетических материалов для повышения несущей способности слабых грунтов является перспективным методом, обеспечивающим улучшение прочностных характеристик и снижение деформируемости засыпки. Испытания для рыхлого песка и псевдосвязного грунта показали, что добавление геосеток по границам и их сочетание с внутренними слоями геосеток приводит к улучшению прочности образцов. Наибольший эффект достигается при использовании двух или трёх геосеток, что подтверждает эффективность данного подхода.

В первом испытании на рыхлом песке добавление геосеток по границам показало ограниченный эффект, однако их комбинация с внутренними геосетками значительно увеличила разрушающую нагрузку, особенно при применении трёх геосеток. Во втором испытании прочность также заметно возросла при использовании трёх геосеток, что демонстрирует улучшение свойств грунта за счёт армирования.

Испытания на псевдосвязном грунте показали, что добавление одной геосетки посередине незначительно улучшает прочность образца, тогда как комбинация с геосетками по границам приводит к увеличению разрушающей нагрузки. При использовании двух геосеток внутри и геосеток по границам наблюдалось дальнейшее улучшение прочностных характеристик.

Таким образом, применение геосеток по границам в сочетании с внутренними слоями позволяет достичь значительного повышения прочности, особенно в комбинации с двумя или тремя геосетками. Однако, использование геосеток также сопровождается снижением сцепления и угла внутреннего трения, что требует дальнейших исследований для оптимизации их конструкции и расположения. Это позволит достичь оптимального соотношения между повышением прочности и снижением деформируемости оснований при использовании геосинтетических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shukla, S. K.** (2016). An introduction to geosynthetic engineering. CRC Press/Balkema P.O. Box 11320, 2301 EH Leiden, The Netherlands, pp. 449. <https://doi.org/10.1201/b21582>
2. **Shukla, S.K., Yin, J.H.** (2016). Fundamentals of geosynthetic engineering. Taylor & Francis e-Library, pp. 403. <https://doi.org/10.1201/9781482288445>
3. **Li, G., Chen, Y., Tang, X.** (2008). Geosynthetics in civil and environmental engineering. geosynthetics Asia. Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics in Shanghai, China, 289. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-69313-0>
4. **Cook, D.I.** (2003). Geosynthetics. iSmithers Rapra Publishing, pp. 120 <https://www.google.kz/books/edition/Geosynthetics/59ZTAMX0f0cC?hl=ru&gbpv=0>
5. **G.P.T.M.van Santvoort** (2017). Geosynthetics in Civil Engineering, pp. 116 <https://doi.org/10.1201/9780203753378>
6. **Boldyrev, G.G.** (2014). Methods for determining the mechanical properties of soils [Metody opredeleniya mekhanicheskikh svojstv gruntov] <https://clck.ru/3DNw3m> (In Russ.).
7. **Mirny, A.Y.** (2021). Axisymmetric triaxial compression in the practice of engineering surveys [Jsesimmetrichnoe trekhosnoe szhatie v praktike inzhenernyh izyskanij]. Moscow, Russia. clck.ru/3DTBEr (In Russ.).
8. **Alotaibi, E., Omar, M., Shanableh, A., Zeiada, W., Fattah, M.Y., Tahmaz, A., Arab, M.G.** (2021). Geogrid bridging over existing shallow flexible PVC buried pipe – Experimental study. Tunnelling and Underground Space Technology, 113. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103945>
9. **Cuelho, E.V., Perkins, S.W., Maubeuge, K.** (2011). Full-scale field study of geosynthetics used as subgrade stabilization. Advances in Geotechnical Engineering, [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)481](https://doi.org/10.1061/41165(397)481)
10. **Hasen, N.A., Abbas, J.K.** (2024). Experimental study of shallow foundation settlement under dynamic load in reinforced sandy soil. Proceedings on Engineering Sciences, 6 (1). <https://doi.org/10.24874/PES06.01.019>
11. **Maegawa, K., Yokota, T., Van, P T.** (2011). Experiments on rockfall protection embankments with geogrids and cushions. International Journal of GEOMATE, 1 (1), 19-24. <https://doi.org/10.21660/2011.1e>
12. **Razeghi, H.R., Ensani, A.** (2023). Clayey sand soil interactions with geogrids and geotextiles using large-scale direct shear tests. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 9 (2). <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00443-0>
13. **Sadat Taghavi, S.H., Mosallanezhad, M.** (2017). Experimental analysis of large-scale pullout tests conducted on polyester anchored geogrid reinforcement systems. Canadian Geotechnical Journal, 54 (5). <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0365>
14. **Tatliso, N., Edil, T.B., Benson, C.H.** (1998). Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124 (11). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(1998\)124:11\(1109\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(1998)124:11(1109))
15. **Zakarka, M., Skuodis, Š., Dirgėlienė, N.** (2023). Triaxial test of coarse-grained soils reinforced with one layer of geogrid. Applied Sciences (Switzerland), 13 (22). <https://doi.org/10.3390/app132212480>
16. **Zhao, Y., Xu, D., Liu, H.** (2018). Study of interaction behavior between geogrids and sand with simple shear test. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2016.0687>

UDC 699.841
IRSTI 67.11.03
RESEARCH ARTICLE

THE PROSPECT OF USING GEOTECHNICAL SEISMIC INSULATION MADE OF GRUNTOSILICATE TO PROTECT ARCHITECTURAL MONUMENTS

S.E. Nietbay^{1,2} , E.T. Besimbaev¹ , T. Awwad^{2,3} , A.M. Kuanyshbay^{2,*} 

¹Satbayev University, 050013, Almaty, Kazakhstan

²International Educational Corporation, 050043, Almaty, Kazakhstan

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 190031, Saint Petersburg, Russia

Abstract. *The article explores the prospects of utilizing geotechnical seismic insulation made from gruntosilicate to protect architectural monuments from seismic influences. It highlights the advantages of this technology, including the preservation of the integrity and authenticity of historical buildings, minimal interference with their original construction, and the durability of the materials used. The article outlines the primary methods and technologies of seismic insulation, such as insulating layers, dampers, and shock-absorbing materials. Additionally, it provides examples of successful applications of seismic insulation in various historical buildings. The importance of adopting modern technologies to safeguard cultural heritage in regions with heightened seismic activity is emphasized throughout the discussion. The primary aim of the article is to demonstrate the effectiveness of geotechnical seismic insulation in preserving architectural heritage. Experimental studies have shown that gruntosilicate, when used as a seismic insulation material, significantly reduces the amplitude of seismic vibrations, thereby enhancing the safety and longevity of buildings. The article posits that geotechnical seismic insulation represents a promising approach in earthquake-resistant construction, necessitating an integrated approach that takes into account technical, economic, and geological factors. This research underscores the potential of this technology to provide sustainable solutions for the protection of cultural heritage in seismically active regions.*

Keywords: *geotechnical seismic insulation, ground silicate, protection of architectural monuments, laboratory experiments, standard sealing device, accelerometer, oscillation amplitude.*

***Corresponding author**

Kuanyshbay Aidana, e-mail: a.kuanyshbay@mok.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-10>

Received 23 May 2024; Revised 12 July 2024; Accepted 23 August 2024

ӘОЖ 699.841
ҒТАМР 67.11.03
ҒЫЛЫМИ МАҚАЛА

СӘУЛЕТ ЕСКЕРТКІШТЕРІН ҚОРҒАУ ҮШІН ТОПЫРАҚ СИЛИКАТЫНАН ГЕОТЕХНИКАЛЫҚ СЕЙСМИКАЛЫҚ ОҚШАУЛАУҒЫШТАРДЫ ҚОЛДАНУ ПЕРСПЕКТИВАСЫ

С.Е. Ниетбай^{1,2} , Е.Т. Бесимбаев¹ , Т. Аввад^{2,3} , А.М. Қуанышбай^{2,*} 

¹Сәтпаев университет, 050013, Алматы, Қазақстан

²Халықаралық білім беру корпорациясы, 050043, Алматы, Қазақстан

³Император I Александр атындағы Петербург мемлекеттік қатынас жолдары университеті, 190031, Санкт-Петербург, Ресей

Аңдатпа. Мақалада сәулет ескерткіштерін сейсмикалық әсерлерден қорғау үшін, топырақ силикатынан орындалған геотехникалық сейсмикалық оқшаулауды қолдану перспективалары қарастырылады. Бұл технологияның артықшылықтарына, соның ішінде тарихи құрылымдардың тұтастығы мен түпнұсқалығын сақтауға, олардың дизайнына минималды араласуға және қолданылатын материалдардың беріктігіне ерекше назар аударылады. Оқшаулағыш қабаттар мен амортизациялық материалдар сияқты сейсмикалық оқшаулаудың негізгі әдістері мен технологиялары сипатталған. Әр түрлі тарихи ғимараттарда сейсмикалық оқшаулауды сәтті қолдану мысалдары келтірілген. Мақалада сейсмикалық белсенділіктің жоғарылауына байланысты, мәдени мұраны қорғау үшін заманауи технологияларды қолданудың маңыздылығы көрсетіледі. Мақаланың мақсаты - архитектуралық мұраны сақтау үшін геотехникалық сейсмикалық оқшаулаудың тиімділігін көрсету. Эксперименттік зерттеулер сейсмикалық оқшаулағыш материал ретінде қолданылатын топырақ силикаттың сейсмикалық тербелістердің амплитудасын айтарлықтай төмендететінін көрсетті, бұл ғимараттардың қауіпсіздігі мен беріктігін арттырады. Геотехникалық сейсмикалық оқшаулау кешенді тәсілді және техникалық, экономикалық және геологиялық факторларды ескеруді талап ететін жер сілкінісіне төзімді құрылыстағы перспективалы бағыт болып табылады.

Түйін сөздер: геотехникалық сейсмикалық оқшаулау, топырақ силикат, сәулет ескерткіштерін қорғау, зертханалық тәжірибелер, стандартты тығыздау құралы, акселерометр, тербеліс амплитудасы.

*Автор-корреспондент

Қуанышбай Айдана, e-mail: a.kuanyshbay@mok.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-10>

Алынды 23 мамыр 2024; Қайта қаралды 12 шілде 2024; Қабылданды 23 тамыз 2024

УДК 699.841
МРНТИ 67.11.03
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ИЗ ГРУНТОСИЛИКАТА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ

С.Е. Ниетбай^{1,2} , Е.Т. Бесимбаев¹ ,
Т. Аввад^{2,3} , А.М. Куанышбай^{2,*} 

¹Сатпаев университет, 050013, Алматы, Казахстан

²Международная образовательная корпорация, 050043, Алматы, Казахстан

³Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы применения геотехнической сейсмоизоляции из грунтосиликата для защиты памятников архитектуры от сейсмических воздействий. Особое внимание уделяется преимуществам данной технологии, включая сохранение целостности и аутентичности исторических сооружений, минимальное вмешательство в их конструкцию и долговечность используемых материалов. Описаны основные методы и технологии сейсмоизоляции, такие как изоляционные слои и демпферы, амортизирующие материалы. Приведены примеры успешного применения сейсмоизоляции в различных исторических зданиях. Статья подчеркивает важность использования современных технологий для защиты культурного наследия в условиях повышенной сейсмической активности. Цель статьи – продемонстрировать эффективность геотехнической сейсмоизоляции для сохранения архитектурного наследия. Экспериментальные исследования показали, что грунтосиликат, используемая в качестве сейсмоизоляционного материала, значительно снижает амплитуду сейсмических колебаний, что повышает безопасность и долговечность зданий. Геотехническая сейсмоизоляция представляет собой перспективное направление в сейсмостойком строительстве, требующее комплексного подхода и учета технических, экономических и геологических факторов.

Ключевые слова: геотехническая сейсмоизоляция, грунтосиликат, защита памятников архитектуры, лабораторные эксперименты, прибор стандартного уплотнения, акселерометр, амплитуда колебаний.

*Автор-корреспондент
Куанышбай Айдана, e-mail: a.kuanyshbay@mok.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-10>

Поступила 23 мая 2024 г.; Пересмотрено 12 июля 2024 г.; Принято 23 августа 2024 г.

ACKNOWLEDGEMENTS / SOURCE OF FUNDING

The authors express their gratitude to the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for their support and funding for the work carried out within the framework of the PCF BR21882292 on the topic: "Integrated development of the sustainability of the construction industry: innovative technologies, production optimization, efficient resource use, and the creation of a technological park."

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest

АЛҒЫС / ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Авторлар Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетіне «Құрылыс саласының тұрақтылығын интеграцияланған дамыту: инновациялық технологиялар, өндірісті оңтайландыру, ресурстарды тиімді пайдалану және технологиялық парк құру» тақырыбындағы ПЦФ BR21882292 шеңберінде жұмысты жүргізуге қолдау көрсеткені және қаржыландырылғаны үшін алғыс білдіреді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ / ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Авторы выражают благодарность Комитету науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан за поддержку и финансирования для проведения работы в рамках ПЦФ BR21882292 по теме: «Интегрированное развитие устойчивости строительной отрасли: инновационные технологии, оптимизация производства, эффективное использование ресурсов и создание технологического парка».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 КІРІСПЕ

Сәулет ескерткіштерін сейсмикалық әсерлерден қорғау, мәдени мұраны қорғау саласындағы маңызды міндеттердің бірі болып табылады. Әртүрлі дәуірлерде салынған және жиі бірегей материалдар мен құрылымдарды пайдаланатын тарихи ғимараттар мен құрылымдар жер сілкінісінің жойқын әсеріне осал. Жыл сайын осы құнды нысандарды болашақ ұрпақ үшін сақтауға мүмкіндік беретін тиімді әдістерді әзірлеу және енгізу қажеттілігі артып келеді (Tsang et al., 2021).

2 ӘДЕБИЕТКЕ ШОЛУ

Геотехникалық сейсмикалық оқшаулау әртүрлі оқшаулау және демпферлік жүйелерді пайдалану арқылы ғимараттарды сейсмикалық толқындардан қорғаудың заманауи тәсілі болып табылады (Calvi et al., 2018). Бұл технологиялар ғимарат құрылымына берілетін тербелістердің амплитудасын едәуір азайтуға мүмкіндік береді, осылайша зақымдану қаупін азайтады. Бұл технологиялар ғимарат құрылымына берілетін тербелістердің амплитудасын едәуір азайтуға мүмкіндік береді, осылайша зақымдану қаупін азайтады. Көбінесе тарихи ғана емес, сонымен қатар мәдени құндылыққа ие сәулет ескерткіштері үшін бұл әдіс әсіресе өзекті, өйткені бұл олардың бастапқы құрылымын айтарлықтай өзгеріссіз сақтауға мүмкіндік береді (Dudchenko et al., 2021).

Геотехникалық сейсмикалық оқшаулаудың әртүрлі түрлері бар. Жақында ғалымдар осы жүйелердің материалдары мен мінездемесін егжей-тегжейлі зерттеді. Forcellini D. және Chiaro G ғалымдарының зерттеулерінде, көлемдік салмағы 10%, 25% және 40% резеңке және қиыршық тас қоспаларын қолдана отырып, геотехникалық сейсмикалық оқшаулау жүйелерінің жұмысы мен тиімділігі қарастырылды. Opensees-те базаның үдеуі мен жиілігінің өзгеруімен синусоидалы сейсмикалық әсерлерге ұшыраған элементтердің сандық модельдері жасалды (Forcellini et al., 2024).

Сондай-ақ, жаңа аз қабатты ғимараттар үшін экологиялық резеңке геотехникалық сейсмикалық оқшаулау жүйелері жасалды. Бұл геотехникалық сейсмикалық оқшаулаудың көлденең қабатын біріктіретін үнемді және тұрақты технология болып табылады. Қиыршық тас пен резеңке қоспаларынан жасалған және резеңке жабыны бар икемді бетон плитасының, сейсмикалық энергияның деформацияланатын шашырау сүзгісі зерттелген. Бұл зерттеулер геотехникалық сейсмикалық оқшаулау жүйелерін қолдану арқылы ғимараттарға сейсмикалық жүктемені (яғни ғимараттың жоғарғы қабатындағы ең жоғары үдеу, әр қабаттағы бүйірлікмешысу және базадағывигысу жүктемесі) айтарлықтай төмендетуге болатындығын көрсетеді (Chiaro et al., 2023).

Banovic I. мақаласында малта тастардан тұратын қабатының бірнеше параметрлерінің әсерін сейсмостендте зерттеді, мысалы қабаттың қалыңдығы, қиыршық тас тығыздығы, қиыршық тастардың ылғалдылығы, іргетас астындағы тік байланыс кернеуі және қайталанатын қозғалыс әсері. Әр параметр үшін сейсмикалық оқшаулағыш қабаттағы қатты ғимарат моделі төрт түрлі акселерограммаға ұшырады, топырақтың үдеуінің үш деңгейі қарастырылды (PGA), бұл жағдайда қабаттың барлық басқа параметрлері тұрақты болып қалды. Әрбір сынақ үшін сипаттамалық орын ауыстырулар мен үдеулер өлшенді (Banovic et al., 2019).

Jing L. жазған мақалада, құрылыс құрылымдарын жер сілкінісінің жойқын әсерінен қорғау үшін шыны шарлар мен құм жастықтарына негізделген геотехникалық сейсмикалық оқшаулау жүйесін зерттеді. Ғимараттың іргетасы мен негіз арасындағы оқшаулау жүйесі, шыны шарлар мен құм қабатынан тұратын материалын толтыруды қамтиды. Оқшаулау жүйесі бар және бір қабатты тас құрылымының моделін қолданатын сейсмостендте ауқымды сынақ жүргізілді. Бір қабатты тас құрылымының моделінің масштабы 1/4 болды. Кіріс толқыны ретінде Эль-Центро толқынының Солтүстік-Оңтүстік компоненті таңдалды, ол 1940 жылы тіркелген, сәйкесінше 0.1 g, 0.2 g және 0.4 G-ге реттелген кірістің ең жоғары үдеуімен қозғалады. Сынақ нәтижелері шағын жер сілкіністерінде жүйенің оқшаулау әсері жет-

кіліксіз екенін көрсетті, бірақ оқшаулау әсері жер сілкінісінің қарқындылығының жоғарылауымен күшейеді (Jing et al., 2020).

Zhang H. зерттеулерінде іргетас құрылымның астында геотехникалық сейсмикалық оқшаулағыш қабат ретінде қиыршық тас пен резеңке қоспаларын қолдану бойынша зертханалық тәжірибелер жүргізді. Зерттеу жұмыстарында, негіз топырағы ретінде қолданылатын қоспаның жалпы салмағына (0%, 10% және 30%) қатысты резеңкенің әртүрлі пропорцияларымен геотехникалық сейсмикалық оқшаулаудың үш түрлі құрамын қамтыды. Зертханалық зерттеулер көрсеткендей, резеңке құрамының жоғарылауы сдысу Модулінің төмендеуіне және демпферлік коэффициенттің жоғарылауына әкеледі (Zhang et al., 2023).

Геотехникалық сейсмикалық оқшаулағыштың басты артықшылығы оның бағасы. Сейсмикалық оқшаулаудың арзан технологияларын қолдану ғимараттар үшін жер сілкінісінің әсерін азайтудың негізгі әдісі болып табылады. Соңғы жылдары іргетас құрылымы мен негіз топырағы арасына, серпімділік модулі төмен материалдарды, геотехникалық сейсмикалық оқшаулағыш ретінде қолдану кең зерттеу, көп ғалымдардың қызығушылығын тудырды. Ғалымдар геотехникалық сейсмикалық оқшаулаудың екі арзан жүйесін ұсынады, бұл оқшаулағыштар құм қабат негізіндегі геотехникалық сейсмикалық оқшаулау жүйесін және шыны шарлар мен құмды қабаттан негізделген геотехникалық сейсмикалық оқшаулау жүйесін қамтиды (Yin et al., 2022).

Жергілікті жағдайларды ескере отырып, сейсмостендте ауқымды сынақтар жүргізу арқылы оқшаулау жүйесі бар және оқшаулау жүйесі жоқ, бір қабатты тас конструкциясының моделіне салыстырмалы сынақтар жүргізілді. Сейсмостенд сынақтарының нәтижелері ұсынылған екі арзан жүйе де құрылымдардың сейсмикалық реакциясын төмендетіп, оқшаулау мақсатына жетуі мүмкін екенін көрсетеді (Dhanya et al., 2023).

Геотехникалық сейсмикалық оқшаулау тәжірибесіне кіріспе қорғаныс жүйелерінің беріктігі мен сенімділігін қамтамасыз ететін инновациялық материалдар мен технологияларды пайдалануды қамтиды. Сондай ақ жер сілкінісіне төзімділікті бағалау үшін нақты тексерістер жүргізу қажет. Kilic G. мақаласында тарихи құрылыстарды қорғау үшін осы әдістерді қолдану перспективалары қарастырылады, олардың артықшылықтары мен кемшіліктері талданады, сонымен қатар әлемнің әртүрлі елдерінде сәтті жүзеге асырудың мысалдары келтірілген. Бұл әдістің сәтті қолдану мысалдары – Мәскеудегі Романовтар палатасын нығайту жобалары, ғимаратты қалпына келтіру кезінде дірілден қорғау үшін амортизациялық материалдар қолданылды. Лиссабондағы Белем мұнарасы, тарихи ғимарат жер сілкінісінің әсерін едәуір азайтуға мүмкіндік беретін сейсмикалық оқшаулау жүйесімен жабдықталған (Mikhail., 2011).

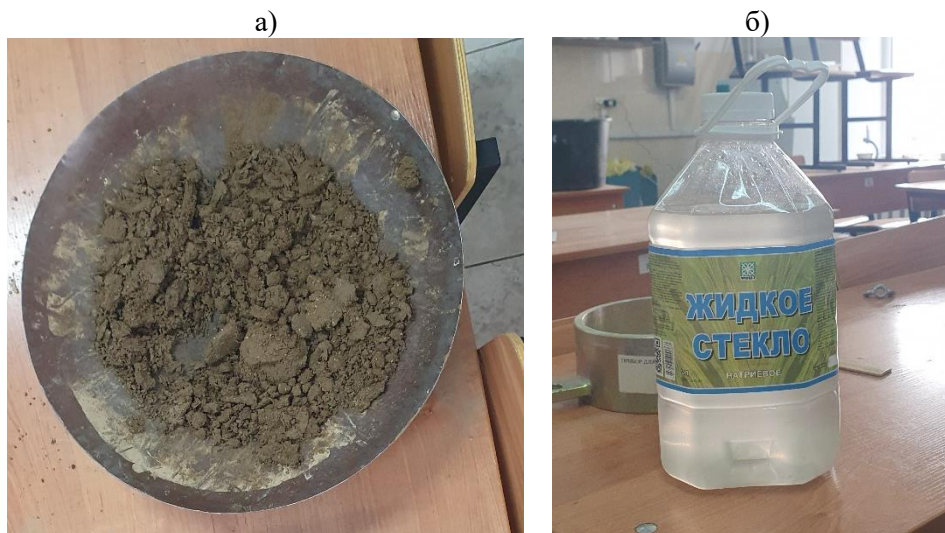
Сәулет ескерткіштерін қорғау үшін геотехникалық сейсмикалық оқшаулауды қолдану сейсмикалық белсенділік жағдайында бірегей тарихи құрылымдарды сақтауға мүмкіндік беретін тиімді әдіс болып табылады. Заманауи технологиялар мен материалдар мұндай жүйелерді қорғаудың жоғары дәрежесін және ұзақ мерзімділігін қамтамасыз етеді, бұл оларды мәдени мұраны қорғау саласындағы маңызды құралға айналдырады (Kilic, 2023).

Мақаланың мақсаты архитектуралық мұраны сақтау үшін, топырақ пен натрий сұйық шыны (топырақ силикаты) қоспасы түріндегі геотехникалық сейсмикалық оқшаулаудың тиімділігі мен маңыздылығын көрсету, сондай-ақ сәулет ескерткіштерін сақтау үшін осы технологияларды енгізу бойынша ұсыныстар беру болып табылады (Hoseynzadeh & Mortezaei, 2021, 2021).

3 МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Сәулет ескерткіштерін қорғауға арналған геотехникалық сейсмикалық оқшаулағыштары, діріл мен орын ауыстырудың төмендеуімен сипатталады, бұл ғимараттың бастапқы құрылымы мен материалдарын сақтауға мүмкіндік береді, бұл әсіресе тарихи ескерткіштер үшін маңызды (Dmitry, 2020).

Құрылысқа минималды түрде араласу, бұл оның, сейсмикалық оқшаулау жүйелерін ғимарат құрылымында айтарлықтай өзгеріссіз орнату және бұл оның тарихи шынайылығын сақтауға мүмкіндік береді. Ұзақ мерзімділік көрсеткіштері бойынша, сейсмикалық оқшаулау жүйелерінде қолданылатын заманауи материалдар мен технологиялар олардың беріктігі мен сенімділігін ондаған жылдар бойы қамтамасыз етеді. **1-суретте** геотехникалық сейсмикалық оқшаулаудың тиімділігін анықтау үшін сұйық натрий мен топырақтың (силикатты топырақ) қоспасы зерттелді **1-сурет**.



1-сурет – Сұйық шыны(б) мен топырақ қоспасы (силикатты топырақ) (а) (авторлық материал).

Экспериментте топырақты тығыздау үшін БЖҒЗО (Бүкілодақтық жол ғылыми-зерттеу одағы) конструкциясының стандартты PSU тығыздау құралына, топырақ силикат қоспасы нығыздалып жүктелді. Бүксперимент келесі кезеңдерді қамтыды:

Жабдықты орнату:

2-суретте көрсетілген БЖҒЗО конструкциясының ПСУ стандартты тығыздаушы құралына жүктелген топыраққа қарағанда, үлкен диаметрлі тарадан база дайындалды,



2-сурет – БЖҒЗО конструкциясының ПСУ стандартты тығыздау құралы (авторлық материал).

BC 111 акселерометрін келесідегідей, параметрлермен орнатты: ICP стандартының кіріктірілген электроникасы, 10 мВ/г сезімталдығы, 0,5-15000 Гц жиілік диапазоны.

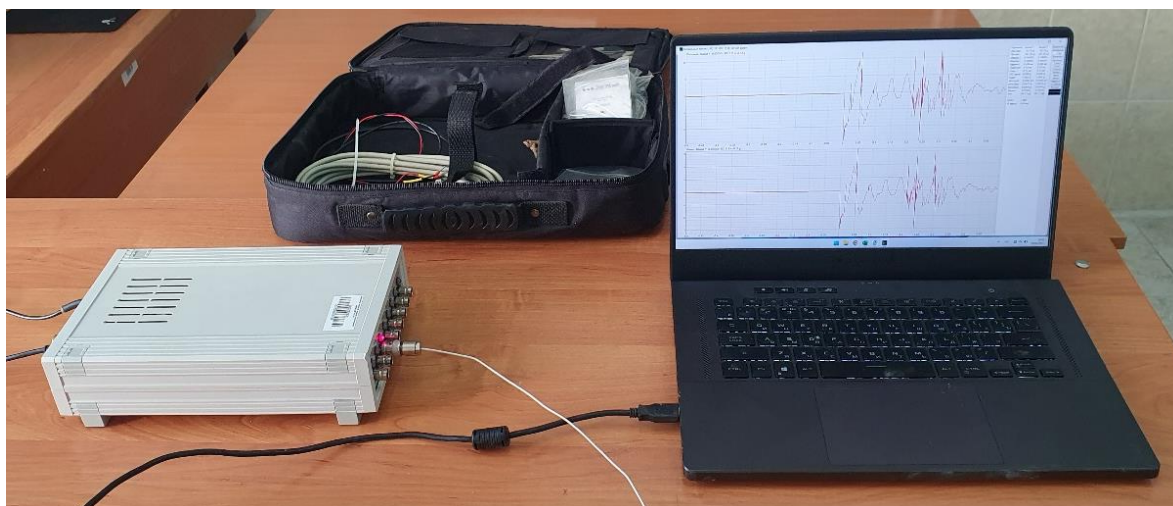
Динамикалық әсерді құру:

Импульстік діріл жасау үшін топырақ модельдерінің бетіне 25 см биіктіктен 450 грамм салмақ тасталды.

BC 111 акселерометрі 1 секундтық тербелістерді жазып, деректерді 80 дБ динамикалық диапазоны және 20 кГц жиілік диапазоны бар ZET 017-U8 спектр анализаторына жіберді.

Деректерді жинау және талдау:

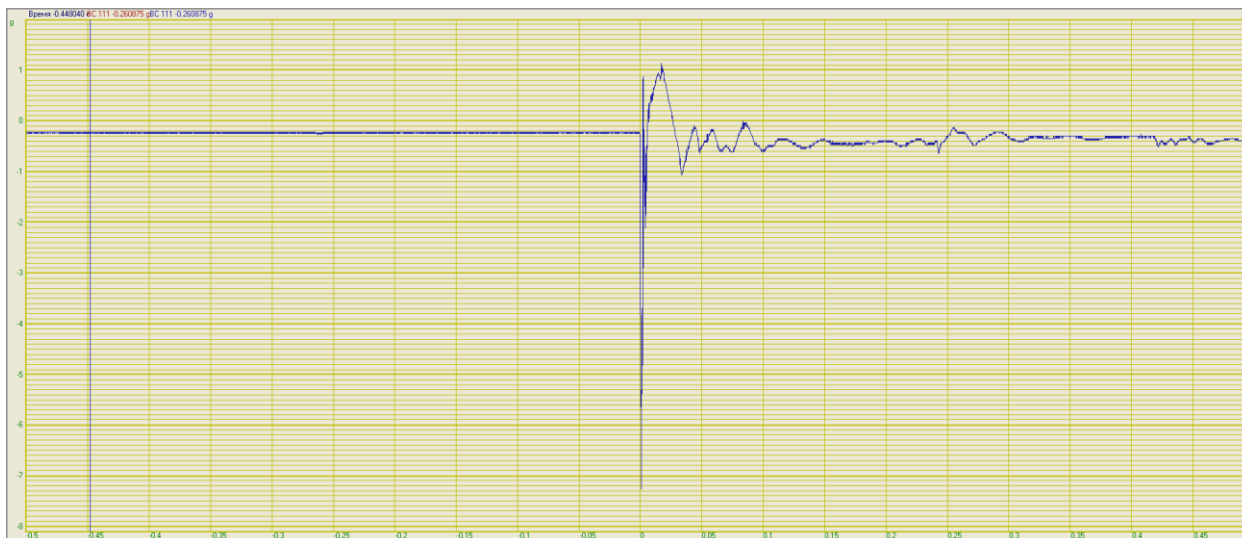
ZET 017-U8 спектр анализаторы ноутбукке қосылып, онда акселерометрден деректерді жинау және талдау үшін Zetlab бағдарламалық кешені орнатылды (3-сурет). Импульстік дірілдің шамасы үдеудің максималды мәні бойынша бағаланды.



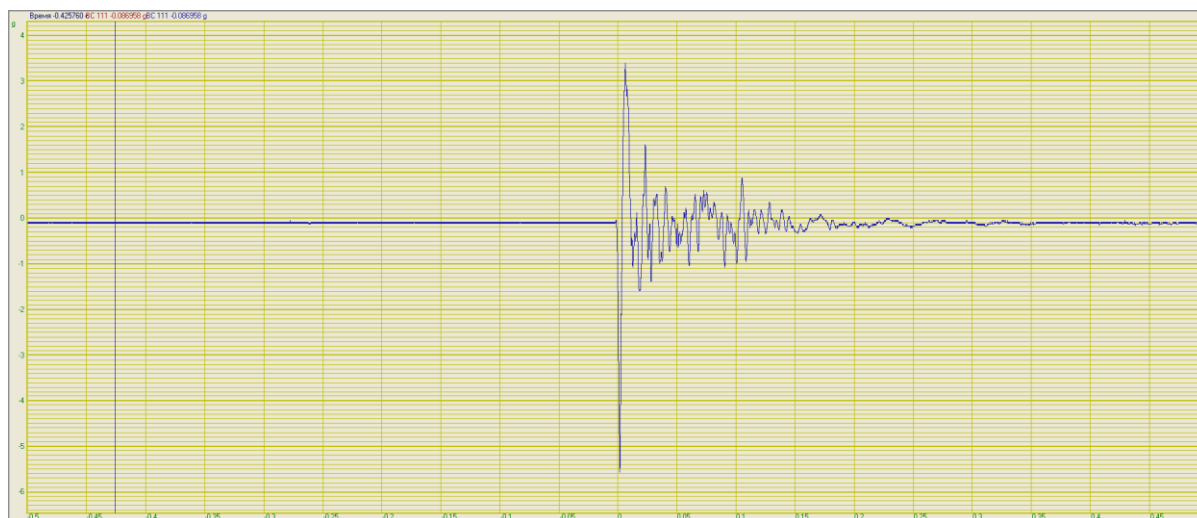
3-сурет – Zetlab программасының 017-U8 ZET спектр анализаторы (авторлық материал).

4 НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

4-5-суретте топырақ силикат қоспасы және ешбір қоспасы жоқ табиғи топырақтың үдеу амплитудасының өлшенген шамалары көрсетілген. Қоспасыз топырақ толқынының амплитудасы 7,26 шамасын көрсетеді: толқындар 0,5 секундтық жазба аралығы ішінде сөнбейді. Силикатты топырақ амплитудасының төмендеуін көрсетті және 5,56 құрады.

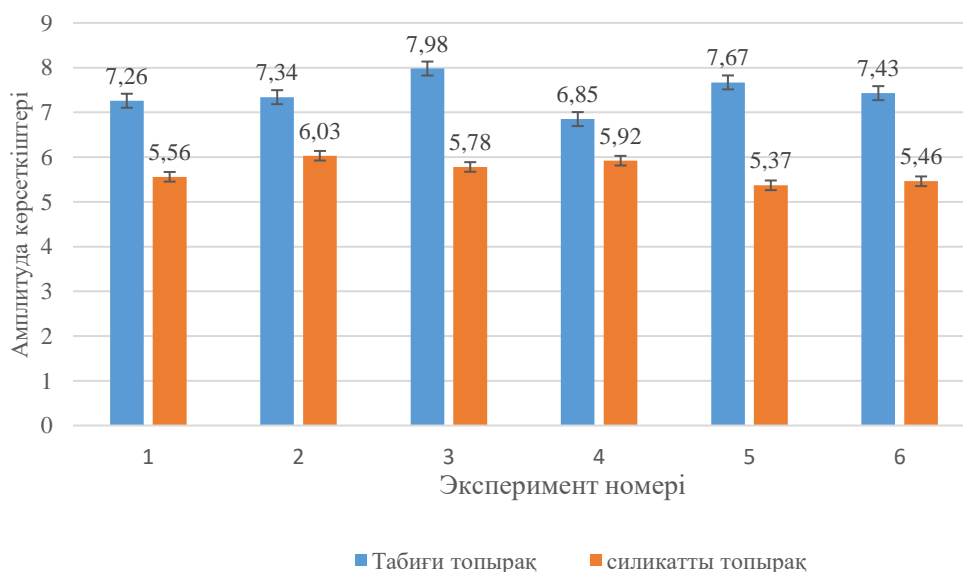


4-сурет – Табиғи топырақтың акселерограммасы (авторлық материал).



5-сурет – Силикатты топырақ акселерограммасы (авторлық материал).

6-суреттегі графикте тербеліс амплитудасының топырақ моделінің түріне тәуелділігін көрсетеді. Абсцисса осінде (көлденең осьте) топырақтың әртүрлі модельдері, ал ординаталар осінде (тік осьте) тербеліс амплитудасы қойылады. График сонымен қатар әр түрлі топырақ модельдері үшін үлкен амплитудадан кіші амплитудаға дейінгі тренд сызығын ұсынады. Әрбір бағанда жазылған сынақ нәтижелерінен алынған тербелістердің максималды амплитудасының мәнін білдіреді.



6-сурет – Табиғи топырақ пен грунтосиликаттың діріл амплитудасының шамалары (авторлық материал).

Біздің нәтижелерімізде оқшаулағыш материал ретінде силикатты топырақ қолданған кезде табиғи топырақпен салыстырғанда тербеліс амплитудасының едәуір төмендейтінін көрсетілген. Бұл оқшаулағыш материалдарды қолданған кезде амплитуданың төмендеуі басқа да зерттеулердің нәтижелерімен сәйкес келеді. Мысалы, (Woods, 1968) жүргізген зерттеуде амплитуданы азайту коэффициенті енгізілген, ол оқшаулағыш қабаттың тербеліс амплитудасын қаншалықты тиімді төмендететінін көрсетеді. Амплитуданы азайту коэффициенті 0,4-ке тең болса, бұл тербеліс амплитудасының 60%-ға төмендегенін білдіреді. Бұл біздің нәтижелерімізде, силикатты топырақтың тербеліс амплитудасын айтарлықтай төмендеткендігімен көрсетіп отыр.

Сонымен қатар, (Al-Hussaini мен Ahmad, 1991), (Çelebi, 2009), және басқалар жұмыстарында әртүрлі жиілік диапазоңдары мен тербеліс көздері үшін амплитуданы төмендетуді талдаудың маңыздылығы атап өтіледі. Біздің деректеріміз де топырақ силикаттың тербелістік әсерлерді, әсіресе архитектуралық ескерткіштерді қорғау контекстінде, азайту үшін тиімді әдіс бола алатынын растайды.

6-суретте көрсетілген графиктің көрсеткіштерін талдау бойынша, топырақ силикаттың табиғи топырақпен салыстырғанда толқынды тиімдірек сөндіретінін көрсетті. 6 эксперименттің нәтижелері бойынша топырақ силикатының орташа амплитудасы 5,68 құрады, ал табиғи топырақтың амплитудасы 7,42 құрады. Алынған мәліметтер негізінде грунтосиликатты ғимараттарды, әсіресе сәулет ескерткіштерін қорғау үшін қолдануға болады деп қорытынды жасауға болады. Болашақта осы мәліметтер негізінде сейсмикалық оқшаулаудың тиімді әдістерін жасауға болады.

5 ҚОРЫТЫНДЫ

Сәулет ескерткіштерін тиімді қорғау үшін топырақ силикатынан геотехникалық сейсмикалық оқшаулау қолданылуы мүмкін. Геотехникалық сейсмикалық оқшаулау ретінде қолданылатын материалдардың параметрлік сипаттамаларын эксперименттік зерттеу нәтижелері тамаша демпферлік қасиеттерді көрсетті.

Геотехникалық сейсмикалық оқшаулау түріндегі силикатты топырақ қоспасын, қоспасыз топырақпен салыстырғанда толқындардың төмендеуін көрсетеді. Силикатты топырақ толқын амплитудасын 23,46% төмендетеді.

Осылайша, сейсмикалық тербелістердің амплитудасының төмендеуі қауіпсіздікті, беріктікті және өмірді сақтауға әкеледі, бұл технологияны ғимараттар мен инфрақұрылымды сейсмикалық қауіптерден қорғау үшін, әсіресе сәулет ескерткіштерін қорғау үшін маңызды және пайдалы етеді.

Геотехникалық сейсмикалық оқшаулау жер сілкінісіне төзімді құрылыстың перспективалық бағытын білдіреді, бірақ оны енгізу техникалық және экономикалық аспектілерді де, әртүрлі геологиялық жағдайларда қолдану ерекшеліктерін де ескеретін кешенді тәсілді қажет етеді. Бұл технологияны тиімді пайдалану жүйенің функционалдығы мен беріктігіне әсер ететін барлық факторларды мұқият жоспарлау және есепке алу арқылы мүмкін болады.



ӘДЕБИЕТТЕР

1. **Calvi, P.M., & Calvi, G.M.** (2018). Historical development of friction-based seismic isolation systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106, 14-30 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.12.003>
2. **Dudchenko, A.V., Dias, D., Kuznetsov, S.V.** (2021). Vertical wave barriers for vibration reduction. *Archive of Applied Mechanics*, 91, 257–276. <https://doi.org/10.1007/s00419-020-01768-2>
3. **Forcellini, D.D, Chiaro, G.D, Palermo, A.D, Banasiak, L.M, Tsang, H.H.** (2024). Energy dissipation efficiency of geotechnical seismic isolation with gravel-rubber mixtures: insights from FE non-linear numerical analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 28 (9), 2422-2439 <https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2312915>
4. **Chiaro, G., Palermo, A., Banasiak, L., Tasalloti, A., Granello, G., Hernandez, E.** (2023). Seismic response of low-rise buildings with eco-rubber geotechnical seismic isolation (ERGSi) foundation system: numerical investigation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21, 3797–3821 <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01584-9>
5. **Banovic, I., Radnic, J., Grgic, N.** (2019). Geotechnical seismic isolation system based on sliding mechanism using stone pebble layer: shake-table experiments. *Shock and Vibration*, 1-26 <https://doi.org/10.1155/2019/9346232>

6. **Jing, L.P., Yin, Z.Y., Sun, H.F., Dong, R., Xu, K.P., Li, Y.Q.** (2020). Shaking table tests on two geotechnical seismic isolation systems. *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 42 (11), 1969-1978 <https://doi.org/10.11779/CJGE202011001>
7. **Zhang, H., Song, C., Wang, M., Cheng, Y., Yue, S., Wu, C.** (2023). A geotechnical seismic isolation system based on marine sand cushion for attenuating ground shock effect: Experimental investigation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 168, 107854. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107854>
8. **Dhanya, J.S., Fouzul, M.A., Banerjee, S., Boominathan, A., Zhussupbekov, A.M.** (2023). Shaking table experiments on framed structure resting on geogrid reinforced geotechnical seismic isolation system. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21, 3823–3849 <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01687-x>
9. **Kilic, G.** (2023). Assessment of historic buildings after an earthquake using various advanced techniques. *Structures*, 50, 538-560 <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.033>
10. **Hoseynzadeh, H., Mortezaei, A.** (2021). Seismic vulnerability and rehabilitation of one of the world's oldest masonry minaret under the different earthquake frequency content. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 9-4, 12-36 <https://doi.org/10.22075/JRCE.2021.21251.1441>
11. **Sun, Q., Xue, Y., Hou, M.** (2024). Geotechnical seismic isolation system to protect cut-and-cover utility tunnels using tire-derived aggregates. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 176, 108354 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108354>
12. **Tsang, H.H., Tran, D.P., Hung, W.Y., Ptilakis, K., Gad, E.F.** (2021). Performance of geotechnical seismic isolation system using rubber-soil mixtures in centrifuge testing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(5), 1271-1289 <https://doi.org/10.1002/eqe.3398>
13. **Yin, Z., Sun, H., Jing, L., Dong, R.** (2022). Geotechnical seismic isolation system based on rubber-sand mixtures for rural residence buildings: shaking table test. *Materials*, 15(21), 7724 <https://doi.org/10.3390/ma15217724>
14. **Mikhail, B.V.** (2011). Foundations and foundation [Osnovaniya i fundamentey] (In Russ.).
15. **Dmitry, Ch.U, Natalia, M.L., Irina, M.Y.** (2020). Foundations, retaining walls and pit fences [Fundamentey, podpornye steny i ograbzheniya kotlovanov] (In Russ.).

UDC 624.012
IRSTI 67.15.37
RESEARCH ARTICLE

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USING CHP ASH IN THE PRODUCTION OF FIRED ASH GRAVEL

A. Khamit^{1,*} , S. Uderbayev¹ , K. Baitassov² ,
G. Ibraimbaeva³ , S. Kultayeva³ 

¹Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, 120012, Kazakhstan

²Kyzylorda «Bolashak» University, Kyzylorda, 120000, Kazakhstan

³International Educational Corporation, Almaty, 050043, Kazakhstan

Abstract. *The article presents a comparative analysis of the characteristics of the dump ash of the Kyzylorda CHP hydraulic removal. A huge amount of ash, slag waste is collected in the dumps of the CHP, their accumulation in the dumps leads to a violation of the ecology of the environment. The issue of ash, slag waste disposal is an urgent problem. The use of ash and slag not only solves the issue of availability of raw materials, but also allows to improve the quality of products while reducing their cost. One of the valuable components of ash and slag waste is hydraulic removal ash. Hydraulic removal ash as a raw material can be used for the manufacture of artificial concrete aggregates (ash, agglomerate gravel, etc.). Studies were conducted to study the physico-chemical composition, determine the specific effective activity of natural radionuclides, loss during calcination of two types of hydraulic removal ash samples from Kyzylorda CHP (black and gray), which differ in sampling sites from ash dump. When studying the properties of the ash, X-Ray phase analysis was carried out, with the help of which the phase composition of the ash was determined. Work was carried out on the X-Ray phase analysis of ash, determination of the specific effective activity of natural radionuclides, calcination losses, which showed the possibility of using ash for the production of building materials. The conducted studies have confirmed the expediency of using the ash of the Kyzylorda thermal power plant in the production of fired ash gravel.*

Keywords: *fly ash of CHP, ash utilization, ash gravel, X-Ray phase analysis, radiograph, radionuclides.*

***Corresponding author**

Aigerim Khamit, e-mail: khamit_ann@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-11>

Received 11 April 2024; Revised 30 May 2024; Accepted 12 July 2024

ӨОЖ 624.012
ҒТАМР 67.15.37
ҒЫЛЫМИ МАҚАЛА

ЖЭО КҮЛІН КҮЙДІРІЛГЕН КҮЛДІ МАЛТА ТАС ӨНДІРІСІНДЕ ҚОЛДАНУ МҮМКІНДІГІН ЗЕРТТЕУ

А.Н. Хамит^{1*} , С.С. Үдербаев¹ , К.Байгасов² ,
Г.Б. Ибраимбаева³ , Ш.М. Култаева³ 

¹Қорқыт ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, 120012, Қазақстан

²Қызылорда «Болашақ» университеті, Қызылорда, 120000, Қазақстан

³ Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, 050043, Қазақстан

Аңдатпа. Мақалада Қызылорда ЖЭО сумен шайылған үйінді күлінің сипаттамаларына салыстырмалы талдау жүргізілді. ЖЭО үйінділерінде күлді илақты қалдықтардың көп мөлшері жиналады, олардың үйінділерде жиналуы қоршаған орта экологиясының бұзылуына әкеледі. Сондықтан күл-қож қалдықтарын кәдеге жарату мәселесі өзекті мәселе болып табылады. Күлді илақты қалдықтарды қолдану шикізатпен қамтамасыз ету мәселесін шешіп қана қоймай, сонымен бірге оның құнын төмендете отырып, өнімнің сапасын арттыруға мүмкіндік береді. Күлді илақты қалдықтарының құнды компоненттерінің бірі-сумен шайылған күл. Сумен шайылған күлді шикізат ретінде жасанды бетон толтырғыштарын (күлді, аглопоритті қиыршық тастар және т.б.) жасау үшін пайдалануға болады. Зерттеулер күлдің физика-химиялық құрамын зерделеу, табиғи радионуклидтердің үлестік тиімді белсенділігін анықтау және күл үйіндісінен сынама алу орындарымен ерекшеленетін Қызылорда ЖЭО-ның екі түрінің (қара және сұр) сумен шайылған күлінің сынамаларын қыздыру кезіндегі шығынды анықтау мақсатында жүргізілді. Күлдің қасиеттерін зерттеу кезінде рентгендік фазалық талдау жүргізілді, оның көмегімен күлдің фазалық құрамы анықталды. Күлді рентгенофазалық талдау, табиғи радионуклидтердің нақты тиімді белсенділігін және күйдіру кезіндегі шығындарды анықтау бойынша жұмыстар орындалды, олар күлді құрылыс материалдарын өндіру үшін қолдану мүмкіндігін көрсетті. Жүргізілген зерттеулер күйдірілген күлді қиыршық тас өндірісінде Қызылорда ЖЭО-ның сумен шайылған күлін қолданудың орындылығын растады.

Түйін сөздер: ЖЭО ілесне күлі, күлді кәдеге жарату, күлді малта тас, рентгенофазалық талдау, рентгенограмма, радионуклидтер.

*Автор-корреспондент

Хамит Айгерім, e-mail: khamit_ann@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-11>

Алынды 11 сәуір 2024; Қайта қаралды 30 мамыр 2024; Қабылданды 12 шілде 2024

УДК 624.012
МРНТИ 67.15.37
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЫ ТЭЦ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОБЖИГОВОГО ЗОЛЬНОГО ГРАВИЯ

А.Н. Хамит^{1*} , С.С. Үдербаев¹ , К. Байтасов² ,
Г.Б. Ибраимбаева³ , Ш.М. Култаева³ 

¹ Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, 120012, Казахстан
² Кызылординский университет «Болашак», Кызылорда, 120000, Казахстан
³ Международная образовательная корпорация, Алматы, 050043, Казахстан

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ характеристик отвальной золы гидроудаления Кызылординской ТЭЦ. В отвалах ТЭЦ собирается огромное количество золошлаковых отходов, накопление их в отвалах приводит к нарушению экологии окружающей среды. Поэтому вопрос утилизации золошлаковых отходов является актуальной проблемой. Применение золошлаков не только решает вопрос обеспеченности сырьем, но и позволяет повысить качество продукции при одновременном снижении ее себестоимости. Одним из ценных компонентов золошлаковых отходов является зола гидроудаления. Зола гидроудаления в качестве сырья можно использовать для изготовления искусственных заполнителей бетона (зольный, аглопоритовый гравий и др.). Исследования проводились с целью изучения физико-химического состава, определения удельной эффективной активности естественных радионуклидов и потери при прокаливании проб золы гидроудаления Кызылординской ТЭЦ двух видов (черная и серая), которые отличаются местами отбора проб из золоотвала. При исследовании свойств золы были проведены рентгенофазовый анализ, при помощи которого был определен фазовый состав золы. Выполнены работы по рентгенофазовому анализу золы, определению удельной эффективной активности естественных радионуклидов и потери при прокаливании, показавшие на возможность применения золы для производства строительных материалов. Проведенные исследования подтвердили целесообразность применения золы гидроудаления Кызылординского ТЭЦ в производстве обжигового зольного гравия.

Ключевые слова: зола-уноса ТЭЦ, утилизация зол, зольный гравий, рентгенофазовый анализ, рентгенограмма, радионуклиды.

*Автор-корреспондент

Хамит Айгерім, e-mail: khamit_ann@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.3-11>

Поступило 11 апреля 2024 г.; Пересмотрено 30 мая 2024 г.; Принято 12 июля 2024 г.

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС / ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 КІРІСПЕ

Елдің энергетикалық әлеуеті ішінара қатты отынды, негізінен тас көмірді жағу арқылы жылу және электр энергиясын өндіретін жылу электр станцияларын пайдалану арқылы қамтамасыз етіледі. 2022 жылы Қазақстанда тұтынылған энергия көзінің 48,2% көмір болды (**Pak, 2023**).

Қатты отынды жағу тәсілімен ерекшеленетін жылу электр станцияларының әртүрлі түрлері бар (**Belikov & Kotler, 2008**). Қазіргі заманғы ЖЭС қатты отынды жағу камералық ошақтарда шаң тәрізді күйге дейін ұнтақталған күйінде жүзеге асырылады. Бұл процестің ажырамас бөлігі күл мен күл-қож қоспасы түрінде қалдықтардың пайда болуы болып табылады.

Қазіргі уақытта Қызылорда ЖЭО үйінділерінде 2 млн.550мың т. күлді қалдықтары жиналған (**Imangaliyev, 2017**). Сондықтан күлді қалдықтарды кәдеге жарату мәселесі өзекті болып табылады, өйткені олардың үйінділерде жиналуы экологиялық қауіпсіздікке қауіп төндіреді (**Loshkareva & Gubonina, 2014**).

Күлді қалдықтарды қайта өңдеу бағыттарының бірі оларды бетон шикізаты ретінде пайдалану, сондай-ақ жасанды бетон толтырғыштарын жасау. Күлді қалдықтарды бетон мен оның толтырғыштарын өндіруде алмастырушы материалдар ретінде пайдалану қиыршық тас пен гранитті қиыршық тастан табиғи толтырғыштардың жетіспеуі және олардың кен орындарының сарқылуы себебінен өзекті болып табылады (**Puzatova et al., 2020; Ibe et al., 2021; Baitassov, 1989**).

2 ӘДЕБИЕТКЕ ШОЛУ

Осы тақырып бойынша жарияланымдар саны 2002 жылдан бастап артып келеді, бұл зерттеушілердің осы тақырыпқа деген қызығушылығының артуын көрсетеді. Жарияланымдардың ең көп санын Түркия мен Үндістанның зерттеушілері жасады. Бұл осы елдердің энергетикасында көмірдің белсенді қолданылуын және күлді қалдықтарды кәдеге жарату мәселесінің толық шешілмегенін көрсетеді.

Scopus мәліметтері бойынша басылымдарды талдау осы тақырып бойынша ғылыми басылымдардың саны, әсіресе 2008 жылдан кейін күрт өсіп келе жатқанын көрсетеді, бұл осы бағыттағы зерттеулердің өзектілігін көрсетеді (**Usanova, 2018**).

Күлді қалдықтардың құнды компоненттерінің бірі, әдетте жасанды күлді малта тас (гранула, түйіршіктер) түрінде қолданылатын ілеспе күл.

Бетон өндірісінде ілеспе күлді пайдалануды екі түрге бөлуге болады: түйіршіктелген күлді күйдіру арқылы немесе күйдірусіз (күлді малта тас) алынатын ірі толтырғыш ретінде және ұсақ дисперсті толтырғыш ретінде қолдану.

Бетонға майда дисперсті күлді қолдану бірнеше мақсатқа қызмет етеді: ішінара ауыстыру нәтижесінде цементті үнемдеу, бетон қоспасының қасиеттері мен сипаттамаларын жақсарту (мысалы, отыру кезінде жарықтар пайда болады) және өндірістік қалдықтар ретінде қоқысқа тасталатын күлді кәдеге жарату.

Күлді малта тас жоғары сапалы бетондарда, өздігінен тығыздалатын бетон қоспаларында және жеңіл бетондарда қолданылады (**Itskovich et al., 2001; Zhuginisov & Rakhmetulla, 2022**).

Жоғары сапалы бетондар үшін күлді малта тасты қолдану оның негізгі қасиеттерін сақтай отырып, бетонның құнын төмендетуге мүмкіндік береді.

Өздігінен тығыздалған бетондарда күлді малта тастың дөңгелек пішіні және оның салыстырмалы түрде кіші өлшемдері бетонның қозғалғыштығын және әсіресе қалың арматуралау кезінде оның жайғасымдылығын арттырады. Мұндай қоспалар бетон сорғыларына оңай беріледі.

Жеңіл бетондарда күлді малта тасты пайдалану оның тығыздығын төмендетеді және оның жылутехникалық сипаттамаларын жақсартады ([Hydiakova et al., 2019](#); [Abdrahimov, 2018](#)).

Ілеспе күлден ірі толтырғыш екі әдіспен алынады. Бірінші әдіс – ілеспе күлді түйіршіктеу және оны пештерде жоғары температурада балқытып біріктіру (күйдірілген күлді малта тас). Екінші әдіс - айналмалы сиымдылықтарда домалату арқылы ілеспе күлдің салқын күйде түйіршіктеу (күйдірілмеген күлді малта тас) ([Kumar & Rama Mohan Rao, 2017](#)).

Зерттеудің мақсаты күл жинақталған үйіндіден сынама алынатын орындарымен ерекшеленетін Қызылорда ЖЭО-ның екі түрлі (қара және сұр) ілеспе күлінің физика-химиялық құрамын, табиғи радионуклидтердің меншікті тиімді белсенділігін және күйдіру кезіндегі шығынын анықтау болып табылады.

3 МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕР

Зерттеулерді орындау кезінде МемСТ 25818-2017 «Бетон алу үшін ЖЭС күл-қожы. Техникалық талаптар», МемСТ 30108-94 «Құрылыс материалдары мен бұйымдар. Табиғи радионуклидтердің меншікті тиімді белсенділігін анықтау» нормативтік құжаттары мен ([Gorshkov et al., 1981](#); [Ukhanov, 2014](#); [Eroshov et al., 2016](#), [Rashchupkina, 2009](#)) әдістері басшылыққа алынды.

Ілеспе күлдің оксидтік химиялық құрамы МемСТ 5382-2019 «Цементтер және цемент өндірісінің материалдары. Химиялық талдау әдістері» бойынша, рентгендік-флуоресцентті спектрлік талдауды (РФСА) пайдаланып анықталды. Бұл әдіс элементтік талдау болып табылады, яғни сынамадағы белгілі бір химиялық элементтер атомдарының тек проценттік мөлшерін анықтауға мүмкіндік береді, анықталатын элементтердің диапазоны Al- ден U-ға дейін. Алынған нәтижелерді жарияланған мәліметтермен салыстыру үшін жеке химиялық элементтердің алынған концентрацияларын қайта есептеу жүргізілді.

Зерттелетін ілеспе күл құрамының рентгендік фазалық талдауын (РФ) орындау үшін бағдарламалық қамтамасыз етумен жабдықталған CuK_{α} - сәулеленудегі жаңартылған ДРОН— 3М дифрактометрі пайдаланылды.

Ілеспе күл сынамасының рентгенографиясы мен дифракциялық сипаттамасы 2θ (бұрыштар) түсіру интервалында алынды: 10° нан 70° ке дейін, яғни бастапқы бұрышы 10° , соңғы бұрышы — 70° , қадамы — $0,05$; экспозициясы — $1,5$; жылдамдығы 2г/мин , импульсивтіліктің максималды саны-350.

Түсіруге арналған препараттар келесі ретпен дайындалды:

- зерттелетін зат (сынама) ағат үккіште ұнтақ күйге дейін майдаланды;
- содан кейін осылай дайындалған ұнтақ алдын ала вазелинмен майланған плексиглас кюветке салынып, аздап нығыздалды;
- текстураны жою үшін кюветтегі артық ұнтақ пышақпен кесіліп алынды.

Табиғи радионуклидтердің нақты тиімді белсенділігін анықтау МемСТ 30108-94 «Құрылыс материалдары мен бұйымдары. Табиғи радионуклидтердің меншікті тиімді белсенділігін анықтау» құжатының техникалық талаптарына сәйкес жүзеге асырылды.

Күлдің қасиеттерін зерттеу кезінде рентгендік фазалық талдау жүргізілді. Фазалық құрамды бағалау PDF-2 рентгенометриялық картотекасы мен Profile Show бағдарламасын қолдану арқылы жүзеге асырылды.

4 НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Сумен шайылып шығарылған Қызылорда ЖЭО-ның ілеспе күлі табиғи күйде қара, сұр түсті сусымалы материал түрінде болады және келесі қасиеттерімен сипатталады: орташа тығыздығы $2,41\text{ г/см}^3$; меншікті беті $2775\text{ см}^2/\text{г}$; үйме тығыздығы $0,755\text{ г/см}^3$; көміртегі мөлшері $5,5\%$.

Ілеспе күлдің екі сынамасы зерттелді: №1 – кара түсті және №2 – сұр түсті.

№1 ілеспе күл сынамасының элементтік және оксидтік құрамдары (1,2-кесте) келтірілген. Күлдің негізінен кремний диоксиді (SiO_2) мен алюминий оксидінен (Al_2O_3) тұратынын көруге болады, бұл оксидтер күл құрамында кварц пен муллиттің болуын растайды.

1-кесте

№1 сынамадағы ілеспе күлдің элементтік құрамы

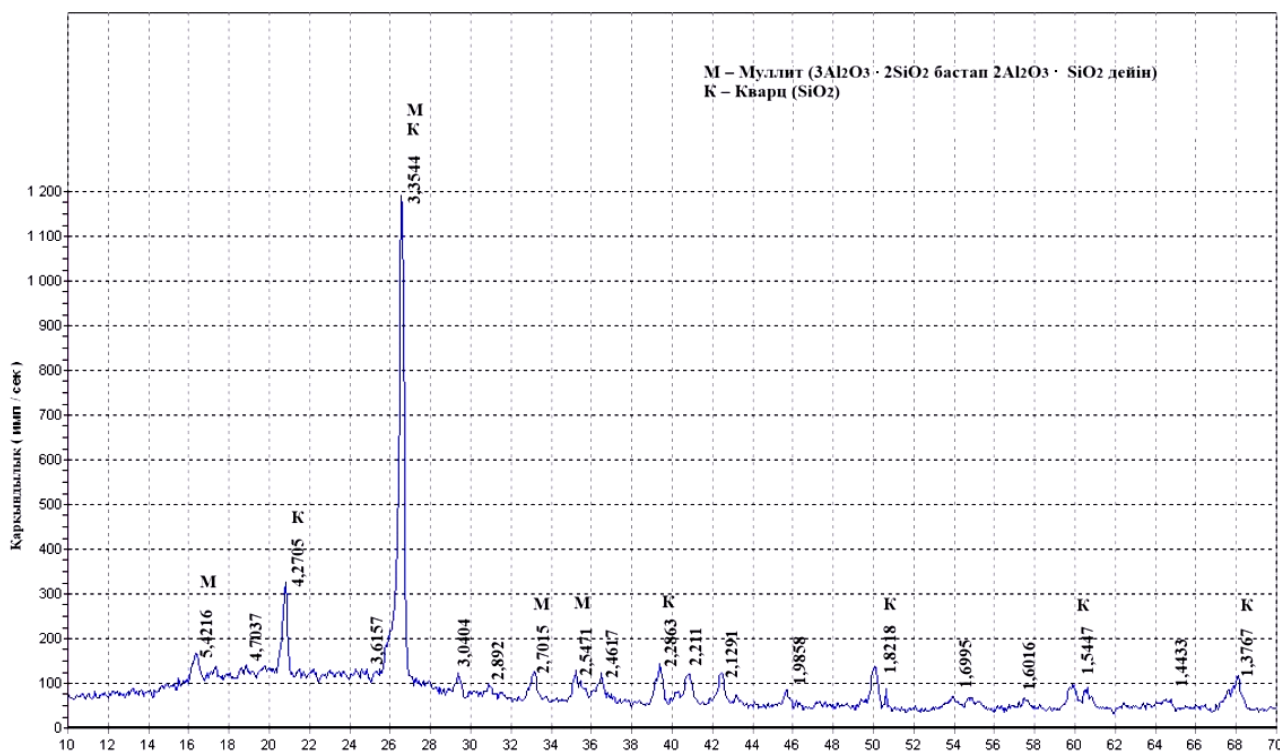
Элементтер атауы және проценттік мөлшері, %												
O	Si	Fe	Na	Al	S	Ti	Mg	Ca	K	Cl	P	Σ
48,39	28,6	2,55	0,84	14,01	0,24	0,50	1,10	2,08	1,29	0,29	0,19	100

2-кесте

№1 сынамадағы ілеспе күлдің тотықтық құрамы

SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2	Σ
60,98	26,4	2,90	3,27	1,82	1,55	1,12	0,60	0,83	100

1-суретте Рентгендік фазалық талдаудың көмегімен күлдің фазалық құрамы анықталды. №1 сынамадағы ілеспе күлдің рентгенограммасы көрсетілген



1-сурет – №1 сынамадағы ілеспе күлдің рентгенограммасы (авторлық материал).

№1 ілеспе күл сынамасының рентгенографиясы мен дифракциялық сипаттамасынан оның жазықтықаралық арақашықтықтарына ($d/n, A$) сәйкес келесі минералдардан тұратынын көруге болады: кварц (SiO_2) – 4,2705; 3,3544; 2,2863 және басқалар; муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) – 5,4216; 3,3544; 2,7015 және басқалар. SiO_2 – 71,5%; $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ – 28,5%. №1 ілеспе күл құрамында шыны фазасының аздаған мөлшері (шамамен 5% - 6%) бар, оның бар екендігін 16° - 28° арасындағы гало куәландырады.

№2 ілеспе күл сынамасының элементтік және оксидтік құрамы (3,4 – кесте) келтірілген, олардың құрамында кремний диоксиді (SiO_2), алюминий оксиді (Al_2O_3), кальций оксиді (CaO) бар. Жиынтықта бұл оксидтер кварц, кальцит және доломиттің болуын растайды, сонымен қатар күл құрамында SO_3 болуы екі сулы гипстің болуын көрсетеді.

3-кесте

№2 сынамадағы ілеспе күлдің элементтік құрамы

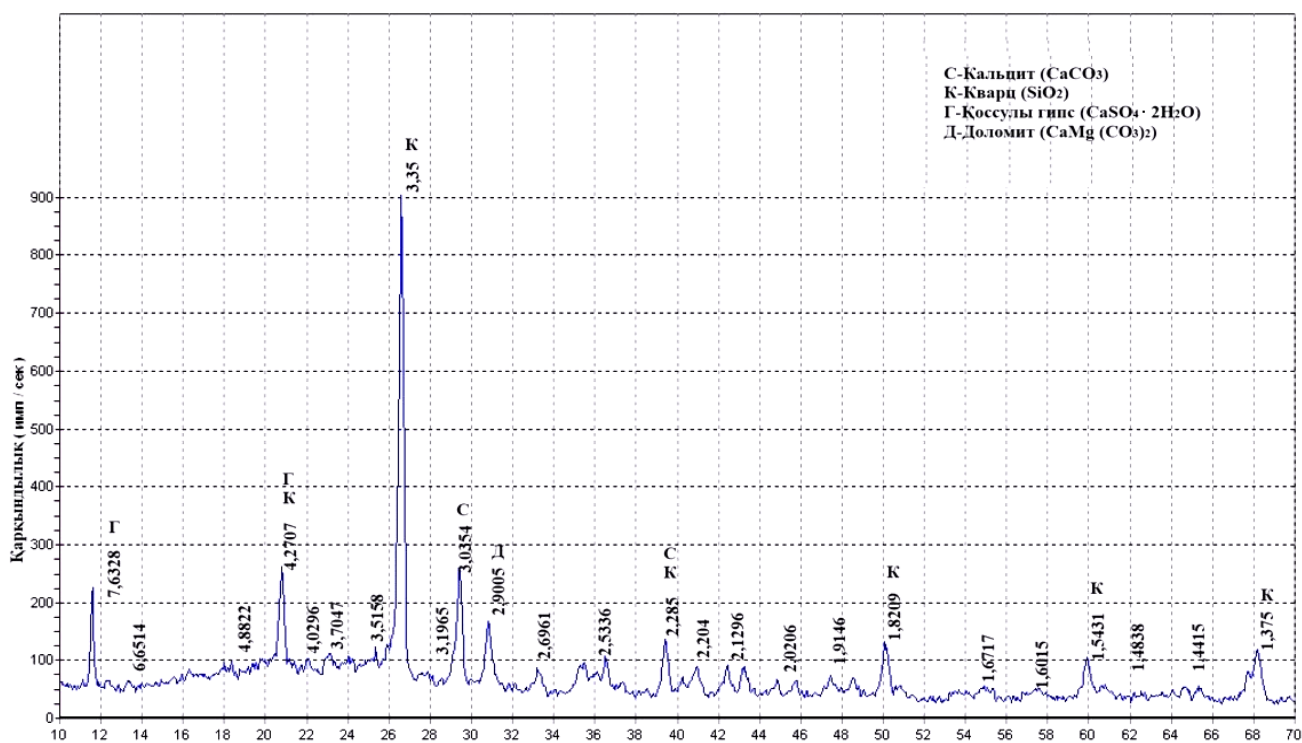
Элементтер атауы және проценттік мөлшері, %												
O	Si	Fe	Na	Al	S	Ti	Mg	Ca	K	Cl	Mn	Σ
47,31	25,40	9,09	0,48	9,83	1,24	0,49	1,36	5,3	1,31	0,08	0,36	100

4-кесте

№2 сынамадағы ілеспе күлдің тотықтық құрамы

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	Σ
55,4	18,9	7,58	9,09	2,29	1,62	0,66	3,16	0,83	0,08	0,36

2-суретте Рентгендік фазалық талдаудың көмегімен күлдің фазалық құрамы анықталды. №2 ілеспе күлді зерттеу нәтижелері көрсетілген.



2-сурет – №2 сынамадағы ілеспе күлдің рентгенограммасы (авторлық материал).

№ 2 ілеспе күл сынамасының рентгенограммасынан және дифракциялық сипаттамасынан оның жазықтықаралық арақашықтықтарына (d/n , Å) сәйкес келесі минералдардан тұратынын көруге болады: кварц (SiO₂) – 4,2707; 3,35; 1,8209 және басқалар; кальцит (CaCO₃) – 3,0354; 2,285; екі сулы гипс (CaSO₄·2H₂O) – 7,6328; 4,2707; доломит CaMg(CO₃)₂ – 2,90057. Мөлшері: SiO₂ – 54,2%; CaCO₃ – 2,6%; CaMg(CO₃)₂ – 13,0%; CaSO₄·2H₂O – 12,2%. №2 ілеспе күл сынамасы құрамында шыны фазасының көп мөлшері аз (шамамен 3% - 4%), оның бар екендігін 16° - 28° аралығындағы гало куәландырады.

Табиғи радионуклидтердің нақты тиімді белсенділігін анықтау нәтижелері (**3-кесте**) келтірілген. Алынған деректерге сәйкес сынамалардағы №1 және №2 ілеспе күлдер МемСТ 30108-94 «Құрылыс материалдары мен бұйымдар. Табиғи радионуклидтердің меншікті тиімді белсенділігін анықтау» талаптарына сәйкес I классты құрылыс материалдарының қатарына жатады.

Күйдіру кезіндегі шығындар (п.п.) сәйкесінше 3,46% және 3,05% құрайды.

3-кесте

Табиғи радионуклидтердің меншікті тиімді белсенділігі

Сынама №	Көрсеткіш атауы, өлшем бірлігі	Сынақ әдісі	Норма	Нақты мәні
№1	Табиғи радионуклидтердің меншікті тиімді белсенділігі, Бк/кг	МемСТ 30108-94	370-ке дейін	55,1
№2				22,7

5 ҚОРЫТЫНДЫ

Рентгендік-флуоресцентті спектрлік талдау негізінде №1 күл сынамасы құрамы негізінен кварц пен муллиттен, № 2 күл сынамасы құрамының басым бөлігі кварц, кальцит, доломит және екі сулы гипстен тұратыны анықталды. Екі сынаманың үлгілері табиғи радионуклидтердің меншікті тиімді белсенділігі бойынша МемСТ 30108-94 «Құрылыс материалдары мен бұйымдар. Табиғи радионуклидтердің меншікті тиімді белсенділігін анықтау» талаптарына сәйкес келетін құрылыс материалдарының класына жататыны анықталды. Зерттеу нәтижелері күл үлгілерінде күйдіру кезіндегі шығындар сәйкесінше 3,46% және 3,05% шама-сында болатынын көрсетті.

Элементтік талдау нәтижелері сыналған күлдер құрамында кремний оксиді мөлшерінің жоғары екенін көрсетті, бұл нәтиже оларды күйдірілген күлді малта тас (обжиговый зольный гравий) өндіру үшін қолдану мүмкіндігін дәлелдейді.

ӘДЕБИЕТТЕР

1. **Pak, A.** (2023). Coal remains the main source of energy in Kazakhstan with a share of 48.2% of total consumption. [Ugol' ostaetsya osnovnym istochnikom energii v Kazahstane s dolei v 48,2% ot obshchego potrebleniya]. Retrieved from: <https://bizmedia.kz/2023-09-15-ugol-ostaetsya-osnovnym-istochnikom-energii-v-kazahstane-s-dolej-v-482-ot-obshhego-potrebleniya/>(In Russ.).
2. **Belikov, S.E., Kotler, V.R.** (2008). Boilers of thermal power plants and protection of the atmosphere. [Kotly teplovyh elektrostancij i zashchita atmosfery]. Aqua-Term Publishing Center, 360. Retrieved from: https://lunda.kz/catalog/category/c12727/product/kniga-kotly-zaschita_19614.html (In Russ.).
3. **Imangaliyev, G. Kh.** (2017). The use of ash and slag waste from Kyzylorda CHP in construction. Problems of engineering graphics and vocational education. [Qyzylorda jyluelektroortalyǵanan jinalǵan kül – qoj qaldyqtaryn qūrylysta paidalanu. İnjenerlik grafika және kāsıbi bilim problemalary]. 5(44). Retrieved from: <https://azdok.org/document/y8g3kv14-energy-efficient-reinforced-concrete-three-layer-exterior-processing.html> (In Kaz.).
4. **Loshkareva, A.V., Gubonina, Z.I.** (2014). Environmental problems in the storage of ash waste from solid fuel combustion in thermal power plants [PDF file].[Ekologicheskie problemy pri hranenii zolothodov ot sjigania tverdogo topliva na teplovyh elektrostansiyah]. Online magazine "Science Studies" 6(25) Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-problemy-pri-hranenii-zolothodov-ot-szhiganiya-tvyordogo-topliva-na-teplovyh-elektrostantsiyah> (In Russ.).
5. **Puzatova, A.V., Dmitrieva, M.A., Zakharov, A.A., Leucin, V.N.** (2020). Fly ash in the production of concretes for various purposes and dry building mixes. Young Scientist.[Zola-unosa pri proizvodstve betonov razlichnogo naznacheniya i suhih stroitelnyh smesei]. 13(303). Retrieved from: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-109-5-132-147> (In Russ.).

6. **Ibe, E.E., Shibayeva, G.N., Mironov, S.E., Litvin, D.A.** (2021). Prerequisites for the use of multicomponent binders based on fly ash for ultra-high technology concretes [PDF file]. [Predposylki ispol'zovaniya mnogokomponentnykh vyazhushchih na osnove zol-unos dlya betonov ul'travysokih tekhnologii]. Bulletin of Eurasian Science. 5(13). Retrieved from: <https://esj.today/PDF/52SAVN521.pdf> (In Russ.).
7. **Baitassov, K.** (1989). Sandy concretes on lime-ash portland cement. [Peschanye betony na izvestkovozol'nom portlandcemente]. Abstract of the dissertation of the Candidate of technical Sciences: 05.23.05. Moscow Engineering and Construction Institute named after. V. V. Kuibysheva. (In Russ.).
8. **Usanova, K.Yu., Barabanshchikov, Yu.G., Fedorenko, Yu.P., Kostyrya, S.A.** (2018). Un-fired ash gravel as a coarse concrete filler. [Bezobzhigovyy zol'nyj gravij kak krupnyj zapolnitel' betonov]. (pp. 31-45) 9 (72). Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/336391323_Bezobzhigovyy_zolnyj_gravij_kak_krupnyj_zapolnitel_betonov (In Russ.).
9. **Itskovich, S. M., Chumakov, L. D., Bazhenov, Yu. M.** (2001). Technology of concrete aggregates. [Tekhnologiya zapolnitelei betona]. Higher School: Moscow, Russia, 272. Retrieved from: <http://elib.kstu.kz/fulltext/skan/Tekhnologiya%20zapolniteley%20betona.pdf> (In Russ.).
10. **Zhuginisov, M. T., Rakhmetulla, A. A.** (2022). Production of lightweight concrete using burnt ash and slag technology. [Kúdirilgen kúl-qırshyqtas tehnologıasynyń negizinde jeńil beton alý]. Young scientist. (pp. 680-683), 20 (415). Retrieved from: <https://moluch.ru/archive/415/91615/> (In Kaz.).
11. **Kumar, P.P., Rama Mohan Rao, P.** (2017). Packing density of self compacting concrete using normal and lightweight aggregates. International Journal of Civil Engineering and Technology. (pp. 1156–1166), 8 (4).
12. **Gorshkov, V.S., Timashev, V.V., Savelyev, V.G.** (1981). Methods for physical and chemical analysis of binders. [Metody fiziko-himicheskogo analiza vyazhushchih veshchestv]. Higher School: Moscow, Russia, 335. (In Russ.).
13. **Ukhanov, A.V.** (2014). Experience and regulatory framework for the use of dry fly ash from Russian thermal power plants in the production of concrete, mortars and dry building mixtures. [Opyt i normativnaya baza po ispol'zovaniyu suhoi letuchei zoly TES Rossii pri proizvodstve betonov, stroitel'nyh rastvorov i suhikh stroitel'nyh smesei]. (pp. 51-57) Retrieved from: <http://osi.ecopower.ru/ru/Documents/attachments/337rus.pdf> (In Russ.).
14. **Eroshov, A. I., Martsul, I. N., Antonenkov, A. I.** (2016). Research of the effective activity of the content of natural radionuclides in construction materials. [Issledovanie effektivnoi aktivnosti sodержaniya estestvennykh radionuklidov v stroitel'nyh materialah]. (pp. 211-212) Retrieved from: <https://elib.bs.u.by/bitstream/123456789/171290/1/saharovskie-chteniya-2016-211-212.pdf> (In Russ)
15. **Rashchupkina, M.A.** (2009). The influence of the dispersion of ash from the hydraulic removal of Ekibastuz coal and the addition of liquid glass on the properties of fine-grained concrete. [Vliyanie dispersnosti zoly gidroudaleniya ekibastuzskih uglei i dobavki zhidkogo stekla na svoistva melkozernistogo betona]. Abstract of the dissertation of the Candidate of technical Sciences: 05.23.05. The Siberian State Automobile and Highway Academy. (In Russ)
16. **Hydiakova, L.I., Zalytskii, A.V., Paleev, P.L.** (2019).). The use of ash and slag waste from thermal power plants [Ispol'zovanie zoloshlakovykh othodov teplovykh elektrostantsii] (pp. 375-391) <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2019-3-375-391> (In Russ).
17. **Abdrahimov, V.Z.** (2018). Reducing environmental damage to ecosystems through the use of inter-shale clay and ash-slag material in the production of lightweight bricks and porous aggregate [Snijeniia ekologicheskogo ushcherba ekosistemam za schet ispol'zovaniia mejslantsevoi gliny i zoloshlakovogo materiala v proizvodstve legkovesnogo kirpicha i poristogo zapolnite-lia] (pp. 77-83) <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-10-77-83> (In Russ).

TUNING THE THERMAL CONDUCTIVITY OF POROUS SILICON CARBIDE CERAMICS: A REVIEW

S. Kultayeva* , E.B. Kurmanbekova 

International Educational Corporation, Almaty, 050043, Kazakhstan

Abstract. *Porous silicon carbide (SiC) ceramics possess unique thermal and structural properties, making them highly valuable for applications requiring high-temperature stability, corrosion resistance, and controlled thermal conductivity. Due to their superior characteristics, porous SiC ceramics are widely used in industrial and environmental applications, including thermal insulators, thermoelectric energy converters, fusion reactors, water purifiers, molten metal and hot gas filters, diesel particulate filters, heatable filters, heating elements, membrane supports, and catalyst supports. This paper reviews the key factors influencing the thermal conductivity of porous SiC ceramics, such as porosity, pore size, additive composition, and necking area. Understanding how each of these factors affects thermal conductivity can facilitate the design of SiC ceramics tailored to meet specific thermal and mechanical requirements. As the porosity of porous SiC ceramics increases, their thermal conductivity generally decreases. However, at a constant porosity, the thermal conductivity tends to increase with larger pore sizes. Additionally, the incorporation of conductive phases, thermally insulating secondary phases, or excess carbon or silicon significantly impacts the thermal conductivity. The development of the necking area between SiC grains also plays a critical role: a well-developed necking area improves heat transfer across the ceramic, thereby enhancing thermal conductivity. Based on these critical factors influencing thermal properties, a novel strategy for tuning the thermal conductivity of porous SiC ceramics is proposed.*

Keywords: *SiC ceramic, thermal conductivity, porosity, pore size, necking area, additive composition.*

***Corresponding author**

Shynar Kultayeva, e-mail: sh.kultayeva@kazgasa.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.4-15>

Received 03 June 2024; Revised 12 July 2024; Accepted 22 July 2024

КЕУЕКТІ КРЕМНИЙ КАРБИДІ КЕРАМИКАСЫНЫҢ ЖЫЛУ ӨТКІЗГІШТІГІН РЕТТЕУ

Ш.М. Құлтаева*^{ID}, Э.Б. Құрманбекова^{ID}

Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, 050043, Қазақстан

Аңдатпа. Кеукті кремний карбиді (SiC) керамикасы бірегей термиялық және құрылымдық қасиеттерге ие, бұл оларды жоғары температуралық тұрақтылықты, коррозияға төзімділікті және бақыланатын жылу өткізгіштікті қажет ететін қолданбалар үшін өте құнды етеді. Жоғары сипаттамаларына байланысты кеукті SiC керамикасы өнеркәсіптік және экологиялық қолданбаларда кеңінен қолданылады, соның ішінде жылу оқшаулағыштар, термоэлектрлік энергия түрлендіргіштері, термоядролық реакторлар, су тазартқыштар, балқытылған металл және ыстық газ сүзгілері, дизельдік бөлшектер сүзгілері, қыздырылатын сүзгілер, қыздыру элементтері, мембраналық тіректер және катализатор тіректері. Бұл мақалада кеуктілік, кеук өлшемі, қоспа құрамы және мойын аймағы сияқты кеукті SiC керамикасының жылу өткізгіштігіне әсер ететін негізгі факторлар қарастырылады. Осы факторлардың әрқайсысының жылу өткізгіштікке қалай әсер ететінін түсіну белгілі бір жылу және механикалық талаптарға сай жасалған SiC керамикасын жобалауды жеңілдетуі мүмкін. Кеукті SiC керамикасының кеуктілігі жоғарылаған сайын олардың жылу өткізгіштігі әдетте төмендейді. Дегенмен, тұрақты кеуктілік кезінде жылу өткізгіштік кеуктердің үлкен өлшемдерімен ұлғаяды. Сонымен қатар, өткізгіш фазалардың, жылу оқшаулағыш қайталама фазалардың немесе артық көміртектің немесе кремнийдің қосылуы жылу өткізгіштікке айтарлықтай әсер етеді. SiC дәндері арасындағы мойын аймағының дамуы да шешуші рөл атқарады: жақсы дамыған мойын аймағы керамика арқылы жылу беруді жақсартады, осылайша жылу өткізгіштігін арттырады. Жылу қасиеттеріне әсер ететін осы маңызды факторларға сүйене отырып, кеукті SiC керамикасының жылу өткізгіштігін реттеудің жаңа стратегиясы ұсынылады.

Түйін сөздер: SiC керамикасы, жылу өткізгіштік, кеуктілік, кеук өлшемі, байланыс аймағы, қоспа құрамы.

*Автор-корреспондент

Шынар Құлтаева, e-mail: sh.kultayeva@kazgasa.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.4-15>

Алынды 03 маусым 2024; Қайта қаралды 12 шілде 2024; Қабылданды 22 шілде 2024

РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Ш.М. Құлтаева* , Э.Б. Құрманбекова 

Международная образовательная корпорация, Алматы, 050043, Казахстан

Аннотация. Пористая керамика из карбида кремния (SiC) обладает уникальными теплофизическими и структурными свойствами, что делает ее очень ценной для применений, требующих высокотемпературной стабильности, коррозионной стойкости и контролируемой теплопроводности. Благодаря своим превосходным характеристикам пористая керамика SiC широко используется в промышленности и охране окружающей среды, включая теплоизоляторы, термоэлектрические преобразователи энергии, термоядерные реакторы, очистители воды, фильтры для расплавленного металла и горячего газа, сажевые фильтры для дизельного топлива, нагревательные фильтры, нагревательные элементы, мембранные подложки и катализаторы. В данной статье рассматриваются ключевые факторы, влияющие на теплопроводность пористой керамики SiC, такие как пористость, размер пор, состав присадок и площадь сужения. Понимание того, как каждый из этих факторов влияет на теплопроводность, может облегчить разработку керамики SiC, отвечающей конкретным тепловым и механическим требованиям. С увеличением пористости пористой керамики SiC ее теплопроводность, как правило, снижается. Однако при постоянной пористости теплопроводность имеет тенденцию к увеличению с увеличением размера пор. Кроме того, на теплопроводность существенно влияет наличие токопроводящих фаз, теплоизолирующих вторичных фаз или избыток углерода или кремния. Важную роль также играет наличие зоны сужения между зернами SiC: хорошо развитая зона сужения улучшает теплопередачу по керамике, тем самым повышая теплопроводность. Основываясь на этих критических факторах, влияющих на тепловые свойства, предложена новая стратегия настройки теплопроводности пористой керамики SiC.

Ключевые слова: SiC керамика, теплопроводность, пористость, размер пор, область соединения, композиция добавок.

*Автор-корреспондент

Шынар Құлтаева, e-mail: sh.kultayeva@kazgasa.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.4-15>

Поступило 12 июня 2024 г.; Пересмотрено 12 июля 2024 г.; Принято 22 июля 2024 г.

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The research was conducted with the financial support of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan within the framework of the scientific project IRN AP19174518.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС / ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің ЖТН AP19174518 гранттық қаржыландыру шеңберінде жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан ИРН AP19174518.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 INTRODUCTION

Silicon carbide (SiC) based porous ceramics are among the most significant materials in advanced ceramics. They gain significant attention and have an important role in various industrial fields due to their low density, high-temperature stability, high thermal shock resistance, excellent heat resistance, good corrosion resistance, low thermal expansion coefficient and excellent mechanical strength. These unique combinations of properties make the porous SiC ceramic a potentially useful material in various advanced applications such as energy, aerospace, and environmental engineering, where thermal conductivity is a critical parameter. By controlling porosity, pore size, and other structural factors, the thermal conductivity of porous SiC ceramics can be finely tuned to optimize performance in applications such as high-temperature insulation, filtration, and heat exchangers.

The thermal conductivity of SiC ceramics is influenced by their porosity, pore size, addition of thermally insulating secondary phases, dopant content, necking area, and additive composition. Generally, the thermal conductivity of porous SiC ceramics increases with decreasing porosity ([Rajpoot et al., 2020](#); [Pappacena et al., 2017](#); [Jana et al., 2017](#); [Jang & Sakka, 2007](#); [Wan et al., 2017](#); [Eom et al., 2008](#)). For example, in one study, porous LPS-SiC with 3 vol% Y_2O_3 -AlN exhibited an increase in thermal conductivity from 4.5 to 37.9 W/(mK) with a decrease in the porosity from 62.7% to 28.3% ([Rajpoot et al., 2020](#)). Similar trends have been observed for porous SiC ceramics derived from wood precursors ([Pappacena et al., 2017](#)), SiC foams ([Jana et al., 2017](#)), porous SiC ceramics without additives ([Jang & Sakka, 2007](#)), β -SiC nanoparticle-packed beds ([Wan et al., 2017](#)), polysiloxane-derived porous SiC ceramics ([Eom et al., 2008](#)). The thermal conductivities of the porous SiC ceramics were highly dependent on their pore sizes. Specifically, The thermal conductivity of porous SiC ceramics is significantly increased from ~ 14 W/(mK) to ~ 26 W/(mK) by increasing the pore size from ~ 7 μm to ~ 98 μm at an equivalent porosity of $\sim 54\%$ ([Das et al., 2024](#)), owing to less phonon-pore scattering in porous SiC with larger pores because of the smaller pore/strut interface areas at the same porosity. The thermal conductivity of porous SiC ceramics is greatly decreased by introducing thermally insulating secondary phases and incorporating excess carbon or silicon. These additions create heterophase boundaries (SiC/C and SiC/Si), which enhance phonon scattering at the boundaries ([Kim et al., 2020](#), [Kang et al., 2021](#)).

Understanding the thermal conductivity of porous SiC ceramics is crucial due to their wide-ranging applications in extreme environments and advanced technologies. The thermal conductivity of porous SiC ceramics directly impacts their role in thermal management systems like heat exchangers, gas turbines, and thermal barrier coatings, where efficient heat transfer or insulation is essential. Tailoring thermal conductivity through control of porosity and microstructure enables the design of materials optimized for energy systems, such as fuel cells and thermoelectric devices, improving efficiency and sustainability. Accurate knowledge enhances reliability by mitigating risks like thermal shock and ensuring long-term performance in safety-critical applications. Additionally, understanding heat transport mechanisms in porous SiC advances fundamental science and aids industries in meeting stringent performance standards while maintaining cost efficiency. Together, these factors underscore the significance of thermal conductivity in unlocking the full potential of porous SiC ceramics.

A comprehensive understanding of the thermal conductivity of porous SiC ceramics is essential for enhancing their performance, extending their applications, and addressing energy, environmental, and safety challenges in modern technology. It serves both scientific progress and practical advancements in critical industries.

The goal of this review is to summarize the effects of porosity, pore size, additive composition, and necking area on the thermal conductivity of porous SiC ceramics.

2. FACTORS AFFECTING THERMAL CONDUCTIVITY OF POROUS SiC CERAMICS

The thermal conductivity of ceramic materials is mainly dependent on the transfer of thermal elastic waves known as phonons. Phonons collide with imperfections in materials such as grain boundaries, pores, impurities, and defects, causing phonon scattering, which decreases the mean free path. The relationship between thermal conductivity (κ) and the mean free path (l) can be estimated as follows ([Watari et al., 2003](#))

$$\kappa = \frac{1}{3} (v l C_p), \quad (1)$$

where v is the velocity of sound in the solid, and C_p is the heat capacity. This equation shows that the conductivity of a material primarily depends on its mean free path. The higher the mean free path, the higher the thermal conductivity of the material becomes ([Jang et al., 2006](#)).

The intrinsic thermal conductivity values of single crystalline 6H (α -SiC), 4H (α -SiC), and 3C (β -SiC) are 490-500 W/(mK) ([Bhatnagar et al., 1993](#); [Shenai et al., 1989](#)), 400 W/(mK) ([Trew, 1997](#)), and 490 W/(mK) ([Bhatnagar et al., 1993](#)), respectively.

2.1 POROSITY

Porosity is one of the most significant factors affecting the thermal conductivity of porous SiC ceramics. The introduction of porosity into SiC ceramics is an extremely versatile and powerful strategy for greatly extending the range of engineering properties offered by SiC ceramic components. It's well known that the porosity is a nonconductive portion of the material which contains a gaseous phase, that is, air. In addition, sintering temperature also affects the thermal conductivity of porous SiC ceramics, for example, [Kultayeva et al.](#) investigated the effect of porosity on the thermal properties of porous SiC ceramics. They found that the porous SiC ceramics sintered at 2000°C and 1900°C exhibited the thermal conductivities of 14.1 and 9.4 W/(mK), respectively, at the equivalent porosity of ~ 52.3% ([Kultayeva et al., 2020](#)). The higher sintering temperature exhibited the higher thermal conductivity because of the coarser microstructure.

Table 1 shows the reported literature data of the thermal conductivity of porous SiC ceramics. Generally, the thermal conductivities of porous SiC ceramics decrease with increasing porosity ([Kultayeva et al., 2020](#); [Eom et al., 2008](#), [Kultayeva et al., 2023](#); [Kim et al., 2020](#)). Specifically, the thermal conductivity of porous SiC ceramics sintered with 10 vol% Y₂O₃-AlN additives

decreased from 37.9 to 5.8 W/(mK) as the porosity increased from 30% to 63% (Kultayeva et al., 2020). The thermal conductivity of SiC foams decreased from 14.0-4.0 W/(mK) with an increase in porosity from 69% to 88% (Jana et al., 2017).

Table 1

The thermal conductivity data of porous SiC ceramics

Porous SiC ceramics	Porosity (%)	Thermal Conductivity, (W/(mK))	References
Porous SiC ceramics with 1 vol% of BN	~62 – ~66	11.6 – 8.4	Kultayeva et al., 2021
Porous SiC-SiO ₂ composites	~62 – ~64	0.21 – 0.15	Malik et al., 2020
Porous silica-bonded SiC ceramic	55.9 – 70.2	0.186 – 0.057	Kim et al., 2020
Polysiloxane-derived porous SiC ceramics	~43 – ~74	~21 – ~2	Eom et al., 2008
Porous SiC ceramics with 10 vol% Y ₂ O ₃ -AlN	30% – 63%	37.9 – 5.8	Kultayeva et al., 2020
SiC foams	69 – 88	14.0 – 4.0	Jana et al., 2017
Wood-derived porous SiC ceramics	43% – 67%	41.5 – 15.0	Papacenna et al., 2007
Porous SiC ceramics containing 10 vol% nitride	40.2 – 66.1	22.7 – 4.8	Rajpoot et al., 2020
Porous SiC ceramics without additives	30.4 – 40.5	83 – 60	Jang & Sakka, 2007

The thermal conductivity of porous SiC ceramics fabricated by adding boron carbide additive and sintered in Ar and N₂ atmospheres increased from 7.6 to 19.8 W/(mK) and 3.3 to 5.5 W/(mK) with decreasing porosity from 68.2 to 58.3% and from 70.3 to 61.7%, respectively (Kultayeva et al., 2023). Similar results were reported for porous SiC-SiO₂ composites (Malik et al., 2020), porous silica-bonded SiC ceramic (Kim et al., 2020), polysiloxane-derived porous SiC ceramics (Eom et al., 2008), wood-derived porous SiC ceramics (Papacenna et al., 2007), porous SiC ceramics containing 10 vol% nitride (Rajpoot et al., 2020), porous SiC ceramics without additives (Jang & Sakka, 2007). These results were attributed that the porosity interrupts the direct heat conduction paths available in the bulk material, increasing the average path length for heat transport and thus reducing thermal conductivity.

These results suggest that the thermal conductivity of porous SiC ceramics can be maximized by adjusting porosity.

2.2 PORE SIZE

Pore size is another critical factor that influences thermal conductivity. Larger pores typically lead to a decrease in thermal conductivity, as the effective path for heat transfer becomes longer and more interrupted. In contrast, smaller, more uniform pores tend to support higher thermal conductivity due to shorter heat transfer paths and reduced scattering. Additionally, when pore sizes are in the nanometer range, phonon scattering increases, which can further reduce thermal

conductivity. Generally, thermal conductivity of porous SiC ceramics increases with increasing pore size (**Lucio et al., 2022**). Rajpoot et al. studied the influence of SiC powder particle size on the pore structure of porous SiC ceramics. Their findings revealed that larger initial particle sizes resulted in larger pore sizes within porous SiOC-bonded SiC ceramics. As the average pore size increased from 218 nm to 778 nm, the thermal conductivity initially increased from 0.78 to 0.86 W/(mK), but further enlargement of the pore size to 1013 nm caused the thermal conductivity to decline to 0.58 W/(mK). The study also demonstrated that changes in the starting particle size influenced not only pore size but also the overall porosity of the porous SiC ceramics (**Rajpoot et al., 2021**). Das et al. investigated the effect of pore size on the thermal conductivity of porous SiC ceramics by varying pore sizes from $\sim 7 \mu\text{m}$ to $\sim 98 \mu\text{m}$ with the same porosities ($\sim 54\%$ and $\sim 63\%$). They found that the thermal conductivity of porous SiC ceramics increased from ~ 14.3 to ~ 26.2 W/(mK) with an increase in average pore size from ~ 7 to $\sim 98 \mu\text{m}$, respectively, at the porosity of $\sim 54\%$. The increase in thermal conductivity with increasing pore size (larger pores) was attributed to reduced phonon-pore scattering because of the smaller number of pores, that is, smaller pore/strut interface areas at the same porosity, which leads to an increase in the mean free path of the phonons (**Das et al., 2023**).

These results suggest that the thermal conductivities of porous SiC ceramics can be successfully tuned for various applications by adjusting the pore size at a constant porosity.

2.3 ADDITIVE COMPOSITION

Additives are frequently introduced to improve densification or modify the microstructure of SiC ceramics. Common additives like aluminum oxide (Al_2O_3), boron carbide (B_4C), and yttrium oxide (Y_2O_3) can affect thermal conductivity by altering the sintering behavior, grain structure, and phase composition of the ceramics. Additives can either increase or decrease thermal conductivity depending on their influence on grain boundaries and secondary phase formation.

Additive composition influences the necking area and grain boundary structure of porous SiC ceramics. Kultayeva et al. reported that the thermal conductivity of undoped porous SiC ceramic (~ 11 W/(mK)) at a constant porosity of $\sim 61.3\%$ increased by 48% (~ 17 W/(mK)) when 1 vol% B_4C was added and decreased by 31% (~ 8 W/(mK)) when 1 vol% Sc_2O_3 was added (**Kultayeva et al., 2021a**). Additionally, **Taki et al. (2018)** and **Kim et al. (2020)** found that adding excess carbon or silicon to porous SiC ceramics decreased their thermal conductivity. Similarly, **Malik et al. (2020)** and **Kang et al. (2021)** observed that introducing a thermally insulating secondary phase into porous SiC ceramics significantly increased interfacial thermal resistance, leading to a decrease in thermal conductivity. **Rajpoot et al. (2020)** demonstrated that the electrical conductivity of porous SiC ceramics can be adjusted independently of thermal conductivity by incorporating metal nitrides such as AlN, BN, or TiN. **Yeom et al.** investigated the influence of rare-earth oxide composition on the thermal conductivity of porous liquid-phase-sintered SiC ceramics. They found that, at the same porosity of 54.2%, the thermal conductivity increased by approximately 56%, increasing from ~ 9 W/(mK) for porous SiC ceramics sintered with 5 vol% AlN- Lu_2O_3 to 14.4 W/(mK) for those sintered with 5 vol% AlN- Sc_2O_3 . Dense SiC ceramics sintered without Al-containing additives exhibited thermal conductivities as high as 167–262 W/(m·K) (**Jang et al., 2016; Cho & Kim, 2017; Seo et al. 2017**), while those with Al-containing

additives showed much lower values, ranging from 32 to 80 W/(m·K) (Zhan et al., 2002; Eom et al., 2016).

These results suggest, that the thermal conductivity of SiC ceramics is strongly affected by porosity and potentially by the incorporation of dopant atoms into the SiC lattice. These findings demonstrate that Al-containing additives are detrimental to improving the thermal properties of porous SiC ceramics, whereas B-containing additives effectively enhance their thermal conductivity.

2.4 NECKING AREA

The necking area, or the bonding area between SiC grains, directly impacts thermal conductivity. A larger necking area increases thermal conductivity by allowing more direct solid-to-solid contact between grains, improving heat transfer across the porous SiC ceramic. Conversely, a smaller necking area restricts heat flow, decreasing thermal conductivity. The necking area can be controlled through sintering parameters, such as temperature, additive compositions, and atmosphere (Ar or N₂). High-temperature sintering generally increases the necking area between SiC grains by promoting grain growth, leading to higher thermal conductivity. Kultayeva et al. (2021) studied influence of BN additives and sintering atmosphere on microstructure and properties of porous SiC ceramics. Porous SiC ceramic with 1.5 vol% of BN sintered in Ar atmosphere exhibited higher thermal conductivity (11.6 W/(mK)) than that of porous SiC ceramic with 1.5 vol% of BN sintered in N₂ atmosphere (4.6 W/(mK)) at 65.9% porosity. Another study by Kultayeva et al. (2023) reported the similar trend for porous SiC ceramics with a boron carbide additive (B₄C) sintered in Ar and N₂ atmospheres. They found that the thermal conductivity of porous SiC ceramics increases as the necking area between SiC grains grows. A larger necking area facilitates a broader conduction path for phonons, resulting in higher thermal conductivity. In porous SiC ceramics sintered with B₄C or BN additives, the necking area can be controlled by adjusting the sintering atmosphere and the content of B₄C or BN. Additionally, the thermal conductivity of porous SiC ceramics sintered with 1 vol% B₄C (16.6 W/(mK)) was approximately 48% higher than that of a porous SiC ceramic without the addition of B₄C (11.2 W/(mK)) at an equivalent porosity of ~ 61.3%.

These findings indicate that boron doping within the SiC lattice plays a crucial role in forming a broader necking area between SiC grains, which significantly enhances the thermal conductivity of porous SiC ceramics. Additionally, the thermal conductivity of porous SiC ceramics can be optimized by carefully adjusting the amount of B₄C and BN additives and conducting the sintering process in an argon (Ar) atmosphere to achieve the desired microstructural and thermal properties.

3 CONCLUSIONS

This review highlights that factors such as porosity, pore size, additive composition, and necking area significantly impact the thermal conductivity of porous SiC ceramics. The following are the main conclusions:

- (1) The thermal conductivity of porous SiC ceramics is influenced by its porosity, i.e. with an increase in porosity the thermal conductivity decreases. This is because the porosity interrupts the direct heat conduction paths available in the bulk material, increasing the average path length for heat transport and thus reducing thermal conductivity.
- (2) The thermal conductivity of porous SiC ceramics increase with increasing pore size at constant porosity. The increase in thermal conductivity with increasing pore size (larger pores) was attributed to reduced phonon-pore scattering because of the smaller number of pores, that is, smaller pore/strut interface areas at the same porosity.
- (3) The thermal conductivity of porous SiC ceramics is strongly affected by porosity and potentially by the incorporation of dopant atoms into the SiC lattice. B-containing additives are beneficial to improve the thermal conductivity porous SiC ceramics.
- (4) B-doping into the SiC lattice plays a crucial role in forming a wider necking area between SiC grains, which significantly enhances the thermal conductivity of porous SiC ceramics. Additionally, the thermal conductivity of porous SiC ceramics can be optimized by carefully adjusting the amount of B₄C and BN additives and conducting the sintering process in an argon (Ar) atmosphere to achieve the desired microstructural and thermal properties.

4 FUTURE WORK

Developing innovative approaches to control the thermal properties of porous SiC ceramics holds immense potential for enabling diverse applications in the near future. Despite their promise, the influence of incorporating conductive phases like carbon nanotubes on the properties of porous SiC ceramics has not yet been investigated. Studying how carbon nanotubes affect the electrical and thermal characteristics of these ceramics offers an interesting area for future research. By advancing processing methods and deepening our understanding of microstructural influences, it will be possible to engineer porous SiC ceramics with precisely controlled thermal properties. This progress could unlock a broad range of high-performance applications, significantly enhancing the functionality and diversity of the advanced porous SiC ceramics

REFERENCES

1. **Pappacena, K. E., Faber, K. T., Wang, H., & Porter, W. D.** (2007). Thermal conductivity of porous silicon carbide derived from wood precursors. *Journal of the American Ceramic Society*, 90, 2855–2862. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01777.x>
2. **Eom, J. H., Kim, Y. W., Song, I. H., & Kim, H. D.** (2008). Processing and properties of polysiloxane derived porous silicon carbide ceramics using hollow microspheres as templates. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(6), 1029–1035. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.09.009>
3. **Rajpoot, S., Ha, J. H., Kim, Y. W., & Kim, K. J.** (2020). Electrical, thermal, and mechanical properties of porous SiC-nitride composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(12), 3851–3862. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.04.018>

4. **Jana, D. C., Sundararajan, G., & Chattopadhyay, K.** (2017). Effect of porosity on structure, Young's modulus, and thermal conductivity of SiC foams by direct foaming and gelcasting. *Journal of the American Ceramic Society*, 100, 312–322. <https://doi.org/10.1111/jace.14544>
5. **Wan, P., Gao, L., & Wang, J.** (2017). Approaching ultra-low thermal conductivity in β -SiC nanoparticle packed beds through multiple heat blocking mechanisms. *Scripta Materialia*, 128, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.09.027>
6. **Jang, B. K., & Sakka, Y.** (2007). Thermophysical properties of porous SiC ceramics fabricated by pressureless sintering. *Science and Technology of Advanced Materials*, 8(9), 655–659. <https://doi.org/10.1016/j.stam.2007.08.003>
7. **Das, D., Lucio, M. D. S., Kultayeva, S., & Kim, Y. W.** (2024). Effects of pore size on electrical and thermal properties of porous SiC ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 21, 2651–2662. <https://doi.org/10.1111/ijac.14620>
8. **Kim, G. D., Kim, Y. W., Song, I. H., & Kim, K. J.** (2020). Effects of carbon and silicon on electrical, thermal, and mechanical properties of porous silicon carbide ceramics. *Ceramics International*, 46(10), PartA, 15594–15603. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.106>
9. **Kang, E. S., Kim, Y. W., & Nam, W. H.** (2021). Multiple thermal resistance induced extremely low thermal conductivity in porous SiC-SiO₂ ceramics with hierarchical porosity. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(2), 1171–1180. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.10.004>
10. **Watari, K., Nakano, H., Sato, K., Urabe, K., Ishizaki, K., Cao, S., Mori, K.** (2003). Effect of grain boundaries on thermal conductivity of silicon carbide ceramic at 5 to 1300 K. *Journal of American Ceramic Society*, 86(10), 1812–14. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03563.x>
11. **Bhatnagar, M., & Baliga, B. J.** (1993). Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for power devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 40(4), 645–655.
12. **Shenai, K., Scott, R. S., & Baliga, B. J.** (1989). Optimum semiconductors for high-power electronics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 36(10), 1811–1823. <https://doi.org/10.1109/16.34247>
13. **Trew, R. J.** (1997). Experimental and simulated results of SiC microwave power MESFETs. *Physica Status Solidi (A)*, 162(2), 409–419. [https://doi.org/10.1002/1521-396X\(199707\)162:1%3C409::AID-PSSA409%3E3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/1521-396X(199707)162:1%3C409::AID-PSSA409%3E3.0.CO;2-O)
14. **Kultayeva, S., Ha, J. H., Malik, R., Kim, Y. W., & Kim, K. J.** (2020). Effects of porosity on electrical and thermal conductivities of porous SiC ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(4), 996–1004. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.045>
15. **Kultayeva, S., Kim, Y. W.** (2023). Electrical, thermal, and mechanical properties of porous silicon carbide ceramics with a boron carbide additive. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 20, 1114–1128. <https://doi.org/10.1111/ijac.14113>
16. **Kim, Y. H., Kim, Y. W., & Seo, W. S.** (2020). Processing and properties of silica-bonded porous nano-SiC ceramics with extremely low thermal conductivity. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(7), 2623–2633. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.11.072>
17. **Kultayeva, S., Kim, Y. W., & Song, I. H.** (2021). Influence of sintering atmosphere and BN additives on microstructure and properties of porous SiC ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(14), 6925–6933. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.07.039>
18. **Malik, R., Kim, Y. W., & Song, I. H.** (2020). High interfacial thermal resistance induced low thermal conductivity in porous SiC-SiO₂ composites with hierarchical porosity. *Journal of the*

- European Ceramic Society, 40(3), 594–602. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.10.056>
19. **Lucio, M.D.S., Kultayeva, S., Kim, Y.W.** (2022). Improved mechanical strength and thermal resistance of porous SiC ceramics with gradient pore sizes. *Journal of the European Ceramic Society*, 42, 6785–94. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.09.001>
 20. **Rajpoot, S., Ha, J. H., & Kim, Y. W.** (2021). Effects of initial particle size on mechanical, thermal, and electrical properties of porous SiC ceramics. *Ceramics International*, 47(6), 8668–8676. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.238>
 21. **Kultayeva, S., Kim, Y. W., & Song, I. H.** (2021). Effects of dopants on electrical, thermal, and mechanical properties of porous SiC ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(7), 4006–4015. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.01.049>
 22. **Taki, Y., Kitiwan, M., Katsui, H., & Goto, T.** (2018). Electrical and thermal properties of off-stoichiometric SiC prepared by spark plasma sintering. *Journal of the Asian Ceramic Societies*, 6(1), 95–101. <https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1446490>
 23. **Jang, S. H., Kim, Y. W., Kim, K. J., Lee, S. J., & Lim, K. Y.** (2016). Effects of Y₂O₃–RE₂O₃ (RE = Sm, Gd, Lu) additives on electrical and thermal properties of silicon carbide ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(1), 265–272. <https://doi.org/10.1111/jace.13958>
 24. **Cho, T. Y., & Kim, Y. W.** (2017). Effect of grain growth on the thermal conductivity of liquid-phase sintered silicon carbide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 37(11), 3475–3481. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.050>
 25. **Seo, Y. K., Kim, Y. W., Nishimura, T., Seo, W. S.** (2017). High thermal conductivity of spark plasma sintered silicon carbide ceramics with yttria and scandia. *Journal of the American Ceramic Society*, 100, 1290–1294. <https://doi.org/10.1111/jace.14748>
 26. **Zhan, G. D., Mitomo, M., & Mukherjee, A. K.** (2002). Effects of heat treatment and sintering additives on thermal conductivity and electrical resistivity in fine-grained SiC ceramics. *Journal of Materials Research*, 17, 2327–2333. <https://doi.org/10.1557/JMR.2002.0341>
 27. **Eom, J. H., Seo, Y. K., & Kim, Y. W.** (2016). Mechanical and thermal properties of pressureless sintered silicon carbide ceramics with alumina-yttria-calcia. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(5), 1735–1741. <https://doi.org/10.1111/jace.14114>
 28. **Yeom, J. A., Kang, E. S., Kim, Y. W., & Nam, W. H.** (2022). Microstructure and properties of porous SiC ceramics with AlN–RE₂O₃ (RE=Sc, Y, Lu) additives. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(11), 4446–4455. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.04.050>

ҚазБСҚА ХАБАРШЫСЫ 3(93) 2024

Ғылыми журнал
2001 жылдан шыға бастады.
Қазақстан Республикасының Ақпарат және қоғамдық
келісім министрлігінде тіркеліп,
2000 жылдың 14 тамызында №1438-Ж куәлігі берілген.
2021 жылдан бастап ашық қол жетімді электронды интернет-басылым ретінде
шығарылады (<https://vestnik.kazgasa.kz>)

ВЕСТНИК КазГАСА 3(93) 2024

Научный журнал
Издается с 2001 г.
Зарегистрирован Министерством информации и общественного согласия
Республики Казахстан. Свидетельство №1438-Ж от 14 августа 2000 г.
С 2021 года журнал выходит как электронное онлайн-издание с открытым
доступом (<https://vestnik.kazgasa.kz>).

Материалды компьютерде беттеген/
верстка оригинал-макета – *Ибрашева М.А.*
Редактор – *Есимханова А.Е.*

Басуға 27.08.2024 ж. қол қойылды.
Форматы 70x100/16. Офсет қағазы.
Есептік баспа табағы 22,25. Шартты баспа табағы 22,62.
Таралымы 250 дана.
Бағасы келісім бойынша.

Подписано 27.08.2024 г. в печать.
Формат 70x100/16. Бумага офсетная.
Уч.-изд. л. 22,25. Усл. печ. л. 22,62.
Тираж 250 экз.
Цена договорная.

Халықаралық білім беру корпорациясы, 2024
050043, Алматы қ-сы, Қ. Рысқұлбеков к-сі, 28
«Құрылыс және сәулет» баспасында басылып шықты
050043, Алматы қ-сы, Қ. Рысқұлбеков к-сі, 28

Международная образовательная корпорация, 2024
050043, г. Алматы, ул. К. Рыскулбекова, 28
Отпечатано в Издательстве «Строительство и архитектура»
050043, г. Алматы, ул. К. Рыскулбекова, 28
Тел. 8 (727) 355 10 56
kazgasa@mail.ru, nauka_kazgasa@mail.ru