

ISSN 2520-2227

ПАЁМИ ПОЛИТЕХНИКӢ

Бахши Таҳқиқотҳои муҳандисӣ

3 (75) 2026



ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Серия: Инженерные исследования

POLYTECHNIC BULLETIN
Series: Engineering studies

ПАЁМИ ПОЛИТЕХНИКӢ БАХШИ ТАҲҚИҚОТҲОИ МУҲАНДИСӢ



ISSN
2520-2227

3(75)
2026



МАҶАЛЛАИ ИЛМӢ – ТЕХНИКӢ

<http://vp-es.ttu.tj/> E-mail: vestnik_politech@ttu.tj

Published since January 2008

Маҷалла ба рӯйхати наирияхои тақризии КОА-и назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон, КОА-и назди Вазорати таҳсилоти олии, илм ва инноватсияҳои Ҷумҳурии Узбекистон ва равияи металлургияи он ба рӯйхати наирияхои тақризии КОА-и Федератсияи Россия ворид карда шудааст.

Журнал включен в перечень рецензируемых изданий ВАК при Президенте Республики Таджикистан, ВАК при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан, а его металлургическое направление в перечень рецензируемых изданий ВАК Российской Федерации.

The journal is included in the list of peer-reviewed publications of the HAC under the President of the Republic of Tajikistan, the HAC under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan, and its metallurgical direction in the list of peer-reviewed publications of the HAC of the Russian Federation.

Маҷалла дар Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон ба қайд гирифта шудааст.

№ 409/МЧ-97 аз 09 апрели соли 2025

Индекси обунa 77762

РАВИАИ ИЛМИИ МАҶАЛЛА	НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ЖУРНАЛА	SCIENTIFIC DIRECTION
05.14.00 Энергетика 05.16.00 Металлургия ва маводишиносӣ 05.17.00 Технологияи кимиёвӣ 05.22.00 Нақлиёт 05.23.00 Сохтмон ва меъморӣ	05.14.00 Энергетика 05.16.00 Металлургия и материаловедение 05.17.00 Химическая технология 05.22.00 Транспорт 05.23.00 Строительство и архитектура	05.14.00 Energy 05.16.00 Metallurgy and materials science 05.17.00 Chemical technology 05.22.00 Transport 05.23.00 Construction and architecture

Муассис ва ношир	Учредитель и издатель	Founder and publisher
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
Ҳар семоҳа нашр мешавад	Издається ежеквартально	Published quarterly

Нишонӣ	Адрес редакции	Editorial office address
734042, г. Душанбе, хиёбони академикҳо Раҷабовҳо, 10А Тел.: (+992 37) 227-57-87	734042, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10А Тел.: (+992 37) 227-57-87	734042, Dushanbe, Avenue of Academicians Radjabovs, 10A Tel.: (+992 37) 227-57-87

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

POLYTECHNIC BULLETen

SERIES: ENGINEERING STUDIES

ҲАЙАТИ ТАҲРИРИЯ
САРМУҲАРРИР

Қ.Қ. ДАВЛАТЗОДА

д.и.и, профессор

Р.Т. АБДУЛЛОЗОДА

н.и.т., дотсент, муовини сармуҳаррир

Ш.А. БОЗОРОВ

н.и.т., дотсент, муовини сармуҳаррир

АЪЗОЁН

А.И. СИДОРОВ

д.и.т., профессор (Федератсияи Россия)

А.Г. ФИШОВ

д.и.т., профессор (Федератсияи Россия)

З.Ш. ЮЛДАШЕВ

д.и.т., дотсент

Л.С. ҚАСОБОВ

н.и.т., дотсент

А.Қ. ҚИРҒИЗОВ

н.и.т., и.в. дотсент

И.Н. ҒАНИЕВ

академики АМИТ, д.и.х., профессор

Ҳ.О. ОДИНАЗОДА

узви вобастаи АМИТ, д.и.т., профессор

Т.Қ. ЧУРАЕВ

д.и.х., профессор

М.М. ҲАҚДОД

узви вобастаи АМИТ, д.и.т., профессор

А.Б. БАДАЛОВ

узви вобастаи АМИТ, д.и.х., профессор

А.С. САЙДАЛИЗОДА

д.и.т., дотсент

В.В. СИЛЯНОВ

д.и.т., профессор (Федератсияи Россия)

Р.А. ДАВЛАТШОЕВ

н.и.т., дотсент

М.Ю. ЮНУСОВ

н.и.т., и.в. дотсент

Р. САЛОМЗОДА

н.и.т., дотсент

М.А. АБДУЛЛО

н.и.т., дотсент

А.Қ. РАҲМОНЗОДА

н.и.т., дотсент

Қ.Н. НИЗОМОВ

узви вобастаи АМИТ, д.и.т., профессор

И. ҚАЛАНДАРБЕКОВ

д.и.т., профессор

А. Г. ГИЯСОВ

д.и.т., профессор (Федератсияи Россия)

Н.Н. ҲАСАНОВ

доктори меъморӣ, и.в. профессор

Р.С. МУҚИМОВ

доктори меъморӣ, профессор

Қ.Ҳ. САИДЗОДА

д.и.т., профессор

Р.Ҳ. РАСУЛОВ

д.и.т., профессор (Ҷумҳурии Ўзбекистон)

Н.М. ҲАСАНОВ

д.и.т., дотсент

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.К. ДАВЛАТЗОДА

д.э.н., профессор

Р.Т. АБДУЛЛОЗОДА

к.т.н., доцент, зам. главного редактора

Ш.А. БОЗОРОВ

к.т.н., доцент, зам. главного редактора

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

А.И. СИДОРОВ

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

А.Г. ФИШОВ

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

З.Ш. ЮЛДАШЕВ

д.т.н., доцент

Л.С. КАСОБОВ

к.т.н., доцент

А.К. КИРГИЗОВ

к.т.н., и.о. доцента

И.Н. ГАНИЕВ

академик АН РТ, д.х.н. профессор

Х.О. ОДИНАЗОДА

член-корр. АН РТ, д.т.н., профессор

Т.Д. ДЖУРАЕВ

д.х.н., профессор

М.М. ҲАҚДОД

член-корр. АН РТ, д.т.н., профессор

А.Б. БАДАЛОВ

член-корр. АН РТ, д.х.н., профессор

А.С. САИДАЛИЗОДА

д.т.н., доцент

В.В. СИЛЯНОВ

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

Р.А. ДАВЛАТШОЕВ

к.т.н., доцент

М.Ю. ЮНУСОВ

к.т.н., и.о. доцента

Р. САЛОМЗОДА

к.т.н., доцент

М.А. АБДУЛЛО

к.т.н., доцент

А.ДЖ. РАҲМОНЗОДА

к.т.н., доцент

Д.Н. НИЗОМОВ

член-корр. АН РТ, д.т.н., профессор

И. ҚАЛАНДАРБЕКОВ

д.т.н., профессор

А. Г. ГИЯСОВ

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

Н.Н. ҲАСАНОВ

доктор архитектуры, и.о. профессора

Р.С. МУКИМОВ

доктор архитектуры, профессор

Дж.Х. САИДЗОДА

д.т.н., профессор

Р.Ҳ. РАСУЛОВ

д.т.н., профессор (Республика Узбекистан)

Н.М. ҲАСАНОВ

д.т.н., доцент

Материалы публикуются в авторской редакции. Авторы опубликованных работ несут ответственность за оригинальность и научно-теоретический уровень публикуемого материала, точность приведенных фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений. Редакция не несет ответственность за достоверность информации, приводимой авторами.

Автор, направляя рукопись в Редакцию, принимает личную ответственность за оригинальность исследования, поручает Редакции обнародовать произведение посредством его опубликования в печати.

МУНДАРИҶА – ОГЛАВЛЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА - ENERGY	5
<i>ТАҲЛИЛИ ТАҲҚИҚОТ ҶИҲАТИ БАЛАНД БАРДОШТАНИ САМАРАНОКИИ ТАЪМИНОТИ БАҶ БО ИСТИФОДАИ ЭНЕРГИЯИ ОҒТОБ</i>	<i>5</i>
Ш.А. Бобозода	5
МЕТАЛЛУРГИЯ ВА МАВОДШИНОСӢ - МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ - METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE.....	16
<i>ТАЪСИРИ ИЛОВАИ НИКЕЛ БА ПОТЕНЦИАЛИ КОРРОЗИЯИ ОЗОДИ ХУЛАҲОИ</i>	<i>16</i>
<i>Zn5Al ВА Zn55Al ДАР МУҲИТИ МАҲЛУЛИ NaCl.....</i>	<i>16</i>
З.Ф. Нарзуллоев, Ҷ.Н. Алиев, И.Н. Ганиев	16
ТЕХНОЛОГИЯИ КИМИЁВӢ - ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ - CHEMICAL TECHNOLOGY	24
<i>ХУСУСИЯТҲОИ ГИДРОХИМИЯВИИ ОБҲОИ ЗЕРИЗАМИНИИ ТОҶИКИСТОНИ МАРКАЗӢ.....</i>	<i>24</i>
Ф.И. Нажмудинова, А.С. Қодирӣ, И.М. Раҳимов	24
НАҚЛИЁТ - ТРАНСПОРТ - TRANSPORT	32
<i>КОМПЛЕКСНАЯ КОНЦЕПЦИЯ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЕЖНОСТИ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ</i>	<i>32</i>
Абдулло Мамадамон	32
<i>ПРИОРИТЕТЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В РЕСПУБЛИКЕ ТАДЖИКИСТАН</i>	<i>42</i>
Ф.Н. Низомзода	42
<i>MATHEMATICAL MODELLING OF TIME-DEPENDENT HEAT FLUX AND TEMPERATURE VARIATION IN A BRAKE DISC DURING BRAKING</i>	<i>50</i>
¹ A. Shermukhamedov, ² U. Rahmatov	50
<i>УРОВНИ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМИ АКТИВАМИ: ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ</i>	<i>63</i>
С.Б. Мирзозода	63
<i>АСОСНОККУНИИ ИҚТИСОДИИ САМАРАНОКИИ МОЛИЯВИИ ВОСИТАҲОИ НАҚЛИЁТИ БАҶӢ ВА МОДЕЛСОЗИИ ТАРОФАҲО ДАР БОЗОРИ ТАКСИИ ШАҲРИ ДУШАҢБЕ</i>	<i>73</i>
Ҷ.Т. Пиров	73
<i>СОПОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ И НОРМ РАСХОДА ТОПЛИВА АВТОМОБИЛЯ С ДВС В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ (НА ПРИМЕРЕ ТРАССЫ КУЛЯБ – ШОХОН)»</i>	<i>89</i>
Абдулло Мамадамон, Саъдуллозода Шахриёр, Сайфиддинзода Одил	89
<i>THE MAIN CRITERIA FOR THE PLACEMENT OF TRANSPORT AND LOGISTICS CENTERS IN THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN .</i>	<i>99</i>
F.N. Nizomzoda	99
СОХТМОН ВА МЕЪМОРӢ - СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА - CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE	106
<i>ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ ПЛИТЫ С КОЛОННОЙ В БЕЗРИГЕЛЬНОМ КАРКАСЕ</i>	<i>106</i>
И.С. Муминов	106
<i>КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА БЕТОНА КЛАССА В30 В ПРОЦЕССЕ ТВЕРДЕНИЯ</i>	<i>115</i>
¹ О.Б. Бердиев, ² Б.Ф. Ботиров	115

<u>МЕТОДИКА ВЫБОРА И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОГЭС НА ЗАТВОРАХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ</u>	<u>126</u>
¹ М.М. Мухаммадиев, ¹ К.С. Джураев, ¹ Д.А. Маматкулов, ² Н.М. Хасанзода.....	126

УДК: 620.91

DOI: 10.65599/ENG6231

ТАҲЛИЛИ ТАҲҚИҚОТ ЧИҲАТИ БАЛАНД БАРДОШТАНИ САМАРАНОКИИ ТАЪМИНОТИ БАРҚ БО ИСТИФОДАИ ЭНЕРГИЯИ ОҒТОБ

Ш.А. Бобозода

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола натиҷаҳои таҳқиқот ва таҳлили роҳҳои баланд бардоштани самаранокии таъминоти барқ дар асоси истифодаи манбаҳои барқароршавандаи энергия, махсусан энергияи офтобӣ, мавриди омӯзиш қарор гирифтаанд. Мақсади асосии таҳқиқот таҳлили имкониятҳои истифодаи энергия офтобӣ барои зиёд намудани истеҳсоли нерӯи барқ, коҳиш додани талафоти он ҳангоми интиқол ва баланд бардоштани эътимоднокии таъминоти барқ, бахусус дар минтақаҳои дурдаст ва аз шабакаҳои марказии барқ дур ҷойгиршуда мебошад. Дар ин замина, истифодаи панелҳои фотоэлектрикӣ ҳамчун яке аз роҳҳои алтернативӣ ва аз ҷиҳати экологӣ тозаи истеҳсоли нерӯи барқ баррасӣ гардидааст. Дар раванди таҳқиқот як қатор қорҳои илмӣ оид ба истифодаи энергияи офтоб, системаҳои мустақили фотоэлектрикӣ, системаҳои гибридии таъминоти барқ, системаҳои пайгирии офтобӣ, усулҳои муайян намудани иқтидори оптималии панелҳои офтобӣ ва аккумуляторҳо, инчунин усулҳои коҳиш додани талафоти энергияи барқ таҳлил карда шудаанд. Дар натиҷаи таҳлил муайян гардид, ки истифодаи панелҳои офтобӣ метавонад дар минтақаҳои дурдаст роҳи самараноки таъмини истеъмолкунандагон бо нерӯи барқ бошад. Истифодаи чунин системаҳо имконият медиҳад, ки вобастагӣ аз ҳаҷми дарози интиқоли барқ ва сӯзишвории анъанавӣ коҳиш ёфта, талафоти нерӯи барқ ҳангоми интиқол кам ва эътимоднокии таъминоти барқ баланд карда шавад. Ҳамзамон, афзоиши иқтидори насбшудаи панелҳои офтобӣ ва интиҳоби дурусти шумораи иқтидори онҳо метавонад барои зиёд намудани ҳаҷми истеҳсоли нерӯи барқ ва мутобик намудани истеҳсол ба талаботи воқеии истеъмолкунанда мусоидат намояд.

Калидвожаҳо: энергияи офтоб, манбаҳои барқароршавандаи энергия, панелҳои фотоэлектрикӣ, таъминоти барқ, минтақаҳои дурдаст, талафоти нерӯи барқ, системаи гибридии.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Ш.А. Бобозода

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье рассматриваются результаты исследования и анализа путей повышения эффективности электроснабжения на основе использования возобновляемых источников энергии, в частности солнечной энергии. Основной целью исследования является анализ возможностей использования солнечной энергии для увеличения выработки электрической энергии, снижения потерь при её передаче и повышения надёжности электроснабжения, особенно в отдалённых районах, расположенных на значительном расстоянии от централизованных электрических сетей. В данном контексте рассматривается применение фотоэлектрических панелей как одного из альтернативных и экологически чистых способов производства электрической энергии. В процессе исследования проанализирован ряд научных работ, посвящённых использованию солнечной энергии, автономным фотоэлектрическим системам, гибридным системам электроснабжения, системам слежения за движением Солнца, методам определения оптимальной мощности солнечных панелей и аккумуляторных батарей, а также методам снижения потерь электрической энергии. В результате проведённого анализа установлено, что использование солнечных панелей в отдалённых районах может являться эффективным способом обеспечения потребителей электрической энергией. Применение таких систем позволяет снизить зависимость от протяжённых линий электропередачи и традиционных видов топлива, уменьшить потери электрической энергии при её передаче и повысить надёжность электроснабжения. Одновременно увеличение установленной мощности солнечных панелей и правильный выбор их количества и номинальной мощности могут способствовать повышению объёма производства электрической энергии и обеспечению соответствия выработки фактическим потребностям потребителей.

Ключевые слова: солнечная энергия, возобновляемые источники энергии, фотоэлектрические панели, электроснабжение, отдалённые районы, потери электрической энергии, гибридная система.

ANALYSIS OF RESEARCH APPROACHES TO ENHANCING ELECTRICITY SUPPLY EFFICIENCY THROUGH THE USE OF SOLAR ENERGY

Sh.A. Bobozoda

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

This article presents the results of a study and analysis of approaches to improving the efficiency of electricity supply through the utilization of renewable energy sources, particularly solar energy. The primary objective of the study is to assess the potential of solar energy for increasing electricity generation, reducing power transmission losses, and enhancing the reliability of electricity supply, particularly in remote areas located at considerable distances from centralized power grids. In this context, the application of photovoltaic panels is considered as one of the alternatives and environmentally sustainable methods of electricity

generation. The study analyzes a range of scientific publications addressing the utilization of solar energy, stand-alone photovoltaic systems, hybrid power supply systems, solar tracking systems, methods for determining the optimal capacity of solar panels and battery storage systems, as well as approaches to reducing electrical energy losses. The analysis demonstrates that the use of solar panels in remote areas can provide an effective means of supplying consumers with electricity. The implementation of such systems can reduce dependence on long-distance transmission lines and conventional fuels, minimize electricity transmission losses, and improve the reliability of power supply. Furthermore, increasing the installed capacity of solar panels and properly selecting their number and rated capacity can contribute to higher electricity generation and better alignment of power production with the actual demand of consumers.

Keywords: solar energy, renewable energy sources, photovoltaic panels, electricity supply, remote areas, electrical energy losses, hybrid system.

1. Муқаддима (Introduction)

Дар солҳои охир масъалаи гармшавии глобалӣ, ки яке аз сабабҳои асосии он афзоиши партовҳои CO₂ ба атмосфера мебошад, ба марҳилаи ҳассос ворид шудааст. Бо мақсади ҳалли ин масъала Протоколи Киото ва баъдан Созишномаи Париж дар доираи Конвенсияи қолабии Созмони Милали Муттаҳид оид ба тағйирёбии иқлим қабул гардиданд. Ҳадафи асосии ин созишномаҳо маҳдуд намудани афзоиши ҳарорати миёнаи ҷаҳонӣ то 1,5 °C тавассути коҳиш додани партовҳои CO₂ мебошад [1 – 2]. Барои ноил шудан ба ин ҳадаф кишварҳо бояд ба иқтисодиёти камкарбон гузаранд ва талаботи энергетикӣ худро тавассути истифодаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия (МБЭ) қонеъ намоянд. Тибқи маълумоти манбаъҳои гуногун, беш аз 40%-и партовҳои ҷаҳонии CO₂ ба соҳаи энергетика рост меояд [3], ки дар он низоми энергетикӣ яке аз ҷузъҳои калидӣ ба ҳисоб меравад.

Системаи энергетикӣ (СЭ) метавон ҳамаҷун сохтори мураккаби динамикӣ баррасӣ намуд, ки вазифаи асосии он истеҳсол, интиқол, тақсирот ва истеъмоли энергияи электрикӣ (ЭЭ) мебошад. Дар фаъолияти ҷунин система бояд тавозуни байни истеҳсол ва истеъмоли ЭЭ пайваста нигоҳ дошта шавад. Дар айни замон қисми назарраси нерӯи барқӣ истеҳсолшуда дар нерӯгоҳҳои гармидиҳӣ тавассути сӯзонидани сӯзишвории фосилӣ ба даст оварда мешавад. Аз ин рӯ, яке аз ҳадафҳои асосии СЭ-и муосир коҳиш додани CO₂ ва гузариш ба раванди истеҳсоли барқӣ аз ҷиҳати экологӣ тоза мебошад [4]. Ин раванд асосан тавассути истифодаи МБЭ, аз ҷумла энергияи офтоб, шамол ва гидроэнергетика [5 – 7], амалӣ карда мешавад.

Тибқи омори ҷаҳонӣ, дар солҳои охир гузариши назаррас аз усулҳои анъанавии истеҳсоли нерӯи барқ ба истифодаи МБЭ мушоҳида мегардад. Афзоиши ҷаҳонии истеҳсоли ЭЭ аз ҳисоби МБЭ дар соли 2025 ба 8,5% расида, ҳиссаи умумии онҳо дар баланси энергетикӣ ҷаҳонӣ 33,6%-ро ташкил дод [8]. Дар Иттиҳоди Аврупо дар соли 2025 ҳиссаи ЭЭ-и истеҳсолшуда бо истифодаи МБЭ ба 48,2% расид, дар ҳоле ки дар Чин ва ИМА ин нишондиҳанда мутаносибан 36,6% ва 24,5%-ро ташкил дод. Дар кишварҳои Осиёи Ҷануби Шарқӣ ва Ҳиндустон ҳиссаи мазкур дар соли 2025 мутаносибан ба 26,5% ва 23,6% баробар буд [8]. Дар сохтори МБЭ энергияи офтоб яке аз самтҳои калидӣ ва босуръат рушдбанда ба ҳисоб меравад.

Воридшавии васеи МБЭ ба СЭ на танҳо ба коҳиши партовҳои CO₂ мусоидат мекунад, балки хусусиятҳои кори низоми энергетикӣ низ тағйир медиҳад. Дар натиҷа баъзе хусусиятҳои ба вуҷуд меоянд, ки барои равандҳои анъанавии энергетикӣ камтар хос мебошанд, аз ҷумла тағйирёбанда ва давраи будани истеҳсоли ЭЭ хангоми истифодаи энергия офтобӣ. Тағйирёбии истеҳсоли ЭЭ, пеш аз ҳама, ба тағйироти кӯтоҳмуддати абрнокӣ вобаста буда, хусусияти даврии он ба дастрасии радиатсияи офтоб дар соатҳои равшании рӯз алоқаманд мебошад. Ин омилҳо метавонанд ба нобаробарии сарбории барқӣ, тағйирёбии ҳаҷм ва самти ҷараёни нерӯи барқ, инчунин ба коҳиши муҳлати хизмати таҷҳизоти СЭ оварда расонанд. Аз ин рӯ, зарурати такмил додани технологияҳои истифодаи МБЭ ва ҳамгиро намудани онҳо ба СЭ, инчунин бознигарии равишҳои мавҷуда дар таҳияи алгоритмҳои муҳофизати релеию автоматика ва идоракунии ҳолатҳои фавқулодаи СЭ ба миён меояд.

Дар мақолаи мазкур истифодаи энергияи офтоб барои бартараф намудани норасоии ЭЭ дар минтақаҳои дурдаст, коҳиш додани партовҳои CO₂ ба муҳити зист, баланд бардоштани эътимоднокии таъминоти барқ ва кам намудани талафоти он хангоми интиқол таҳлил карда мешавад. Усулҳои интиҳоби иқтидори оптималии панелҳои офтобӣ ва батареяҳои захиравии энергия, ки дар таркиби системаҳои гибридӣ истифода мешаванд, баррасӣ гардидаанд. Ҳамаҷунин бартарӣ ва маҳдудиятҳои

усулҳои таҳлилшуда муайян ва муқоиса карда шуда, ҳолати кунунии мавзӯ дар самти истифодаи энергияи офтобӣ барои баланд бардоштани самаранокии таъминоти барқ арзёбӣ гардидааст.

2. Мавод ва усулҳо (Materials and methods)

2.1. Таҳлили манобеъ

Барои беҳтар кардани самаранокии таъминот бо ЭЭ дар яке аз минтақаҳои дурдасти Русия мақолаи [9] истифодаи радиатсияи офтобро пешниҳод мекунад. Мақола арзёбии радиатсияи офтобро дар маҳали дарёфт бо дарназардошти тартибдиҳандаҳои он пеш аз ворид шудан ба атмосфера ва пас аз он — радиатсияи мустақим ва паҳншуда — пешниҳод мекунад. Барои ҳисоб кардани радиатсияи умумии офтоб формулаи зерин пешниҳод шудааст:

$$C_{\Sigma} = (C + C_D)[1 - (0.38 + 0.38 \cdot \eta \cdot 0.1) \cdot 0.1 \cdot \eta], \quad (1)$$

ки дар он η – коэффитсиенти пӯшиши абрҳост; C_D ва C – мутаносибан компонентҳои пароканда ва мустақими радиатсияи офтоб мебошанд; C_{Σ} – ҷузъи умумии радиатсияи офтоб бо дар назар гирифтани абрнокӣ.

Қобили зикр аст, ки дар ин мақола арзёбии ададии кунҷи оптималии маҳали дарёфти радиатсияи офтоб бо дар назар гирифтани тағйирёбии паҳноии ҷуғрофӣ ва фаслҳо пешниҳод шудааст. Ба ҳисоби миёна дар тӯли як сол самаранокии кунҷи маҳали дарёфт, ки барои ҳар фасл оптимизатсия шудааст, 1,09 маротиба аз самаранокии кунҷе, ки ба паҳноии ҷуғрофии маҳаллӣ баробар аст, зиёдтар мебошад.

Дар мақолаи [10] ҳалли мушкилоти болоравии нархи энергияи электрикӣ (ЭЭ) ва талафоти он дар ҳатти интиқоли барқ ба миён гузошта шудааст. Барои ҳалли ин масъала муаллифи мақола истифодаи энергияи офтобиро пешниҳод намудааст. Афзун бар ин, дар мақола истифодаи энергияи офтоб барои таъмини гармӣ низ кайд шудааст. Дар мақола зикр гардидааст, ки боло бурдани ҳаҷми ғунҷоии батареяҳои аккумуляторӣ ва концентратсияи нурфи офтоб дар сатҳи панелҳои офтобӣ барои истифодаи васеи энергияи офтобӣ мусоидат менамояд.

Мақсади асосии мақолаҳои [11 – 12] аз таҳияи барномаи идоракунии муҳаррикҳои системаи пайгирии панелҳои офтобӣ тавассути назоратчи барномавии Arduino иборат аст. Мақсади асосии ин таҳқиқот омӯзиш ва таҳлили алгоритмҳои пайгирии нуқтаи тавоноии максималӣ (НТМ) дар дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ, муайян намудани роҳҳои баланд бардоштани самаранокии нерӯгоҳҳои офтобӣ ва инчунин коэффитсиенти кори фойданоки (ККФ) онҳо дар шароити гуногуни муҳити зист мебошад. Фарқияти кори [11] аз [12] дар он аст, ки дар кори [11] кунҷи панели офтобӣ нисбати ҳатти уфуқӣ (элеватсия) дар давоми рӯз муайян буда бетағйир менамояд. Алгоритм кунҷи байни панели офтобӣ нурҳои офтобро нисбати ҳатти амудӣ танзим менамояд. Дар кори [12] бошад алгоритми идоравӣ қодир ба танзими панелҳои офтобӣ нисбати ҳам ҳатти уфуқӣ ҳам ҳатти амудӣ аст. Ба ин тартиб, алгоритм дар давоми рӯз худ НТМ панелҳои фотоэлектрикиро нисбати нурҳои офтоб муайян месозад. Бартари роҳи пешниҳодшуда нисбат ба алгоритмҳои мавҷуда боло бурдани ККФ панелҳои офтобӣ мебошад. Асоси ин алгоритмҳо иборат аз системаи зер аст:

$$\begin{cases} E = \frac{dP}{dU}, \\ C_E = dE \end{cases} \quad (2)$$

дар системаи (2) dP ва dU – суръати тағйирёбии иқтидор ва шиддат дар панели офтобӣ мебошанд; E – суръати тағйирёбии P нисбати суръати тағйирёбии U ; C_E – суръати тағйирёбии E .

Муаллифони мақолаи [13] дар бораи аҳамияти манбаҳои барқароршавандаи энергия (МБЭ) дар вилояти Амур сухан мегӯянд. Дар мақолаи мазкур барои ҳалли мушкилоти норасоии ЭЭ, барои боло бурдани эътимоднокии таъмини истеъмолкунандагон бо ЭЭ ва барои поён бурдани сатҳи CO_2 аз ҷумла истифодаи энергияи офтобӣ пешниҳод шудааст. Дар мақолаи мазкур зикр шудааст, ки вилояти Амур барои рушди энергетикаи барқароршаванда дорои шароити хуб аст. Сохтмони иншооти калон, аз ҷумла космодроми «Восточный», кубури гази «Сила Сибири», заводҳои коркарди газ ва нафту химия талаботро ба энергияро зиёд мекунад. Барои ҳамин истифодаи МБЭ, махсусан энергияи офтобӣ, метавонад роҳи хуби ҳали ҷуброни норасии энергия бошад.

Дар мақолаи [14] барои баланд бардоштани эътимоднокии таъминоти барқ, кам кардани истифодаи сӯзишвории карбогидридӣ ва рушди энергетикаи хурд истифодаи МБЭ пешниҳод

шудааст. Аз ҷумла, истеҳсоли ЭЭ тавассути дастгоҳҳои офтобӣ қайд гардидааст. Бо мақсади муайян намудани таркиби аз ҷиҳати техникӣ ва иқтисодӣ самараноки МБЭ, методикаи нави баҳодихӣ ва интиҳоб пешниҳод шудааст, ки имкон медиҳад вариантҳои гуногуни системаҳои энергетикӣ аз рӯи нишондиҳандаҳои техникӣ, иқтисодӣ ва самаранокии истифода муқоиса ва беҳтарин таркиб интиҳоб карда шавад. Ҳангоми анҷом додани таҳқиқот муаллиф аз усулҳои гуногуни таҳлил, моделсозӣ ва арзёбии нишондиҳандаҳои энергетикӣ истифода бурдааст. Асоси ин кор иборат аз тақсимои муқаррари тағйирёбандаи тасодуфӣ дар шакли содакардашуда аст:

$$y = \frac{P_{\text{треб}} - \mu(P_{\Sigma})}{\sigma(P_{\Sigma})} \quad (3)$$

дар ифодаи (3) $P_{\text{треб}}$ – иқтидори зурури; P_{Σ} – иқтидори пурраи системаи МБЭ; μ ва σ – умеди риёзии (математическое ожидание) ва дисперсияи иқтидори МБЭ.

Тарафҳои мусбии кори дар боло зикршуда аз нуқтаҳои зер иборат аст. Ҳангоми интиҳоби МБЭ тағйирёбии обу ҳаво ба назар гирифта мешавад. Эҳтимолияти қатъ ё камшавии таъмини ЭЭ барои истеъмолкунандагон арзёбӣ карда мешавад. Афзун бар ин, ҳангоми интиҳоби нави МБЭ иқтидор ва арзиши онҳо ба ҳисоб гирифта мешавад.

Дар мақолаи [15] масъалаҳои кам кардани вобастагӣ аз газу ангишт ва норасоии барқ дар шароити афзоиши талабот бар он дар кишвари Ёзбекистон матраҳ шудаанд. Барои ҳалли ин масъалаҳо дар мақолаи мазкур истифодаи энергияи офтобӣ пешниҳод шудааст. Инчунин дар ин мақола зикр гардидааст, ки дар кишвари зикршуда нерӯгоҳҳои офтобӣ нисбат ба дигар намуди нерӯгоҳҳо дар ҳоли рушд аст.

Роҳҳои ҳалли пешниҳодшуда дар мақолаи [15] ду бартариҳои муҳим дорад. Аввал ин ки истифодаи дарозмуддати энергияи офтобӣ ба кам карди хароҷоти сӯзишворӣ барои тавилиди ЭЭ дар нерӯгоҳҳои ҳароратӣ ва коҳиши талофоти энергияи электрикӣ ҳангоми интиқоли он мусоидат менамояд. Дуюм истеҳсоли барқ тавассути энергияи фотобӣ ба кам кардани вобастагӣ аз сӯзишвории табиӣ (ангишт, газ, дигар намуд сӯзишворӣ) оварда мерасонад.

Мақолаи [16] ба истифодаи энергияи офтобӣ тавассути панелҳои офтобӣ бахшида шудааст. Муҳтавои асосии мақола омӯзиши табдили энергияи нури офтоб ба энергияи электрикӣ ва имкониятҳои истифодаи он ҳамчун МБЭ мебошад. Истифодаи энергияи офтобӣ тавассути панелҳои офтобӣ барои ҳалли якҷанд масъалаҳои муҳим мусоидат менамояд. Пеш аз ҳама, он вобастагии истеъмолкунандагонро аз манбаъҳои анъанавии энергия, аз қабилӣ нафт, газ ва ангишт кам мекунад. Илова бар ин, истифодаи энергияи офтобӣ ба коҳиш додани ифлосшавии муҳити зист ва партоби CO_2 мусоидат менамояд. Ҳамчунин, истифодаи ин нави МБЭ имконият медиҳад, ки аҳоли ва корхонаҳо нерӯи барқи худро мустақилона истеҳсол кунанд ва хароҷоти истифодаи нерӯи барқро коҳиш диҳанд.

Дар маҷмӯъ, мақолаи [16] нишон медиҳад, ки истифодаи энергияи офтобӣ роҳи самараноки таъмини ЭЭ буда, ҳамзамон ба коҳиши вобастагӣ аз манбаъҳои анъанавии энергия, паст намудани таъсири экологӣ ва баланд бардоштани мустақилияти энергетикӣ истеъмолкунандагон мусоидат мекунад.

Мақолаи [17] ба таҳлили истифодаи энергияи офтобӣ ҳамчун МБЭ бахшида шудааст. Дар он принсипи табдили энергияи офтобӣ ба нерӯи барқ тавассути фотоэффект шарҳ дода шуда, имкониятҳои истифодаи системаҳои фотоэлектрикӣ арзёбӣ гардидаанд. Ҳамчунин бартарӣ ва маҳдудиятҳои технологияи панелҳои офтобӣ мавриди таҳлил қарор гирифтаанд. Муаллиф истифодаи энергияи офтобро ҳамчун роҳи ҳалли се масъалаи асосӣ пешниҳод менамояд. Аввал, истифодаи энергияи офтобӣ вобастагиро аз сӯзишвории маъданӣ коҳиш медиҳад. Нафт, газ ва ангишт захираҳои маҳдуд мебошанд, дар ҳоле ки энергияи офтобӣ манбаи барқароршаванда ва дарозмуддати энергия мебошад. Дуюм, технологияҳои фотоэлектрикӣ ба ҳифзи муҳити зист мусоидат мекунад. Ҳангоми истеҳсоли ЭЭ CO_2 ва дигар моддаҳои ифлоскунанда хориҷ намешаванд. Аз ин рӯ, истифодаи онҳо таъсири манфии энергетикаро ба муҳити зист коҳиш медиҳад. Сеюм, панелҳои офтобӣ имконияти таъмини ЭЭ дар минтақаҳои дурдаст фароҳам меоранд. Ин системаҳо мустақилона фаъолият намуда, эҳтиёро ба шабакаҳои марказии интиқоли ЭЭ кам мекунад.

Технологияи пешниҳодшуда дорои як қатор бартариҳои муҳимми техникӣ ва экологӣ мебошад. Пеш аз ҳама, энергияи офтобӣ манбаи барқароршаванда буда, барои истифода маҳдудияти захиравӣ надорад. Илова бар ин, панелҳои офтобӣ муҳлати хизмати дароз дошта, хароҷоти нигоҳдории онҳо нисбатан паст мебошад. Ин хусусиятҳо истифодаи онҳоро аз ҷиҳати иқтисодӣ ва техникӣ асоснок мегардонанд. Самаранокии системаҳои фотоэлектрикӣ тавассути истифодаи технологияҳои нав метавонад баланд бардошта шавад. Ба ин технологияҳо системаҳои пайгирии офтоб, концентраторҳои офтобӣ, фотоэлементҳои бисёрқабата ва маводди муосири нимноқилӣ дохил мешаванд. Татбиқи онҳо истеҳсоли нерӯи барқро зиёд намуда, талафоти энергияро коҳиш медиҳад.

Бо вуҷуди ин, технологияи энергияи офтоб як қатор маҳдудиятҳо низ дорад, аз ҷумла самаранокии аксари панелҳои мавҷуда аз 15–25 % зиёд нест. Истеҳсоли ЭЭ аз шароити обу ҳаво ва давомнокии рӯшноии офтоб вобаста мебошад. Ҳангоми ҳарорати баланд самаранокии фотоэлементҳо коҳиш меёбад. Ғайр аз ин, арзиши баланди таҷҳизот, зарурати тозакунии мунтазами панелҳо ва пастшавии тадриҷии хусусиятҳои техникӣ онҳо аз омилҳои маҳдудкунандаи истифодаи васеи технология ба ҳисоб мераванд.

Моҳияти мақолаи [18] ба истифодаи энергияи офтобии фотоэлектрикӣ ҳамчун самти афзалиятноки рушди МБЭ бахшида шудааст. Муаллифон нерӯгоҳҳои офтобиро яке аз технологияҳои босуръат рушдбанди энергетикаи муосир арзёбӣ намуда, нақши онҳоро дар рушди низомии устувори энергетикӣ таҳлил кардаанд. Дар мақола қайд шудааст, ки нерӯгоҳҳои офтобии фотоэлектрикӣ аз рӯи суръати афзоиши иқтидори насбшуда дар ҷаҳон мавқеи пешсаф доранд. Принципи кори онҳо ба табилии мустақими радиатсияи офтобӣ ба ЭЭ тавассути фотоэлементҳо асос ёфтааст.

Муаллифон истифодаи энергияи офтобиро барои ҳалли се масъалаи асосии энергетикӣ пешниҳод менамоянд. Аввал, энергияи офтоб вобастагиро аз захираҳои маҳдуди нафту газ ва ангишт коҳиш медиҳад. Иваз намудани сӯзишвории маъданӣ бо манбаъҳои барқароршаванда ба баланд бардоштани амнияти энергетикӣ мусоидат мекунад.

Дуюм, системаҳои фотоэлектрикӣ ҳангоми истеҳсоли ЭЭ CO₂ хориҷ намекунанд. Сеюм, нерӯгоҳҳои офтобӣ барои минтақаҳои аз шабакаи марказии СЭ дурбуда ҳалли самаранок пешниҳод менамоянд. Истифодаи системаҳои мустақили фотоэлектрикӣ эҳтиёҷро ба сохтмони хатҳои гаронаризиши интиқоли барқ коҳиш медиҳад.

Барои рушди минбаъдаи МБЭ муаллифон якчанд самти афзалиятнокро пешниҳод менамоянд. Афзоиши сармоягузорӣ ба нерӯгоҳҳои офтобӣ метавонад вобастагии иқтисодро аз сӯзишвории истихроҷшаванда коҳиш диҳад. Ҳамзамон, истифодаи ҳамгирои манбаъҳои гуногуни барқароршавандаи энергия, аз ҷумла офтоб, шамол ва об эътимоднокии низомии энергетикиро баланд мебардорад. Муаллифон инчунин таъкид менамоянд, ки густариши истифодаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия рушди технологияҳои муосири энергетикиро суръат мебахшад. Ин раванд тақмили системаҳои интеллектуалии идоракунӣ ва технологияҳои захиракунии энергияро талаб намуда, ба баланд бардоштани самаранокӣ, устуворӣ ва эътимоднокии низомии энергетикӣ мусоидат мекунад.

Дар маҷмӯъ, мақола нишон медиҳад, ки истифодаи энергияи офтобии фотоэлектрикӣ яке аз самтҳои калидии гузариш ба низомии устувори энергетикӣ буда, метавонад ҳамзамон масъалаҳои энергетикӣ, экологӣ ва иқтисодиро ҳал намояд.

Мақолаи [19] ба истифодаи энергияи офтобӣ дар корхонаҳои нафту газ воқеъ дар минтақаҳои дурдаст бахшида шудааст. Ҳадафи асосии муаллифон арзёбии самаранокии иқтисодӣ ва экологии истифодаи МБЭ мебошад. Дар мақола системаи гибридӣ иборат аз панелҳои офтобӣ, батареяҳои захиравӣ, генератори дизелӣ ва контроллерҳои идоракунӣ баррасӣ шудааст. Дар минтақаҳои дурдаст интиқоли сӯзишворӣ ва истифодаи доимии генераторҳои дизелӣ хароҷоти зиёд талаб мекунад. Истифодаи системаи гибридӣ масрафи сӯзишворӣ, хароҷоти истифодабарӣ ва таъсири манфӣ ба муҳити зистро коҳиш дода, ҳамзамон, эътимоднокии таъминоти нерӯи барқро баланд мебардорад. Аккумуляторҳо энергияро дар вақти набудани радиатсияи офтоб ба система медиҳанд, дар ҳоле ки генератори дизелӣ танҳо ҳангоми зарурат ба кор медарояд. Дар натиҷа самаранокии истифодаи энергия баланд шуда, партовҳои моддаҳои зараровар кам мегарданд. Аз ин рӯ, системаи

пешниҳодшуда барои объектҳои дурдасти саноати нафту газ аз ҷиҳати техникӣ, иқтисодӣ ва экологӣ роҳи ҳалли самаранок ба ҳисоб меравад.

Мақолаи [20] ба истифодаи энергияи офтоб дар низомҳои гибридии таъминоти энергия бахшида шудааст. Муаллифон масъалаи муайян намудани иқтидори оптималии батареяҳои офтобиро барои баланд бардоштани самаранокии системаи гибридии энергетикӣ таҳлил намудаанд. Барои ҳалли ин масъала ифодаи зер пешниҳод шудааст:

$$N = \frac{P_{\text{ПИК Р СБ}} \cdot K_{\text{ЗАП}}}{P_{\text{ПИК СМ}}} \quad (4)$$

дар ифодаи (4), N – миқдори панелҳои офтоби дар батареяи офтоби; $K_{\text{ЗАП}}$ – зариби амни (коэффициент запаса); $P_{\text{ПИК Р СБ}}$ – тавоноии максималии куллии ҳисобии мавриди ниёзи батареяи офтобӣ; $P_{\text{ПИК СМ}}$ – тавоноии максималии панелҳои офтобии воҳид.

Ин равиш имкон медиҳад, ки қисми асосии талаботи истеъмолкунанда аз ҳисоби энергияи офтобӣ қонеъ карда шавад. Ҳамзамон, истифодаи батареяҳои офтобӣ вақти кори генераторҳои дизелиро кам намуда, истеъмоли сӯзишворӣ ва хароҷоти истифодабариро коҳиш медиҳад. Муаллифон интиҳоби иқтидори оптималии батареяҳои офтобиро ҳамчун роҳи асосии баланд бардоштани самаранокии системаи гибридии пешниҳод менамоянд. Ин усул истеҳсоли неруи барқро ба талаботи воқеии истеъмолкунанда мутобиқ намуда, истифодаи МБЭ-ро зиёд мекунад. Дар натиҷа, масрафи сӯзишвории дизелӣ, хароҷоти истифода ва партовҳои моддаҳои ифлоскунанда коҳиш ёфта, эътимодноӣ ва самаранокии иқтисодии низомии энергетикӣ баланд мегардад.

Аз муҳтавои мақолаи [21] маълум мешавад, ки он ба методикаи ҳисоб кардани иқтидори нерӯгоҳҳои мустақили офтобӣ (Автономная солнечная электростанция – АСЭ) бахшида шудааст. Энергияи офтоб дар мақолаи мазкур барои ҳалли масъалаҳои муҳимми энергетикӣ истифода мешавад. Ба онҳо таъмини хонаҳои деҳоти дурдаст, майдончаҳои варзишӣ ва нуқтаҳои мобилӣ дохил мешаванд. Дар рӯз панелҳои офтобӣ истеъмолкунандагонро бо барқ таъмин намуда, ҳамзамон аккумуляторҳоро пур мекунад. Шабона бошад, аккумуляторҳо энергияи захирашударо ба борҳо медиҳанд. Мақсад аз методикаи пешниҳодшуда ҳисоб кардани дурусти иқтидори панелҳои офтобӣ, муайян кардани ҳаҷми зарурии аккумуляторҳо ва интиҳоби дурусти инвертор ва контроллер мебошад. Ин имкон медиҳад, ки таҷҳизоти зиёдатӣ харидорӣ нашавад ва таркиби система мутобиқи талаботи воқеии истеъмолкунанда интиҳоб гардад. Муаллифон методикаи нави ҳисобкуниро пешниҳод намудаанд, ки нисбат ба усулҳои одӣ якҷанд бартариҳои муҳим дорад. Бартариҳои аввал муайян намудани ҳаҷми дақиқи аккумулятор мебошад. Дар усулҳои содакардашуда одатан аккумуляторҳо аз ҳад зиёд интиҳоб мешаванд. Методикаи мазкур вақти кори шабонарӯзиро ҳисоб мекунад, тағйирёбии сарбории шабонаро ба назар мегирад ва иқтидори воқеан зарурии аккумуляторро муайян мекунад. Бартариҳои дуюм кам кардани арзиши нерӯгоҳ мебошад. Азбаски иқтидори панелҳои офтобӣ, аккумуляторҳо ва инверторҳо ба тарзи оптималии интиҳоб намешаванд, арзиши умумии система паст мешавад. Бартариҳои дигар баланд шудани самаранокии система мебошад. Методика имкон медиҳад, ки ККФ-и система ҳисоб карда шуда, талафоти энергия дар инверторҳо ва табдилдиҳандаҳо ба назар гирифта шавад. Дар натиҷа, интиҳоби таҷҳизот дақиқтар гардида, самаранокӣ ва эътимоднокии нерӯгоҳи мустақили офтобӣ баланд мешавад.

Дар мақолаи [22] масъалаи истифодаи МБЭ ҳамчун ҷузъи системаи гибридии дар корхонаҳои нафту газ баррасӣ шудааст. Муаллифон нишон медиҳанд, ки бо афзоиши талабот ба энергия, баланд шудани нархи сӯзишвории анъанавӣ ва пурзӯр гардидани талаботи экологӣ истифодаи МБЭ дар соҳаи нафту газ аҳамияти бештар пайдо мекунад. Ҳадафи асосии тадқиқот муайян кардани самаранокии иқтисодӣ ва экологӣ истифодаи МБЭ барои таъмини нерӯи барқ дар объектҳои нафту газ мебошад. Дар мақола қайд шудааст, истифодаи нерӯгоҳи офтобӣ дар таркиби нерӯгоҳи барқии гибридии метавонад то 25 ҳазор литр дизелро дар як сол сарфа намояд. Ин ба коҳиши хароҷоти истеҳсоли мусоидат мекунад. Дар натиҷаи кам шудани истифодаи дизел, партовҳои CO_2 то 63,5 тонна дар як сол аз як дастгоҳ кам мешавад, ки ба ҳифзи муҳити зист мусоидат мекунад. Истифодаи ин система арзиши нерӯи истеҳсолшударо паст намуда, хароҷоти интиқоли сӯзишвориро коҳиш медиҳад ва фоидаи иқтисодиро зиёд мекунад.

Дар мақолаи [23] ба омӯзиши самаранокии иқтисодии истифодаи МБЭ, махсусан энергияи офтоб, дар таъмини барқи марказҳои коркарди маълумот, системаҳои иттилоотӣ ҳисоббарорӣ ва

дигар объектҳои энергетикӣ хурд бахшида шудааст. Муаллифон масъалаи муҳимро матраҳ кардаанд: дар шароити афзоиши пайвастаи нархи нерӯи барқ ва сӯзишвории анъанавӣ истифодаи энергияи офтоб барои таъмини нерӯи барқ то кадом андоза аз ҷиҳати иқтисодӣ ғоидаовар аст. Таҳлил нишон медиҳад, ки дар даҳсолаи охир нархи нерӯи барқ солоне аз 12 то 27 ғоиз афзоиш ёфта, арзиши газ барои нерӯгоҳҳо қариб 4,5 маротиба баланд шудааст. Дар ҳамин ҳол, арзиши технологияҳои офтобӣ ба таври назаррас паст гардидааст. Ин вазъият имконияти васеи истифодаи нерӯи офтобро фароҳам меорад. Тамоми тадқиқот ба арзёбии самаранокии иқтисодии истифодаи нерӯгоҳҳои офтобӣ ва панелҳои фотоэлектрикӣ бахшида шудааст. Аз ин рӯ, метавон гуфт, ки энергияи офтоб на танҳо истифода мешавад, балки объекти асосии таҳқиқоти илмӣ мебошад.

Дар таҳқиқот маҷмуи чорабиниҳои баланд бардоштани самаранокии энергетикӣ, аз ҷумла истифодаи энергияи офтоб, пешниҳод гардидааст, ки татбиқи онҳо метавонад хароҷоти умумии энергетикиро то 43% коҳиш диҳад. Муаллифон нишон медиҳанд, ки барои объекти бо сарбории 1 МВт то масофаи 25 км, барои объекти бо сарбории 2 МВт то 50 км ва барои объекти бо сарбории 3 МВт то 70 км истифодаи энергияи офтобӣ дар муқоиса бо сохтмон ва васеъкунии хатҳои нави интиқоли барқ аз ҷиҳати иқтисодӣ самараноктар арзёбӣ мегардад, зеро он нисбат ба сармоягузориҳои бузург дар инфрасохтори шабакавиро коҳиш медиҳад. Таҳқиқот нишон медиҳад, ки муҳлати бозгашти сармоя аз 4,1 то 6,1 солро ташкил медиҳад ва қисми муайяни истеҳсоли энергия (тақрибан 3%) аз ҷиҳати иқтисодӣ ғоидаовар аст.

Илова бар ин, энергияи офтобӣ ба коҳиши партовҳои CO₂ мусоидат намуда, таъсири манфии соҳаи энергетикаро ба иқлим кам мекунад. Дар маҷмуъ, густариши энергияи офтобӣ ба татбиқи принципҳои рушди устувор ва ташаккули низоми энергетикӣ аз ҷиҳати экологӣ тоза мусоидат менамояд.

3. Натиҷаҳо (Results)

3.1. Мушаххасоти манобеи баррасишуда

Барои равшанӣ, дар ҷадвали 1 таҳлили муқоисавии корҳои дар боло зикршуда оварда шудааст. Барои ифода намудани ҳадаф дар ин ҷадвал маҷмуи зерини аломатҳои ҳарфӣ истифода мешавад. v1 – боло бурдани самаранокии таъмини барқ; v2 – паст кардани гароншавии энергияи электрикӣ ва талафоти он дар хатҳои интиқоли барқ; v3 – таҳияи барномаи идоракунии системаи пайгирии панелҳои офтобӣ; v4 – аҳамияти МБЭ дар вилояти Амур; v5 – баланд бардоштани эътмоднокии таъминоти барқ, кам кардани истифодаи сӯзишвории карбогидридӣ; v6 – кам кардани вобастагӣ аз газу ангишт ва норасоии барқ; v7 – омӯзиши табдили энергияи нури офтоб ба энергияи электрикӣ; v8 – таҳлили истифодаи энергияи офтоб ҳамчун МБЭ; v9 – истифодаи энергияи офтоб дар низомҳои гибридӣ.

Ҷадвали 1 – Таҳлили татбиқи корҳои баррасишуда

Table 1 – Analysis of the implementation of the reviewed activities

Муаллиф	Сол / Кишвар	Мақсад	Роҳи ҳалли мушкилот
Воеводин, И. Г.	2015/Россия	v1	Насби панелҳои офтобӣ дар минтақаҳои дурдаст
Бубенчиков А.А.	2016/Россия	v2	Насби панелҳои офтобӣ барои гарм кардани хонаҳо.
Шарифов Б.Н.	2024/Тоҷикистон	v3	Истифодаи алгоритми идоракунии пайгирии НТМ тавассути назоратчии барномавии Arduino
Гаврилов В.Г.	2017/Россия	v4	Истифодаи алгоритми идоракунии пайгирии НТМ тавассути назоратчии барномавии Arduino
Соснина Е.Н.	2012/Россия	v5	Методикаи баҳодиҳии истеҳсоли нерӯи барқ тавассути дастгоҳҳои офтобӣ
Коновалов Ю.В.	2024/Ўзбекистон	v6	Методикаи баҳодиҳии истеҳсоли нерӯи барқ тавассути дастгоҳҳои офтобӣ
Степанов М.В.	2024/Россия	v7	Насби панелҳои офтобӣ дар минтақаҳои дурдаст
Бабаев Ф.Б.	2023/Россия	v8	Насби панелҳои офтобӣ барои кам кардани партовҳои CO ₂
Баринава В.А.	2016/Россия	v1	Насби энергияи офтобии фотоэлектрикӣ
Ковальчук Ю.Л.	2006/Россия	v6	Насби панелҳои офтобӣ дар минтақаҳои дурдаст
Яков М. К.	2024/Россия	v9	Насби панелҳои офтобӣ дар нерӯгоҳи барқии гибридӣ
Яков М. К.	2013/Россия	v1	Насби панелҳои офтобӣ дар минтақаҳои дурдаст
Губайдуллин К.	2024/ИМА*	v9	Насби панелҳои офтобӣ дар нерӯгоҳи барқии гибридӣ
Аббасова Т.С.	2015/Россия	v8	Насби панелҳои офтобӣ барои кам кардани хароҷот

*Иёлоти Муттаҳидаи Амрико

Аз таҳлили сутуни сеюми Ҷадвали 1 бармеояд, ки дар корҳои таҳқиқотии [9, 18, 21], ки аз ҷониби муаллифони Федератсияи Россия анҷом дода шудаанд, ҳадафи асосии таҳқиқот яксон мебошад. Дар дигар корҳои баррасишуда низ, сарфи назар аз баъзе фарқиятҳо дар ифодаи мақсадҳо, самти умумии таҳқиқот қариб якхела буда, ба омӯзиш ва татбиқи усулҳо ва методҳои гуногун ҷиҳати насби панелҳои офтобӣ дар минтақаҳои дурдаст, инчунин коҳиш додани талафоти нерӯи барқ дар хатҳои интиқоли барқ равона гардидааст.

Ҷамзамон, аз таҳлили сутуни охири Ҷадвали 1 маълум мегардад, ки новобаста аз фарқиятҳои мавҷуда дар ҳадафҳои таҳқиқот, роҳҳои пешниҳодшудаи ҳалли масъалаҳо дар аксари мавридҳо ба ҳам наздик ва ё яксон мебошанд. Ин ҳолат аз мавҷудияти равишҳои умумии илмӣ ва техникаи ҳалли масъалаҳои таъмини самараноки энергияи офтобӣ ва баланд бардоштани самаранокии фаъолияти шабакаҳои интиқоли нерӯи барқ шаҳодат медиҳад.

4. Муҳокима (Discussions)

Бо вучуди афзалиятҳои зиёди истифодаи энергияи офтоб, ин технология дорои як қатор маҳдудиятҳо мебошад. Пеш аз ҳама, самаранокии панелҳои офтобӣ нисбатан паст буда, танҳо қисми муайяни энергияи офтобро ба нерӯи барқ табдил медиҳанд. Илова бар ин, истеҳсоли нерӯи барқ аз шароити обу ҳаво ва давомнокии равшании рӯз вобастагӣ дошта, дар рӯзҳои абрнок ё шабона ба таври назаррас коҳиш меёбад. Ҷамчунин, ҳарорати баланд метавонад ба самаранокии фотоэлементҳо таъсири манфӣ расонида, иқтидори истеҳсоли онҳоро кам намояд.

Аз ҷиҳати иқтисодӣ низ истифодаи нерӯгоҳҳои офтобӣ сармоягузори аввалияи зиёдро талаб мекунад, зеро харид ва насби панелҳо, инверторҳо ва аккумуляторҳо хароҷоти назаррас доранд. Илова бар ин, барои нигоҳ доштани самаранокии система тозакунии мунтазами панелҳо зарур буда, бо гузашти вақт хусусиятҳои техникаи онҳо тадриҷан коҳиш меёбанд. Аз ин рӯ, ҳангоми татбиқи технологияҳои офтобӣ ба назар гирифтани ин маҳдудиятҳо барои баланд бардоштани самаранокӣ ва эътимоднокии онҳо аҳаммияти муҳим доранд.

5. Хулоса (Conclusions)

Дар мақолаи мазкур истифодаи энергияи офтоб таҳлил шудааст. Дар натиҷаи таҳлил бартарихову камбудии роҳҳои истифодаи энергияи офтоб мушаххас гардидаанд. Қисми зиёди аз ин роҳҳо иборат аз насби панелҳо дар минтақаҳои дурдаст мебошад. Қисми дигар ба истифодаи алгоритми идоракунии пайгирии ҳолати офтоб ва истифодаи панелҳои офтобӣ дар таркиби системаҳои гибридӣ равона шудааст. Инчунин аз таҳлили мазкур бар меояд, ки мақсади корҳои таҳлилшуда ғолибан иборат аз боло бурдани самаранокии таъмини ЭЭ истифодаи энергияи офтоб дар низомҳои гибридӣ, кам кардани вобастагӣ аз газу ангишт ва норасоии ЭЭ аст.

Дар аксари корҳои илмӣ истифодаи панелҳои фотоэлектрикӣ, системаҳои пайгирии офтоб, нерӯгоҳҳои гибридӣ, усулҳои оптимизатсияи иқтидор ва методҳои моделсозӣ ҳамчун роҳҳои асосии коҳиш додани талафоти ЭЭ, кам намудани истеъмоли сӯзишвории маъданӣ, паст кардани партовҳои CO₂ ва баланд бардоштани самаранокии иқтисодиву техникаи системаҳои энергетикӣ пешниҳод гардидаанд. Ҷамзамон, натиҷаҳои таҳқиқот собит менамоянд, ки татбиқи технологияҳои офтобӣ, махсусан дар минтақаҳои дурдаст ва аз шабакаҳои марказии барқ дур ҷойгиршуда, метавонад алтернативаи аз ҷиҳати иқтисодӣ асоснок ва аз ҷиҳати экологӣ устувор ба шабакаҳои аънъавии таъминоти нерӯи барқ бошад. Бо вучуди фарқият дар объекти таҳқиқот ва усулҳои татбиқ, ҳамаи мақолаҳо аҳаммияти рӯзафзуни энергияи офтобиро ҳамчун яке аз самтҳои калидии рушди устувори низоми энергетикӣ муосир тасдиқ менамоянд.

Дар оянда баррасии корҳои зерин ба нақша гирифта шудааст: таҳлили системаҳои пайгирии офтобӣ як ва думехвара; омӯзиши методҳои пешбини математикӣ; таҷрибаи ба кор бурдани алгоритмҳои ҳуши маснӯӣ барои пешгӯии радиатсияи офтоб дар муддатҳои кӯтоҳ ва дароз; арзёбии адабии омилҳое, ки ба радиатсияи офтоб ва воситаҳои истифодаи он таъсири манфӣ мерасонад.

Муқарриз: Қирғизов А.Қ. — к.т.н., дотсент, дотсенти кафедраи нерӯгоҳҳои электрикӣ ДҶТЭП ба номи академик М.С. Осимӣ

Адабиёт

1. Clark, M.A. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5 and 2°C climate change targets / M.A. Clark, N.G.G. Domingo, K. Colgan et al. // Science. – 2020. – Vol. 370, No. 6517. – P. 705–708. – DOI: 10.1126/science.aba7357.

2. Rogelj, J. Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development / J. Rogelj, D. Shindell, K. Jiang, S. Ffifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, M.V. Vilariño // *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report* / ed. by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner et al. – Cambridge: Cambridge University Press, 2018. – P. 93–174. – DOI: 10.1017/9781009157940.004.
3. Wang, X. Toward Low-Carbon Power Systems: Reviewing Life Cycle Carbon Footprints of Diverse Generation Pathways / X. Wang, L. Guo, G. Xue, J. Tan, W. Niu, Y. Wu // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, No. 24. – Art. 6413. – DOI: 10.3390/en18246413.
4. Yousuf, M.U. Life cycle assessment of lignite-fueled ultra-supercritical coal-fired power plant with evaluation of solar energy integration / M.U. Yousuf, M.A. Siddiqui, M. Kumar, M. Umair // *Fuel*. – 2025. – Vol. 385. – Art. 134079. – DOI: 10.1016/j.fuel.2024.134079.
5. Bamisile, O. The environmental factors affecting solar photovoltaic output / O. Bamisile, C. Acen, D. Cai, Q. Huang, I. Staffell // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2025. – Vol. 208. – Art. 115073. – DOI: 10.1016/j.rser.2024.115073.
6. Smith, M. Life cycle assessment of New Jersey offshore wind / M. Smith, N. Shoaib, P. Lal // *Wind Energy Science*. – 2025. – Vol. 10, No. 7. – P. 1389–1402. – DOI: 10.5194/wes-10-1389-2025.
7. Zhou, Z. Evolution of Grid Services for Deep Decarbonization: The Role of Hydropower / Z. Zhou, T. Levin, A. Botterud // *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*. – 2024. – Vol. 11, No. 4. – P. 145–155. – DOI: 10.1007/s40518-024-00245-6.
8. International Energy Agency. Global Energy Review 2026: Electricity supply [Электронный ресурс]. – Paris: IEA, 2026. – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026/electricity-supply> (дата обращения: 26.07.2026).
9. Воеводин, И.Г. Использование солнечной энергии для повышения эффективности электроснабжения труднодоступных населенных пунктов / И.Г. Воеводин // *Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы III российской молодежной научной школы-конференции, Томск, 21–23 октября 2015 г.* / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: СКАН, 2015. – С. 131–134.
10. Бубенчиков, А.А. Солнечная энергия как источник электрической энергии / А.А. Бубенчиков, Е.Е. Нурахмет, В.О. Молодых, А.И. Руденок // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2016. – № 5 (47). – С. 59–62. – DOI: 10.18454/IRJ.2016.47.288.
11. Шарифов, Б.Н. Разработка программы одноосевой системы слежения за Солнцем / Б.Н. Шарифов, Ш.М. Султонзода, Х.Р. Замонов, Н.Д. Шарипов, Ф.М. Рахимов, Ш.А. Бобозода // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. – 2024. – № 3 (67). – С. 12–16.
12. Шарифов, Б.Н. Построение системы управления фотоэлектрической установки на основе методов нечеткой логики / Б.Н. Шарифов // *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. – 2023. – № 4 (64). – С. 18–23.
13. Гаврилов, В.Г. Потенциал возобновляемых источников энергии в Амурской области / В.Г. Гаврилов, А.Н. Козлов // *Вестник АмГУ*. – 2017. – Вып. 77. – С. 74–78.
14. Соснина, Е.Н. Методика выбора оптимального сочетания возобновляемых источников энергии для локальных энергосистем / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*. – 2012. – № 3 (96). – С. 215–220.
15. Коновалов, Ю.В. Развитие электроэнергетических и возобновляемых источников энергии в Республике Узбекистан / Ю.В. Коновалов, С.А. Тохтасунов // *Вестник Ангарского государственного технического университета*. – 2024. – № 18. – С. 47–51. – DOI: 10.36629/2686-777X-2024-1-18-47-51.
16. Степанов, М.В. Солнечные панели: эффективное решение для экологически чистой энергетики / М.В. Степанов, М.М. Стульгинский // *Вестник науки*. – 2024. – № 7 (76). – Т. 2. – С. 535–541.
17. Бабаев, Ф.Б. Характеристики использования солнечной энергии / Ф.Б. Бабаев // *Вестник науки*. – 2023. – № 2 (59). – Т. 2. – С. 274–283.
18. Баринаова, В.А. Особенности развития возобновляемых источников энергии в России и в мире / В.А. Баринаова, Т.А. Ланьшина // *Российское предпринимательство*. – 2016. – Т. 17, № 2. – С. 259–270. – DOI: 10.18334/rp.17.2.2214.
19. Ковальчук, Ю.Л. Состояние и перспективы использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в топливно-энергетическом комплексе России / Ю.Л. Ковальчук // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2006. – № 3. – С. 237–242.

20. Кашин, Я.М. Методика определения пиковой мощности солнечной батареи для гибридного энергетического комплекса / Я.М. Кашин, И.Б. Самородов, А.А. Белов, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // Научные труды КубГТУ. – 2024. – № 4. – С. 140–148. – DOI: 10.26297/2312-9409.2024.4.14.

21. Охоткин, Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций / Г.П. Охоткин // Вестник Чувашского университета. – 2013. – № 3. – С. 222–230.

22. Губайдуллин, К. Использование возобновляемых источников энергии на нефтегазовых предприятиях / К. Губайдуллин // Universum: технические науки. – 2024. – № 8 (125). – DOI: 10.32743/UniTech.2024.125.8.18109.

23. Аббасова, Т.С. Оценка экономической эффективности возобновляемых источников энергии для информационно-вычислительных комплексов и управляющих систем / Т.С. Аббасова, Н.В. Логачева, Н.П. Сидорова // Вопросы региональной экономики. – 2015. – № 4 (25). – С. 167–177.

Reference

1. Clark, M.A. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5 and 2°C climate change targets / M.A. Clark, N.G.G. Domingo, K. Colgan et al. // Science. – 2020. – Vol. 370, No. 6517. – P. 705–708. – DOI: 10.1126/science.aba7357.

2. Rogelj, J. Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development / J. Rogelj, D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférián, M.V. Vilariño // Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report / ed. by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner et al. – Cambridge: Cambridge University Press, 2018. – P. 93–174. – DOI: 10.1017/9781009157940.004.

3. Wang, X. Toward Low-Carbon Power Systems: Reviewing Life Cycle Carbon Footprints of Diverse Generation Pathways / X. Wang, L. Guo, G. Xue, J. Tan, W. Niu, Y. Wu // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 24. – Art. 6413. – DOI: 10.3390/en18246413.

4. Yousuf, M.U. Life cycle assessment of lignite-fueled ultra-supercritical coal-fired power plant with evaluation of solar energy integration / M.U. Yousuf, M.A. Siddiqui, M. Kumar, M. Umair // Fuel. – 2025. – Vol. 385. – Art. 134079. – DOI: 10.1016/j.fuel.2024.134079.

5. Bamisile, O. The environmental factors affecting solar photovoltaic output / O. Bamisile, C. Acen, D. Cai, Q. Huang, I. Staffell // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. – Vol. 208. – Art. 115073. – DOI: 10.1016/j.rser.2024.115073.

6. Smith, M. Life cycle assessment of New Jersey offshore wind / M. Smith, N. Shoaib, P. Lal // Wind Energy Science. – 2025. – Vol. 10, No. 7. – P. 1389–1402. – DOI: 10.5194/wes-10-1389-2025.

7. Zhou, Z. Evolution of Grid Services for Deep Decarbonization: The Role of Hydropower / Z. Zhou, T. Levin, A. Botterud // Current Sustainable/Renewable Energy Reports. – 2024. – Vol. 11, No. 4. – P. 145–155. – DOI: 10.1007/s40518-024-00245-6.

8. International Energy Agency. Global Energy Review 2026: Electricity supply [Электронный ресурс]. – Paris: IEA, 2026. – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026/electricity-supply> (дата обращения: 26.07.2026).

9. Voevodin, I.G. Use of Solar Energy to Improve the Efficiency of Power Supply to Remote Settlements / I.G. Voevodin // Energy, Electromechanics and Energy-Efficient Technologies through the Eyes of Young Researchers: Proceedings of the III Russian Youth Scientific School-Conference, Tomsk, October 21–23, 2015 / National Research Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: SKAN, 2015. – P. 131–134.

10. Bubenchikov, A.A. Solar Energy as a Source of Electrical Energy / A.A. Bubenchikov, E.E. Nurakhmet, V.O. Molodykh, A.I. Rudenok // International Research Journal. – 2016. – No. 5 (47). – P. 59–62. – DOI: 10.18454/IRJ.2016.47.288.

11. Sharifov, B.N. Development of a Program for a Single-Axis Solar Tracking System / B.N. Sharifov, Sh.M. Sultonzoda, Kh.R. Zamonov, N.D. Sharipov, F.M. Rakhimov, Sh.A. Bobozoda // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2024. – No. 3 (67). – P. 12–16.

12. Sharifov, B.N. Development of a Control System for a Photovoltaic Installation Based on Fuzzy Logic Methods / B.N. Sharifov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2023. – No. 4 (64). – P. 18–23.

13. Gavrilov, V.G. Potential of Renewable Energy Sources in the Amur Region / V.G. Gavrilov, A.N. Kozlov // Vestnik of Amur State University. – 2017. – Iss. 77. – P. 74–78.

14. Sosnina, E.N. Methodology for Selecting the Optimal Combination of Renewable Energy Sources for Local Energy Systems / E.N. Sosnina, A.V. Shalukho // Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev. – 2012. – No. 3 (96). – P. 215–220.

15. Konovalov, Yu.V. Development of Electric Power and Renewable Energy Sources in the Republic of Uzbekistan / Yu.V. Konovalov, S.A. Tokhtasunov // Bulletin of Angarsk State Technical University. – 2024. – No. 18. – P. 47–51. – DOI: 10.36629/2686-777X-2024-1-18-47-51.
16. Stepanov, M.V. Solar Panels: An Effective Solution for Environmentally Friendly Energy / M.V. Stepanov, M.M. Stulginsky // Vestnik Nauki. – 2024. – No. 7 (76). – Vol. 2. – P. 535–541.
17. Babaev, F.B. Characteristics of Solar Energy Use / F.B. Babaev // Vestnik Nauki. – 2023. – No. 2 (59). – Vol. 2. – P. 274–283.
18. Barinova, V.A. Features of the Development of Renewable Energy Sources in Russia and Worldwide / V.A. Barinova, T.A. Lanshina // Russian Entrepreneurship. – 2016. – Vol. 17, No. 2. – P. 259–270. – DOI: 10.18334/rp.17.2.2214.
19. Kovalchuk, Yu.L. State and Prospects for the Use of Non-Conventional and Renewable Energy Sources in the Fuel and Energy Complex of Russia / Yu.L. Kovalchuk // Mining Information and Analytical Bulletin. – 2006. – No. 3. – P. 237–242.
20. Kashin, Ya.M. Methodology for Determining the Peak Power of a Solar Battery for a Hybrid Energy Complex / Ya.M. Kashin, I.B. Samorodov, A.A. Belov, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov // Scientific Proceedings of Kuban State Technological University. – 2024. – No. 4. – P. 140–148. – DOI: 10.26297/2312-9409.2024.4.14.
21. Okhotkin, G.P. Methodology for Calculating the Power of Solar Power Plants / G.P. Okhotkin // Bulletin of Chuvash University. – 2013. – No. 3. – P. 222–230.
22. Gubaidullin, K. Use of Renewable Energy Sources at Oil and Gas Enterprises / K. Gubaidullin // Universum: Technical Sciences. – 2024. – No. 8 (125). – DOI: 10.32743/UniTech.2024.125.8.18109.
23. Abbasova, T.S. Assessment of the Economic Efficiency of Renewable Energy Sources for Information and Computing Complexes and Control Systems / T.S. Abbasova, N.V. Logacheva, N.P. Sidorova // Regional Economics Issues. – 2015. – No. 4 (25). – P. 167–177.

Маълумот оид ба муаллиф:

Бобозода Шукруллоҳ Абдуғафор, ассистенти кафедраи неруғоҳҳои электрикӣ, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. E-mail: shukrullohbobozoda3@gmail.com

Сведения об авторе:

Бобозода Шукруллоҳ Абдуғафор, ассистент кафедры электрических станций, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. E-mail: shukrullohbobozoda3@gmail.com

Information about the author:

Bobozoda Shukrulloh Abdughafor, Assistant, Department of Electric Power Plants, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. E-mail: shukrullohbobozoda3@gmail.com

МЕТАЛЛУРГИЯ ВА МАВОДШИНОСӢ - METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

УДК: 669.24: 620.1: 620.193.01

DOI: 10.65599/ENG9135

ТАЪСИРИ ИЛОВАИ НИКЕЛ БА ПОТЕНЦИАЛИ КОРРОЗИЯИ ОЗОДИ ХУЛАҶОИ Zn5Al ВА Zn55Al ДАР МУҶИТИ МАҲЛУЛИ NaCl

З.Ф. Нарзуллоев, Ҷ.Н. Алиев, И.Н. Ганиев

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар ин мақола таъсири иловаҳои хурди никел (0.01–0.5 вазн.%) ба хосиятҳои зангзанӣ-электрохимиявии ҳулаҳои рухно-алюминийи Zn5Al ва Zn55Al дар маҳлулҳои NaCl бо консентратсияи 0.03 ва 3.0 вазн.% омӯхта шудаанд. Тадкиқот дар шароити назоратшаванда барои арзёбии устувории ҳулаҳо дар муҳитҳое, ки коррозияи атмосферӣ ва бахриро тақдид мекунад, гузаронида шудаанд. Потенсиали коррозияи озод (*E_{з.озод}*) барои 60 дақиқа пас аз ғўтонидани намунаҳо дар маҳлули NaCl ба қайд гирифта шуданд. Ҳамин муддати вақт барои устувор гардидани параметрҳои электрохимиявӣ ва ташаккули пардаи оксидии ибтидоӣ дар сатҳ кифоягӣ менамояд. Нишон дода шудааст, ки дохил кардани никел пайвасти потенсиали коррозияи озодро ба самти минтақаи мусбат, махсусан дар маҳлули NaCl-и обшуда, интиқол мекунад, ки аз афзоиши устувории термодинамикии ҳулаҳо шаҳодат медиҳад. Ин эҳтимолан аз сабаби тағирёбии сохтори қабати рӯйсатҳӣ ва коҳишёбии фаъолнокии мавзёҳои анодӣ вобастагӣ дошта бошад. Афзоиши консентратсияи ионҳои хлорид суръати коррозияро зиёд мекунад ва ба ҷойивазкунии потенсиал ба самти манфӣ оварда мерасонад, зеро ионҳои хлор пардаҳои муҳофизатиро фаъолон ваيران мекунад ва равандҳои коррозияи маҳаллиро меангезанд. Маълумоти бадастовардашуда имконият медиҳанд, ки таркиби ҳулаҳоро барои истифода дар муҳитҳои гуногуни агрессивӣ беҳсозӣ намоем.

Калидвожаҳо: ҳулаҳои рухно-алюминийӣ, никел, потенсиали коррозияи озод, NaCl, поляризатсияи анодӣ, устуворӣ ба зангзанӣ.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НИКЕЛЯ НА ПОТЕНЦИАЛ СВОБОДНОЙ КОРРОЗИИ СПЛАВОВ Zn5Al и Zn55Al В СРЕДЕ ЭЛЕКТРОЛИТА NaCl

З.Ф. Нарзуллоев, Дж.Н. Алиев, И.Н. Ганиев

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В работе изучено влияние малых добавок никеля (0,01–0,5 мас. %) на коррозионно-электрохимические свойства цинково-алюминиевых сплавов Zn5Al и Zn55Al в растворах NaCl концентрацией 0,03 и 3,0 мас. %. Исследования проводили в контролируемых условиях, чтобы оценить устойчивость сплавов в средах, моделирующих атмосферную и морскую коррозию. Потенциал свободной коррозии (*E_{св.кор.}*) регистрировали в течение 60 мин после погружения образцов в электролит – этого времени достаточно для стабилизации электрохимических параметров и формирования первичной оксидной плёнки на поверхности. Показано, что введение никеля стабильно смещает потенциал свободной коррозии в положительную область, особенно в разбавленном растворе NaCl, что свидетельствует о повышении термодинамической устойчивости сплавов. Вероятно, это связано с изменением структуры поверхностного слоя и снижением активности анодных участков. Повышение концентрации хлорид-ионов увеличивает скорость коррозии и приводит к смещению потенциала в отрицательную сторону, поскольку ионы хлора активно разрушают защитные плёнки и стимулируют локальные коррозионные процессы. Полученные данные позволяют оптимизировать состав сплавов для эксплуатации в различных агрессивных средах.

Ключевые слова: цинково-алюминиевые сплавы, никель, потенциал свободной коррозии, NaCl, анодная поляризация, коррозионная стойкость.

EFFECT OF NICKEL ADDITIVES ON THE FREE CORROSION POTENTIAL OF Zn5Al AND Zn55Al ALLOYS IN A NaCl ELECTROLYTE ENVIRONMENT

Z.F. Narzullov, J.N. Aliev, I.N. Ganiev

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

This paper examines the effect of small nickel additions (0.01–0.5 wt.%) on the corrosion-electrochemical properties of Zn5Al and Zn55Al zinc-aluminum alloys in NaCl solutions with concentrations of 0.03 and 3.0 wt.%. The studies were conducted under controlled conditions to evaluate the stability of the alloys in environments simulating atmospheric and marine corrosion. The free corrosion potential (*E_{freecor.}*) was recorded for 60 min after immersion of the samples in the electrolyte—this time is sufficient for stabilization of the electrochemical parameters and formation of the primary oxide film on the surface. It is shown that the introduction of nickel consistently shifts the free corrosion potential toward the positive region, especially in a dilute NaCl solution, indicating an increase in the thermodynamic stability of the alloys. This is likely due to changes in the structure of the surface layer and a decrease in the activity of the anodic sites. Increasing the chloride ion concentration increases the corrosion rate and leads to a negative potential shift, as chloride ions actively destroy protective films and stimulate localized corrosion processes.

The obtained data allow us to optimize the alloy composition for use in various aggressive environments.

Keywords: zinc-aluminum alloys, nickel, free corrosion potential, NaCl, anodic polarization, corrosion resistance

Муқаддима (Introduction)

Хӯлаҳои руҳӣ-алюминий бо шарофати як қатор тавсифҳои истифодашавандагии бомувафақияти якҷояшавӣ ба таври васеъ ҳамчун масолеҳи конструксионӣ ва муҳофизат аз зангзанӣ истифода мешаванд: мустаҳкамӣи кофӣи механикӣ, қобилияти технологии хуб ҳангоми коркард ва рехтагарӣ ва муқовимати нисбатан баланди ба зангзанӣ истодагарӣ доштан дар шароити атмосферӣ ва муҳитҳои агресивии паст. Ин хосиятҳо системаҳои руҳӣ-алюминийро дар соҳаҳои гуногун маъмул мегардонанд - аз истеҳсоли маснуоти пайвандӣ ва элементҳои конструксияҳои сохтмонӣ то истифодашавии онҳо ҳамчун рӯйпӯшҳои муҳофизатӣ барои маснуоти пӯлодӣ, ба монанди гальванизатсия ва руҳандуди тафсон. Аллюминий дар таъмини муқовимат ба коррозияи ин хӯлаҳо нақши калидӣ мебозад: он ба ташаккули пардаи зичи оксидии худбарқароршаванда дар рӯи он мусоидат мекунад, ки самаранок оксидшавии минбаъдаи металлро пешгирӣ мекунад. Ғайр аз ин, мавҷудияти аллюминий хосиятҳои рехтагарии хӯларо беҳтар мекунад, майли пайдоиши нуқсонҳои нишастро коҳиш медиҳад ва яхела будани умумии сохти таркибиро зиёд мекунад [1].

Бо вуҷуди ин, дар муҳитҳои агресивии хлорӣ, хосиятҳои истифодабарии хӯлаҳои руҳӣ-аллюминий ба таври назаррас коҳиш меёбанд. Сабаби асосии ин парокандашавии шадиди анодии фазаи руҳ аст, ки дар чуфти гальванӣ бо аллюминий ва пайваस्ताгҳои байниметаллии он ҳамчун анод амал мекунад ва ба коррозияи афзалиятнок дучор мешавад. Ионҳои хлор бо қувваи баланди воридшавии худ, пардаҳои муҳофизатии оксидро фаъолона вайрон мекунанд, ба ташаккули комплексҳои хлоридии ҳалшаванда мусоидат мекунанд ва равандҳои маҳаллии коррозияро аз қабili пайдоиши коррозияи питтингӣ ва тарқишӣ, оғоз мекунанд. Паст шудани муқовимати зангзанӣ махсусан дар муҳитҳое, ки концентратсияи баланди хлорид доранд, ба назар мерасад - масалан, дар оби баҳр ё таҳти таъсири реагентҳои яхкунӣ. Дар чунин шароит, ҳатто нуқсонҳои ночизи рӯйпӯш ё микротарқишҳо метавонанд зуд ба манбаи нуқсонҳои амиқ табдил ёбанд, ки муҳлати хизмати маснуотҳоро аз хӯлаҳои руҳӣ-аллюминий ба таври назаррас коҳиш медиҳанд.

Илова кардани миқдори ками никел яке аз усули ояндадори афзоиши муқовимат ба коррозияи системаҳои руҳӣ-аллюминий ҳисобида мешавад. Никел, ки нисбат ба руҳ ва аллюминий электромусбӣ мансуб меёбад, метавонад таркиби фазавӣ ва сохти таркибии хӯларо тағйир диҳад ва ба булӯрбандӣ ва ташаккулёбии ташкилдихандаҳои сохти таркибӣ таъсири тағйирдиҳанда расонад. Хусусан, ворид намудани ҳатто миқдори ночизи никел (дар диапазони даҳяк ва садяки фоиз) ба ташаккулёбии сохти таркибии нисбатан майдадона аз ҳисоби таъсир расонидан ба кинетикаи ташаккулёбӣ ва афзоиши булӯрҳо, инчунин ташаккули қабатҳои зичи фазаҳои муҳофизатӣ дар сарҳадҳои дончаҳо ва дар сатҳи хӯла мусоидат мекунад. Чунин тағйироти сохти таркибӣ боиси пастшавии фаъолнокии умумии минтақаҳои анодӣ, пастшавии суръати ҳалшавии фазаи руҳ ва афзоиши устувории умумии термодинамикии масолеҳ дар муҳитҳои зангзананда мегардад. Ғайр аз ин, ҳуди никел бо муқовимати баланди зангзанӣ дар бисёр муҳитҳо, аз ҷумла муҳитҳои дар асоси хлорид мавҷудбуда, аз сабаби қобилияти он барои ташкили қабатҳои устувори оксиди ғайрифавол тавсиф мешавад. Аз ин рӯ, никел на танҳо ҳамчун иловаи ҷавҳарикунанда, балки ҳамчун рӯйпуши муҳофизатии мустақил - масалан, ҳангоми бо никел рӯйпуш намудани маснуот аз пӯлод ва мис васеъ истифода мешавад. Устувории баланди химиявии никел, муқовимати он ба оксидшавӣ ва қобилияти нигоҳ доштани хосиятҳои муҳофизатӣ дар диапазони васеи pH никелро ба як компоненти арзишманд дар системаҳои муҳофизат аз зангзанӣ табдил медиҳад [1, 5–7].

Мақсади ин тадқиқот омӯзиши ҳамаҷонибаи таъсири иловаҳои ночизи никел ба рафтори электрохимиявии хӯлаҳои руҳӣ-аллюминийи системаҳои Zn5Al ва Zn55Al дар муҳитҳои хлоридӣ мебошад. Дар доираи тадқиқот таваҷҷуҳи асосӣ ба тағйирёбии потенциали коррозияи озод - параметри калидии термодинамикӣ, ки ҳассосияти масолеҳро ба вайроншавии зангзанӣ тавсиф мекунад, ҷудо карда мешавад. Ҳамзамон рафтори анодии хӯлаҳо, аз ҷумла кинетикаи ҳалшавии анодӣ ва хусусиятҳои ташаккули манбаҳои коррозияи маҳдуд таҳлил карда мешавад. Таҷрибаҳо дар маҳлулҳои оби хлориди натрий бо концентратсияҳои гуногун - 0,03 ва 3,0 %-и вазн гузаронида мешаванд, ки имкони амсиласозии ҷӣ агресивии бо эътидол, ва ҷӣ шароитҳои баландаг्रेसивии

истифодашаванда, наздик ба шартҳои таъсири фурӯнишини атмосферӣ ва муҳитҳои баҳрӣ монанд аст, фароҳам меоварад. Чунин нуқтаи назар имкон медиҳад, ки қонуниятҳои таъсири никел ба коррозиятобоварии ҳулаҳо вобаста аз агрессивӣ будани муҳит ва концентратсияҳои иловаҳои муътадил муайян карда шавад, ки самараи муҳофизатии баландро таъмин менамояд. Натиҷаҳои бадастоварда метавонанд барои таҳияи таркибҳои нави ҳулаҳои руҳӣ-алюминий бо хосиятҳои беҳтар кардашудаи тавсифҳои зидди зангзанӣ, ки барои истифода дар шароити душвори корӣ мувофиқанд, истифода шаванд [8–12].

Маводҳо ва усулҳо (Materials and methods)

Объектҳои таҳқиқот ҳулаҳои руҳӣ-алюминийи системаҳои $Zn5Al$ ва $Zn55Al$ ба ҳисоб мераванд, ки бо иловаҳои хурди никел дар концентратсияҳои 0,01; 0,05; 0,1 ва 0,5 вазн.% тағйир дода шуда буданд. Интиҳоби маҳс худӣ ҳамин концентратсияҳо барои муайян кардани арзишҳои остои микдори никел, ки дар онҳо тағйироти назаррас дар хосиятҳои зангзанӣ-электрохимиявии ҳулаҳо ба назар мерасанд, инчунин пайгирии вобастагии ин хосиятҳо аз микдори иловаи дохилгардида фаҳмонида мешавад. Ҳулаҳоро бо роҳи ғудохтани индуксионӣ дар бўтаи графитӣ ба даст оварда шуданд, ки гармкунии якхеларо таъмин мекунад ва таъсири ноҳолами байни ғудохта ва маводи зарфро ба ҳадди ақал мерасонад. Пас аз ноил гардидан ба ҳарорати зарурӣ, ғудохта барои якхела кардани таркиб бодикқат омехта карда шуд ва сипас ба қолабҳои металли пешакӣ гармкардашуда рехта шуд. Ин амал аз тағйироти ногаҳонии ҳарорат пешгирӣ карда шуд, ҳатари нуқсонҳои дохилиро кам кард ва сохтори зич ва якхелаи рехтаҳоро таъмин намуд.

Ба сифати маводди ибтидоии истифодашуда руҳ ва алюминийи тозаи баланд бо микдори металли асосӣ на камтар аз 99,9% аз рӯи вазн истифода шуданд, ки таъсири ҳадди ақали ғашҳои бегоноро ба натиҷаҳои таҷрибаҳо таъмин кард, инчунин никели маҳлулӣ, ки бо дараҷаи баланди тозагӣ ва тақсимои якхела дар дохили матритсаи ҳула тавсиф мешавад, низ истифода бурда шуд. Пас аз булӯршавии пурра, рехтаҳо ба таври механикӣ барои гирифтани намунаҳои андозаҳои қатъӣ муайяншуда - 10 x 10 x 3 мм - коркард карда шуданд, ки тақроршавандагии шароити санҷиш ва муқоисаи дақиқи натиҷаҳоро байни силсилаҳои гуногуни таҷрибавӣ таъмин намуд.

Пеш аз оғози ченкунии электрохимиявӣ, сатҳи кории намунаҳо бо истифода аз тартиби бисёрзинагӣ бодикқат омода карда шуд. Аввалан, он пай дар пай бо қоғаи сунбод ба андозаи дончаҳои аз P400 то P1000 суфта карда шуд. Ин пайдарпайӣ имкон дод, ки нуқсонҳои сатҳӣ, осори қабати рехтаҳо ва осеби механикӣ бе эҷоди ҳарошиданҳои амиқ тадриҷан бартараф карда шаванд. Сипас, сатҳ дар чархи пашмин бо истифода аз ҳамираи оксиди алюминий сайқал дода шуд, то дурахши оинамонанд ва ноҳамвории ҳадди ақал ба даст оварда шавад, ки барои ба даст овардани маълумоти устувор ва бозътимоди электрохимиявӣ бениҳоят муҳим мебошад. Пас аз сайқалдиҳӣ, намунаҳо бо оби муқаттар (соф) шуста шуданд, то зарраҳои абразивии боқимондари тоза кунанд, бо спирти этилӣ равшан тоза карда шуданд, то таъсири ифлоскунандаҳои органикӣ ба равандҳои электрохимиявӣ бартараф карда шаванд ва бо ҷараёни ҳавои гарм хушк карда шаванд, то аз пайдоиши пардаҳои оби адсорбсияшуда, ки метавонанд натиҷаҳои ченкуниро таҳриф кунанд, пешгирӣ карда шаванд.

Масоҳати сатҳи кории кушодаи ҳар як намуна қатъиян назорат ва ба 1 см² танзим карда шуд - ин амал ҳамчун беҳтарин барои таъмини ҳассосияти кофӣ ченкунӣ ҳангоми нигоҳ доштани устувории параметрҳо дар давраҳои тӯлонии тадқиқот интиҳоб карда шуд. Сатҳҳои боқимондаи намунаҳо бо лаки химиявӣ пойдор пӯшонид шуда буданд, ки онҳоро аз алоқа бо маҳлули NaCl бозътимод ҷудо мекард ва бо ин васила таъмин мекард, ки хабарҳои электрохимиявии сабтшуда танҳо аз рафтори минтақаи тадқиқот вобастаанд. Тадқиқоти электрохимиявӣ дар як ҳуҷайраи сеэлектродии стандартӣ дар ҳарорати қатъиян назоратшавандаи (20 ± 2) °C гузаронида шуд, ки таъсири ноустувории ҳароратро ба кинетикаи равандҳои зангзанӣ ба ҳадди ақал расонд ва муқоисаи натиҷаҳоро байни силсилаҳои гуногуни тадқиқот таъмин кард. Намунаҳои омодашудаи ҳулаҳои омӯхташуда ҳамчун электроди корӣ, пластинаи платинӣ, ки дорои гузаронандагии баланди барқӣ ва муқовимати химиявӣ дар диапазони васеи потенциалҳо мебошад, ҳамчун электроди ёрирасон ва электроди хлориди нуқра (Ag/AgCl), ки бо устувории потенциал ва осонии истифода тавсиф мешавад, ҳамчун электроди истинодӣ хизмат мекарданд. Дар ҳолатҳои зарурӣ, барои ба як шакл даровардани

маълумот ва муқоиса бо арзишҳои нашршуда, потенциалҳо нисбат ба электроди стандартии гидроген бо истифода аз таносубҳои маълуми термодинамикӣ аз нав ҳисоб карда шуданд.

Ҳангоми тадқиқот маҳлули оби хлориди натрий бо концентратсияҳои 0,03 ва 3,0 вазн.%, ки дар оби муқаттари баландсифат омода гардида буданд, истифода шуданд. Ин концентратсияҳо барои тақлид кардани шароити гуногуни корӣ интихоб карда шуданд: маҳлули омехташуда (0,03 вазн.%) коррозияи атмосфераро дар муҳити муътадили агрессивӣ шабоҳат медиҳад, дар ҳоле ки маҳлули концентратсияшуда (3,0 вазн.%) таъсири оби баҳр ва дигар муҳитҳои дорои намаки баландро тақлид мекунад. Маҳлулҳо фавран пеш аз ҳар як тадқиқот омода карда шуданд, то тағйироти эҳтимолии таркибӣ аз сабаби бухоршавии об ё гидролиз бартараф карда шаванд ва дар ҳарорати хонагӣ ҳадди аққал 1 соат нигоҳ дошта шуданд, то гомогенизатсияи пурра ва устувории параметрҳои физикию химиявӣ ба даст оварда шаванд.

Потенсиали коррозияи озод аз лаҳзаи ғўтонидани намуна дар маҳлули NaCl барои 60 дақиқа ба қайд гирифта шуд. Таҷрибаҳои пешакӣ нишон доданд, ки ин вақт барои муқаррар кардани арзиши потенциали ҳолати устувор, ки мувозинати динамикии байни равандҳои анодӣ ва катодиро дар сатҳи ҳўла инъикос мекунад, кофӣ аст. Барои ба даст овардани қачхатаҳои поляризатсионии анодӣ, мо речаи потенциодинамикиро бо суръати таъбиқи потенциали 2 мВ с^{-1} истифода бурдем, ки барои чунин тадқиқот умуман қабул карда мешавад ва тавозуни байни суръати сканкунӣ ва ҳалли маълумотро таъмин мекунад. Диапазони ҷобаҷокунии потенциал аз арзиши потенциали коррозияи озоди муқарраршуда дар минтақаи анодӣ то пайдо шудани аломатҳои возеҳи ҳалшавии шадиди ҳўла - афзоиши якбораи зичии ҷараён, ташаккули манбаҳои коррозияи маҳаллӣ ё тағйирот дар морфологияи сатҳӣ, ки бо муоинашаванда ё тавассути тағйироти хос дар қачхатаи поляризатсия сабт шудаанд, интихоб карда шуд. Барои баланд бардоштани эътимодноқӣ ва такроршавандагии натиҷаҳо, ҳар як ҳўла се маротиба дар шароити якхела санҷида шуд. Ин амал имкон дод, ки тамоил доштани тасодуфии имконпазир ба сохти таркибии гуногунҷинсии намунаҳо ё ноустувории ночиз дар параметрҳои танзимоти таҷрибавӣ ба инобат гирифта шаванд. Баъди гузаронидани як қатор силсилаҳои ченкунӣ, қиматҳои миёнаи потенциали коррозияи озод ҳисоб карда шуд, инчунин тамоили стандартӣ, ки паҳн намудани маълумотро тавсиф менамояд, муайян карда шуд. Хатоии ченкунии потенциал аз $\pm 5\%$ зиёд набуд, ки ба талаботи дақиқии тадқиқоти электрохимиявии чунин намуд ҷавобгӯ буда, эътимоднокии натиҷаҳои бадастомадаро тасдиқ мекунад. Маълумоти таҷрибавӣ бо истифода аз усулҳои стандартӣ омӯрӣ, аз ҷумла ҳисоб кардани қиматҳои миёна, фосилаҳои эътимод ва коэффитсиентҳои тағйирёбӣ коркард карда шуданд, ки пас аз он онҳо дар шакли ҷадвали ҷамъбасти (Ҷадвали 1) ҷамъовари гардидаанд, ки осонии таҳлил ва пешниҳоди возеҳии натиҷаҳо таъмин кард [3–4].

Натиҷаҳо (Results)

1. *Динамикаи тағйирёбии потенциал.* Пас аз ғарқ кардани намунаҳо ба маҳлули NaCl, дар дақиқаҳои аввал тағйирёбии босуръати потенциал ба минтақаи мусбат мушоҳида карда шуд. Минбаъд муътадилгардии бузургӣҳо пас аз 40-50 дақиқа ба амал омад, ки бо ташаккул ёфтани пардаи оксидии муҳофизатӣ дар сатҳи ҳўла алоқамандӣ дорад.

2. *Таъсири никел ба ҳўлаи Zn5Al.* Дар маҳлули 0,03% NaCl (баъди 60 дақиқа): Zn5Al: -0,940 В; - Zn5Al + 0,5 % Ni: -0,550 В. Тағйири потенциал ба $\sim 0,39$ В аз афзоиши назарраси муқовимати коррозияи он шаҳодат медиҳад. Дар маҳлули 3% NaCl: - Zn5Al: -1,064 В; - Zn5Al + 0,5 % Ni: -0,692 В. Афзоиши концентратсияи ионҳои хлорид маҳлули анодиро шиддат медиҳад ва боиси ба минтақаи манфӣ кўчидани потенциал мегардад.

3. *Таъсири никел ба ҳўлаи Zn55Al.* Дар маҳлули 0,03% NaCl: - Zn55Al: -0,880 В; Zn55Al + 0,5 % Ni: -0,742 В. Дар маҳлули 3% NaCl: - Zn55Al: -1,022v; Zn55Al + 0,5 % Ni: -1,000 В. Таъсири ҷавҳарикунонӣ камтар ба назар мерасад, ки бо ҳиссаи баланди алюминий ва ташаккули пардаи устувори оксиди Al_2O_3 (Ҷадвали 2) [3, 4] вобаста аст.

Самараи ҷавҳаронидан камтар акс меёбад, ки бо зиёд будани миқдори алюминий ва ташаккулёбии пардаи мустаҳками оксидии Al_2O_3 алоқамандӣ дорад (Ҷадвали 2) [3, 4].

Механизми таъсири никел. Таъсири мусбати никел иборат аст:

1. Майдадона будани сохти таркибии ҳўла;
2. Паст шудану якхела набудани таркиби микрогалвании ҳўла;
3. Ба вучуд омадани қабати ғафси фазаӣ дар ҳўла;

4. Эҳтимоли пайдоиши пайвастиҳои камҳалшаванда дар таркиби пардаи муҳофизатӣ.

Ҳангоми поляризацияи анодӣ манбаи доимии ионҳо дар қабати наздиэлектродӣ ба вуҷуд меояд, дар ин ҳолат никел равандҳои электродро тақсим мекунад ва ионизатсияи фазаи рухро суст мекунад.

Ҷадвали 1 – Вобастагии потенциали (х.с.э.) коррозияи озоди ($-E_{з. озод.}$, В) ҳулаи рухӣ-алюминийи Zn5Al бо никел дар муддати вақт дар муҳити маҳлули NaCl [3, 4]

Table 1 – Dependence of the potential (h.s.e.) of free corrosion ($-E_{free\ corros.}$, V) of zinc-aluminum alloy Zn5Al with nickel on time in an electrolyte environment of NaCl [3, 4]

Муҳити NaCl, %-и вазн	Микдори никел дар хула, вазн%	($-E_{з. озод.}$, В (х.с.э.)) дар вақти нигоҳдорӣ, дақ.							
		0.3	0.6	2	4	10	20	40	60
0.03	Zn5Al	1.054	1.012	0.998	0.976	0.963	0.952	0.940	0.940
	0.01	0.688	0.667	0.656	0.631	0.607	0.596	0.572	0.570
	0.05	0.676	0.655	0.644	0.618	0.590	0.576	0.562	0.562
	0.1	0.663	0.646	0.634	0.607	0.582	0.568	0.557	0.556
	0.5	0.653	0.634	0.622	0.598	0.576	0.566	0.551	0.550
3.0	Zn5Al	1.170	1.138	1.126	1.109	1.086	1.077	1.066	1.064
	0.01	0.832	0.812	0.800	0.780	0.750	0.736	0.718	0.716
	0.05	0.828	0.805	0.794	0.770	0.744	0.730	0.710	0.710
	0.1	0.811	0.786	0.775	0.755	0.735	0.722	0.702	0.700
	0.5	0.801	0.780	0.769	0.746	0.720	0.708	0.692	0.692

Ҷадвали 2 – Вобастагии потенциали (х. с. э.) коррозияи озоди ($-E_{з. озод.}$, В) ҳулаи рухӣ-алюминийи Zn55Al бо никел дар муддати вақт дар муҳити маҳлули NaCl [3, 4]

Table 2 – Dependence of the potential (h.s.e.) of free corrosion ($-E_{free\ corros.}$, V) of zinc-aluminum alloy Zn55Al with nickel on time in an electrolyte environment of NaCl [3, 4]

Муҳити NaCl, %-и вазн	Микдори никел дар хула, %-и вазн	($-E_{з. озод.}$, В (х.с.э.)) дар вақти нигоҳдорӣ, дақиқа							
		0.3	0.6	2	4	10	20	40	60
0.03	Zn55Al	0.959	0.933	0.926	0.910	0.894	0.887	0.882	0.880
	0.01	0.867	0.851	0.844	0.829	0.810	0.794	0.770	0.770
	0.05	0.860	0.846	0.838	0.824	0.804	0.788	0.760	0.758
	0.1	0.846	0.832	0.826	0.813	0.798	0.782	0.752	0.750
	0.5	0.837	0.820	0.814	0.800	0.785	0.770	0.744	0.742
3.0	Zn55Al	1.208	1.174	1.136	1.108	1.067	1.052	1.024	1.022
	0.01	1.093	1.072	1.061	1.042	1.030	1.026	1.020	1.018
	0.05	1.090	1.070	1.059	1.039	1.026	1.021	1.015	1.015
	0.1	1.088	1.062	1.054	1.036	1.023	1.018	1.010	1.008
	0.5	1.080	1.056	1.048	1.032	1.020	1.015	1.003	1.000

Муҳокима (Discussions)

Динамикаи тағйирёбии потенциали коррозияи озод дар муддати вақт (Ҷадвалҳои 1 ва 2) як қонуниятро доимиро барои ҳамаи ҳулаҳои омӯхташуда нишон медиҳад: дар дақиқаҳои аввал пас аз ғўтондан дар маҳлули NaCl, тағйирёбии босуръати потенциал ба самти минтақаи мусбат мушоҳида

мешавад ва то 40-50 дақиқа бузургиҳо муътадил мегарданд. Чунин кинетика барои равандҳои пасиватсия хос аст ва бо ташаккули пардаи оксиди муҳофизатӣ дар сатҳи ҳӯла алоқаманд мебошад. Тағйирёбии ибтидоии потенциал гузаришро аз сатҳи металли нав коркардшуда ба ҳолати қисман бо маҳсулҳои оксидшавии муҳофизатшуда инъикос мекунад. Муътадил гардидани бузургиҳо то дақиқаи 60-ум муқаррар шудани мувозинати динамикиро миёни равандҳои ҳалшавии металл ва афзоиши/барқароршавии қабати пасивӣ нишон медиҳад. Ин мувофиқ будани давомнокии таъсириро барои муайян кардани арзиши потенциали ҳолати устувор асоснок мекунад.

Таъсири иловаҳои никел ба рафтори зангзанӣ-электрохимиявии ҳӯлаҳои Zn5Al ва Zn55Al нобаробар аст ва ҳам аз ҷониби концентратсияи элементҳои ҷавҳарӣ ва ҷӣ аз ҷониби агрессивӣ будани муҳити муайян карда мешавад. Дар маҳлули NaCl-и омодашуда (0.03 %-и вазн), ворид намудани 0.5 %-и вазн никел боиси тағйироти мусбати намоён дар потенциали коррозияи озод мегардад. Барои ҳӯлаи Zn5Al, потенциал аз -0.940 В то -0.550 В (тағйирӣ ~0.39 В) тағйир меёбад, ки ин нишонаи афзоиши назарраси устувории термодинамикӣ ва коҳиши майл доштан ба вайроншавии зидди зангзанӣ мебошад. Барои Zn55Al, таъсир камтар намоён аст: потенциал аз -0.880 В то -0.742 В тағйир меёбад. Беҳбудии назарраси хусусиятҳои Zn5Al аз сабаби қобилияти нисбатан пастии пасиватсияи ибтидоӣ дар муқоиса бо Zn55Al мебошад. Дар ҳӯлаи Zn55Al, миқдори баланди алюминий ба ташаккули пардаи устувори оксиди Al_2O_3 мусоидат мекунад, ки худ бо худ дараҷаи назарраси муҳофизатиро таъмин менамояд. Дар ин шароит, саҳми иловаи никел маҳдуд аст - қабати оксиди алюминийӣ ғайрифавол омили бартари дошта дар муқовимат ба зангзанӣ боқӣ мемонад.

Афзоиши концентратсияи хлоридҳо то 3,0 %-и вазн агрессивии муҳитро зиёд мекунад ва ба ҷойивазкунии потенциалҳо ба минтақаи манфӣ оварда мерасонад, ки аз фаволшавии ҳалшавии анодӣ ва депассиватсияи қисман сатҳӣ шаҳодат медиҳад. Барои Zn5Al, потенциали ҳӯлаи асосӣ аз -0,940 В (дар 0,03% вазн NaCl) то -1,064 В ва барои варианти дорои 0,5 %-и вазн никел то -0,692 В коҳиш меёбад. Тамоюли монанд барои Zn55Al мушоҳида мешавад: потенциали ҳӯлаи ибтидоӣ то -1,022 В ва барои ҳӯлаи дорои 0,5 %-и вазн никел то -1,000 В коҳиш меёбад. Афзоиши концентратсияи ионҳои хлорид ба нобудшавии пардаҳои муҳофизатӣ, фаволшавии равандҳои коррозияи маҳаллӣ ва афзоиши суръати ҳалшавии фазаи руҳ мусоидат мекунад. Ғайр аз ин, ҳатто дар муҳити агрессивӣ, никел таъсири мусбатро нигоҳ медорад, гарчанде ҷойивазкунии мутлақии потенциал як миқдор дар муқоиса бо маҳлули обшуда камтар аст.

Таҳлили маълумот барои концентратсияҳои гуногуни никел (0.01-0.5 %-и вазн) нишон медиҳад, ки самарои афзоиши ба коррозия тобоварӣ ҳатто ҳангоми илова кардани миқдори камтарини никел зоҳир мегардад ва бо зиёд шудани миқдори никел меафзояд. Аммо, афзоиши тағйироти мусбати потенциал ҳангоми гузаштан аз 0.1 то 0.5 %-и вазн тадриҷан кам мешавад, ки ин сершавии таъсири тағйирӣ сохти таркибро нишон медиҳад. Ин аз сершавии самарои ҷавҳаронии сохти таркибӣ ва ташаккулёбии ҳолати муътадили сохти таркибӣ аллакай ҳангоми миқдорҳои ночизи никел нишон медиҳад. Афзоиши минбаъдаи миқдори никел ба беҳтаршавии мутаносибонаи тавсифҳои электрохимиявӣ намеоварад, ки муҳим аст ҳангоми коркарди таркибҳои ҳӯлаҳо аз нуқтаи назари иқтисодӣ ва технологӣ мувофиқи мақсад будан ба назар гирифта шавад.

Самараҳои мушоҳидашуда бо механизми пешниҳодшудаи амали никел мувофиқанд. Аввалан, никел ба майдадона кардани сохти таркибии ҳӯла мусоидат мекунад, таносуби сарҳадҳои байнидоначаҳоро зиёд мекунад ва тақсими яхелаи фазаро таъмин мекунад. Дуюм, гуногунтаркибии микрогалваникӣ ҳӯларо коҳиш медиҳад: никел фарқи потенциалҳоро байни ташкилдиҳандаҳои сохти таркибии алоҳида паст мекунад, ва бо ҳамин ҷуфтҳои галваникӣ маҳаллиро, ки барои коррозияи суръатбахш масъуланд, паҳн мекунад. Сеюм, дар ҳӯла қабатҳои зичи фазавӣ ташаккул меёбанд, ки метавонанд ҳамчун монеаҳо барои диффузияи ионҳои агрессивӣ амал намоянд. Чорум, имконияти ташаккулёбии пайвастагӣҳои камҳалшаванда метавонанд дар дохили пардаи муҳофизатӣ ташаккул ёбанд, ки устуворӣ ва часпиши онро ба зерғузур зиёд мекунад. Ҳангоми поляризатсияи анодӣ, никел барилова равандҳои электродиро ҷудо мекунад ва ионизатсияи фазаи руҳро суст мекунад ва суръати ҳалшавии анодиро маҳдуд менамояд.

Ҳамин тариқ, дохил намудани миқдорҳои камтарини никел бо самар муқовимат ба коррозияи ҳӯлаҳои руҳӣ-алюминийро баланд мекунад, илова бар ин самаранокии балонтарин дар ҳӯлаҳо бо миқдори нисбатан камтарини алюминий (Zn5Al) ба даст меояд. Дар ҳӯлаҳо бо миқдори зиёди

алюминий ($Zn_{55}Al$), саҳми мусбати никел аз сабаби таъсири бартаридоштаи пардаи оксидии муҳофизатии Al_2O_3 камтар ба назар мерасад. Натиҷаҳои бадастомада имконияти истифодаи никелро ҳамчун иловаи ҷавҳарикунанда барои беҳтар кардани самаранокии рӯйпӯшҳои руҳӣ-алюминий дар муҳитҳои хлоридӣ, аз ҷумла шароитҳои, ки коррозияи баҳрӣ ва атмосферӣ тақдир мекунад, тасдиқ мекунад.

Хулоса (Conclusions)

1. Иловаҳои никел (0,01- 0,5 %-и вазн) потенциали коррозияи озоди ҳулаи $Zn_{55}Al$ ва $Zn_{55}Al$ -ро ба минтақаи мусбат мекуҷонанд.
2. Таъсири бештар барои ҳулаи $Zn_{55}Al$ дар маҳлули 0,03% $NaCl$ мушоҳида карда мешавад.
3. Баланд шудани концентратсияи $NaCl$ то 3% суръати коррозияро зиёд карда потенциали коррозияи озодро ба тарафи манфӣ мекуҷонад.
4. Муътадилгардии потенциал пас аз 40-50 дақиқаи ғарқ куноидани ҳулаҳо дар маҳлули $NaCl$ ба амал меояд.
5. Ҷавҳаронидан бо никел ба ташаккули қабати муҳофизатии устувортар ва баланд бардоштани муқовимати коррозияи ҳулаҳо мусоидат мекунад.

*Муқаррир: Маҳмадизода М.М.- д.и.т., профессор, сардори раёсати таълим, филиали Донишгоҳи миллии тадқиқотӣ
технологии МИСН дар ш. Душанбе.*

Адабиёт

1. Ганиев, И.Н. Влияние добавок никеля на анодное поведение цинково-алюминиевых сплавов $Zn_{55}Al$, $Zn_{55}Al$ в среде электролита $NaCl$ / И.Н. Ганиев, Дж.Н. Алиев, З.Ф. Нарзуллоев // Журнал прикладной химии. – 2019. – Т. 92, № 11. – С. 1420–1426.
2. Ахмедов, М.А. Электрохимическое поведение диметилсульфона на платиновом электроде / М.А. Ахмедов, Ш.Ш. Хидиров, С.И. Сулейманов // Электрохимия. – 2023. – Т. 59, № 11. – С. 674–685. – DOI: 10.31857/S0424857023110038.
3. Алиев, Д.Н. Влияние добавок железа и никеля на твердость сплавов $Zn_{55}Al$ и $Zn_{55}Al$ / Д.Н. Алиев, И.Н. Ганиев, З.Ф. Нарзуллоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – № 1 (41). – С. 86–92. – EDN: XSBZAL.
4. Гельман, Д. Снижение коррозии алюминия в щелочных электролитах, содержащих гибридную систему неорганических/органических ингибиторов для источников питания / Д. Гельман, И. Ласман, С. Елфимчев, Д. Старосветский, Я. Эй-Эли // Journal of Power Sources. – 2015. – Т. 285. – С. 100.
5. Чан, С. Коррозионное и анодное поведение чистого алюминия в новом щелочном электролите / С. Чан, Дж. Ван, Х. Шао, Дж. Ван, С. Цзэн, Дж. Чжан, Ц. Цао // Acta Physico-Chimica Sinica. – 2008. – Т. 24, № 9. – С. 1620.
6. Ван, Дж.Б. Коррозионное и электрохимическое поведение чистого алюминия в щелочных растворах метанола / Дж.Б. Ван, Дж.М. Ван, Х.Б. Шао, Дж.Ц. Чжан, Ц.Н. Цао // Journal of Applied Electrochemistry. – 2007. – Т. 37. – С. 753.
7. Дамаскин, Б.Б. Электрохимия / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий. – 3-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2015. – 672 с.
8. Липин, В.А. Физическая химия. Электрохимия: учебное пособие / В.А. Липин, А.И. Смирнова, Т.А. Сустанов. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 94 с.
9. Козадеров, О.А. Современные химические источники тока / О.А. Козадеров, А.В. Введенский. – СПб.: Лань, 2025. – 131 с.
10. Морачевский, А.Г. Электрохимия расплавленных солей / А.Г. Морачевский, Е.Г. Фирсова. – СПб.: Лань, 2023. – 384 с.
11. Абраменков, А.В. Практикум по физической химии: кинетика и катализ. Электрохимия / А.В. Абраменков. – М.: Академия, 2012. – 768 с.
12. Справочник по электрохимии / Р.К. Астахова, А.А. Белюстин, В.В. Беренблит и др.; под ред. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1981. – 488 с.

Reference

1. Ganiev, I.N. Effect of Nickel Additions on the Anodic Behavior of Zinc-Aluminum Alloys $Zn_{55}Al$ and $Zn_{55}Al$ in $NaCl$ Electrolyte / I.N. Ganiev, J.N. Aliev, Z.F. Narzulloev // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2019. – Vol. 92, No. 11. – P. 1420–1426.
2. Akhmedov, M.A. Electrochemical Behavior of Dimethyl Sulfone on a Platinum Electrode / M.A. Akhmedov, Sh.Sh. Khidirov, S.I. Suleymanov // Russian Journal of Electrochemistry. – 2023. – Vol. 59, No. 11. – P. 674–685. – DOI: 10.31857/S0424857023110038.

3. Aliev, D.N. Effect of Iron and Nickel Additions on the Hardness of Zn5Al and Zn55Al Alloys / D.N. Aliev, I.N. Ganiev, Z.F. Narzullov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2018. – No. 1 (41). – P. 86–92. – EDN: XSBZAL.
4. Gelman, D. Corrosion Reduction of Aluminum in Alkaline Electrolytes Containing a Hybrid Inorganic/Organic Inhibitor System for Power Sources / D. Gelman, I. Lasman, S. Elfimchev, D. Starosvetsky, Y. Ein-Eli // Journal of Power Sources. – 2015. – Vol. 285. – P. 100.
5. Chan, S. Corrosion and Anodic Behavior of Pure Aluminum in a New Alkaline Electrolyte / S. Chan, J. Wang, H. Shao, J. Wang, S. Zeng, J. Zhang, C. Cao // Acta Physico-Chimica Sinica. – 2008. – Vol. 24, No. 9. – P. 1620.
6. Wang, J.B. Corrosion and Electrochemical Behavior of Pure Aluminum in Alkaline Methanol Solutions / J.B. Wang, J.M. Wang, H.B. Shao, J.C. Zhang, C.N. Cao // Journal of Applied Electrochemistry. – 2007. – Vol. 37. – P. 753.
7. Damaskin, B.B. Electrochemistry / B.B. Damaskin, O.A. Petriy. – 3rd ed., rev. – Saint Petersburg: Lan, 2015. – 672 p.
8. Lipin, V.A. Physical Chemistry. Electrochemistry: Study Guide / V.A. Lipin, A.I. Smirnova, T.A. Sustavova. – Saint Petersburg: Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2020. – 94 p.
9. Kozaderov, O.A. Modern Chemical Power Sources / O.A. Kozaderov, A.V. Vvedensky. – Saint Petersburg: Lan, 2025. – 131 p.
10. Morachevsky, A.G. Electrochemistry of Molten Salts / A.G. Morachevsky, E.G. Firsova. – Saint Petersburg: Lan, 2023. – 384 p.
11. Abramnikov, A.V. Practical Course in Physical Chemistry: Kinetics and Catalysis. Electrochemistry / A.V. Abramnikov. – Moscow: Akademiya, 2012. – 768 p.
12. Handbook of Electrochemistry / R.K. Astakhova, A.A. Belyustin, V.V. Berenblit et al.; ed. by A.M. Sukhotin. – Leningrad: Khimiya, 1981. – 488 p.

Маълумот оид ба муаллифон:

Нарзуллоев Зубайдулло Файзуллоевич, номзади илмҳои техникаӣ, муаллими калони кафедраи нақшакашии муҳандисӣ ва компютерӣ, Донишгоҳи техникаи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5091-3578>. Email: zubaydullonarzullov6@gmail.com

Алиев Ҷамшед Насридинович, номзади илмҳои техникаӣ, дотсенти кафедраи масолахшиносӣ, мошинҳо ва таҷҳизотҳои меаллургӣ, Донишгоҳи техникаи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. ORCID: Id <https://orcid.org/0000-0001-7307-0059>. E-mail: jamshedaliyev0672@gmail.com

Ғаниев Изатулло Наврузович, доктори илмҳои химия, профессори кафедраи технологияи истеҳсоли химиявӣ, Донишгоҳи техникаи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. ORCID Id <https://orcid.org/0000-0002-2791-6508>. E-mail: ganiev48@mail.ru

Сведения об авторах:

Нарзуллоев Зубайдулло Файзуллоевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инженерной и компьютерной графики, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2434-4698>. E-mail: zubaydullonarzullov6@gmail.com

Алиев Ҷамшед Насридинович, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения, металлургические машины и оборудование, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. ORCID: Id <https://orcid.org/0000-0001-7307-0059>. E-mail: jamshedaliyev0672@gmail.com

Ғаниев Изатулло Наврузович, доктор химических наук, профессор кафедры технологии химического производства, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. ORCID Id <https://orcid.org/0000-0002-2791-6508>. E-mail: ganiev48@mail.ru

Information about the authors:

Narzulloev Zubaydullo Fayzulloevich, PhD in Engineering, Senior Lecturer, Department of Engineering and Computer Graphics, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2434-4698>. E-mail: zubaydullonarzullov6@gmail.com

Aliev Jamshed Nasridinovich, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Materials Science, Metallurgical Machines and Equipment, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. ORCID: ID <https://orcid.org/0000-0001-7307-0059>. E-mail: jamshedaliyev0672@gmail.com

Ganiev Izatullo Navruzovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of Chemical Production Technology, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. ORCID: ID <https://orcid.org/0000-0002-2791-6508>. E-mail: ganiev48@mail.ru

ТЕХНОЛОГИИ КИМИЁВӢ - ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ - CHEMICAL TECHNOLOGY

УДК: 556.3 (575.3)

DOI: 10.65599/ENG4873

ХУСУСИЯТҲОИ ГИДРОХИМИЯВИИ ОБҲОИ ЗЕРИЗАМИНИИ ТОҶИКИСТОНИ МАРКАЗӢ

Ф.И. Нажмудинова, А.С. Қодирӣ, И.М. Раҳимов

Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои рақамии Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,
ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола хусусиятҳои гидрохимиявии обҳои зеризаминии минтақаи таҳқиқшаванда баррасӣ шудаанд. Барои муайян намудани таркиби химиявии об параметрҳои физикӣ ва химиявӣ, аз ҷумла pH, ноқилияти электрикӣ (ЕС), консентратсияи катионҳои асосӣ (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) ва анионҳои асосӣ (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) таҳлил гардиданд. Натиҷаҳо нишон доданд, ки обҳои зеризаминӣ асосан ба навъи гидрохимиявии Ca-Mg-HCO_3 мансуб мебошанд. Консентратсияи нитрат ва сульфат бо меъёрҳои Созмони Ҷаҳонии Тандурустӣ (WHO) муқоиса карда шуд. Аксари намунаҳо барои истифода ҳамчун оби нӯшокӣ мувофиқ мебошанд. Манбаи асосии минерализатсияи обҳо ҳалшавии чинсҳои карбонатӣ арзёбӣ гардид. Таркиби гидрохимиявии обҳо таъсири равандҳои обу санг ва ҳалшавии минералҳои карбонатиро инъикос менамояд. Консентратсияи ионҳои асосӣ дар нуқтаҳои гуногуни интиҳоб фарқ карда, таъсири шароити геологӣ ва гидрогеологӣ минтақаи таҳқиқотро нишон медиҳад. Натиҷаҳои бадастомада барои арзёбии сифати обҳои зеризаминӣ ва муайян намудани имконияти истифодаи онҳо барои таъмини оби нӯшокӣ ва дигар мақсадҳои обтаъминкунӣ аҳамияти муҳим доранд. Онҳо метавонанд барои таҳияи тавсияҳо оид ба истифодаи оқилона, ҳифз ва идоракунии захираҳои обҳои зеризаминӣ дар минтақа истифода шаванд.

Калидвожаҳо: обҳои зеризаминӣ, гидрохимия, гидрокарбонат, нитрат, сульфат, оби нӯшокӣ, Тоҷикистон.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЦЕНТРАЛЬНОГО ТАДЖИКИСТАНА Ф.И. Нажмудинова, А.С. Кодирӣ, И.М. Раҳимов

Центр инновационного развития науки и цифровых технологий Национальной академии наук
Таджикистана, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье рассмотрены гидрохимические особенности подземных вод исследуемого района. Для оценки химического состава воды были проанализированы физико-химические показатели, включая pH, электропроводность (ЕС), концентрации основных катионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) и анионов (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-). Полученные результаты показали, что подземные воды преимущественно относятся к гидрохимическому типу Ca-Mg-HCO_3 . Концентрации нитратов и сульфатов были сопоставлены с нормативами Всемирной организации здравоохранения (WHO). Большинство исследованных проб соответствует требованиям к питьевой воде. Основным фактором формирования химического состава подземных вод является растворение карбонатных пород. Гидрохимический состав вод отражает влияние процессов взаимодействия воды с горными породами и растворения карбонатных минералов. Концентрации основных ионов различаются в разных пунктах отбора проб, что указывает на влияние геологических и гидрогеологических условий исследуемой территории. Полученные результаты имеют важное значение для оценки качества подземных вод и определения возможности их использования для питьевого водоснабжения и других целей водопользования. Они могут быть использованы для разработки рекомендаций по рациональному использованию, охране и управлению ресурсами подземных вод в регионе.

Ключевые слова: подземные воды, гидрохимия, гидрокарбонат, нитрат, сульфат, питьевая вода, Таджикистан.

HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF GROUNDWATER IN CENTRAL TAJIKISTAN F.I. Nazhmudinova, A.S. Qodiri, I.M. Rakhimov

Center for innovative development of science and digital technologies National academy of sciences of Tajikistan,
Dushanbe, Republic of Tajikistan

This study investigates the hydrochemical characteristics of groundwater in the study area. Physical and chemical parameters including pH, electrical conductivity (EC), major cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+}), and major anions (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , and NO_3^-) were analyzed to evaluate groundwater quality. The results indicate that the groundwater is predominantly of the Ca-Mg-HCO_3 hydrochemical type. Nitrate and sulfate concentrations were compared with the World Health Organization (WHO) drinking water guidelines. Most groundwater samples were found to be suitable for drinking purposes. Dissolution of carbonate minerals was identified as the main process controlling groundwater chemistry. The hydrochemical composition of the waters reflects the influence of water-rock interaction processes and the dissolution of carbonate minerals. The concentrations of major ions vary among different sampling points, indicating the influence of geological and hydrogeological conditions in the study area. The obtained results are important for assessing groundwater quality and determining the possibility of using groundwater for drinking water supply and other water-use purposes. They can be used to develop recommendations for the

rational use, protection, and management of groundwater resources in the region.

Keywords: groundwater, hydrochemistry, bicarbonate, nitrate, sulfate, drinking water, Tajikistan.

Сарсухан (Introduction)

Таркиби химиявии обҳои зеризаминӣ дар шароити зиёдшавии таъсири омилҳои табиӣ ва антропогенӣ яке аз масъалаҳои калидии амнияти экологии на танҳо Тоҷикистон, балки минтақаи Осиёи Марказӣ ба шумор меравад. Дар бисёр ноҳияҳои Тоҷикистон ифлосшавии обҳои зеризаминӣ бо моддаҳои ҳалшаванда бактерияҳо мушоҳида мешавад, ки саломатии аҳоли ва устувории экосистемаҳоро зери хатар мегузорад [4-5].

Минтақаи тадқиқот дар қисми марказии Тоҷикистон ҷойгир буда, барои омӯзиши хусусиятҳои гидрохимиявии обҳои зеризаминӣ аз нуқтаҳои гуногуни минтақа намунаҳо ҷамъоварӣ карда шуданд. Ҷойгиршавии нуқтаҳои намунагирӣ бо истифода аз харитаи моҳвораӣ ва шабакаи координатӣ муайян карда шуд. Нуқтаҳои намунагирӣ дар қисматҳои гуногуни минтақа, аз ҷумла водиҳо, доманакӯҳҳо ва маҳалҳои аҳолинишин интихоб гардиданд, то тағйирёбии фазои таркиби химиявии обҳои зеризаминӣ пурра инъикос карда шавад.

Тақсимои нисбатан якнавохти нуқтаҳо имкон медиҳад, ки хусусиятҳои гидрохимиявии минтақа бо дараҷаи баланди эътимод арзёбӣ гардида, омилҳои табиӣ ва антропогенӣ таъсиррасон ба сифати об муайян карда шаванд [6-7].

Ҷойгиршавии нуқтаҳои намунагирӣ бо истифода аз координатаҳои ҷуғрофӣ (GPS) муайян гардида, дар харитаи тадқиқотӣ нишон дода шудааст. Намунагирӣ бо мақсади омӯзиши хусусиятҳои гидрохимиявӣ ва баҳодиҳии сифати обҳои зеризаминӣ барои мақсадҳои нӯшокӣ гузаронида шуд. Ҳамаи нуқтаҳои интихобшуда манбаъҳои фаъоли обҳои зеризаминӣ буда, минтақаҳои гуногуни гидрогеологиро фаро мегиранд. Мо тадқиқотҳоро солҳои 2023-2025 ба таври қорҳои саҳроӣ ва санҷидани обҳо дар озмоишгоҳ анҷом додем. Давраҳои сурх обҳои зеризаминӣ ва давраҳои кабуд обҳои дарёҳо мебошад. Харитаи ҷойгиршавии нуқтаҳои намунагирӣ дар расми 1 оварда шудааст.

Обҳои зеризаминӣ яке аз манбаъҳои муҳими таъминоти оби нӯшокӣ ва хоҷагии халқ ба ҳисоб мераванд. Дар минтақаҳои кӯҳӣ ва нимхушки Тоҷикистон аҳамияти обҳои зеризаминӣ махсусан калон буда, онҳо барои нӯшокӣ, обёрӣ ва эҳтиёҷоти истеҳсоли васеъ истифода мешаванд. Аз ин рӯ, омӯзиши таркиби гидрохимиявӣ ва арзёбии сифати обҳои зеризаминӣ аҳамияти муҳими илмӣ ва амалӣ дорад [1, 8].

Методология (Methodology)

Таркиби химиявии обҳои зеризаминӣ вобаста ба сохтори геологӣ, таъсири ҷинсҳои кӯҳӣ, шароити гидрогеологӣ ва фаъолияти инсон ташаккул меёбад. Омӯзиши катионҳо ва анионҳои асосӣ имконият медиҳад, ки хусусиятҳои гидрохимиявии об муайян карда шуда, дараҷаи мувофиқати он барои истифодаи нӯшокӣ ва дигар мақсадҳо арзёбӣ гардад [9-11].

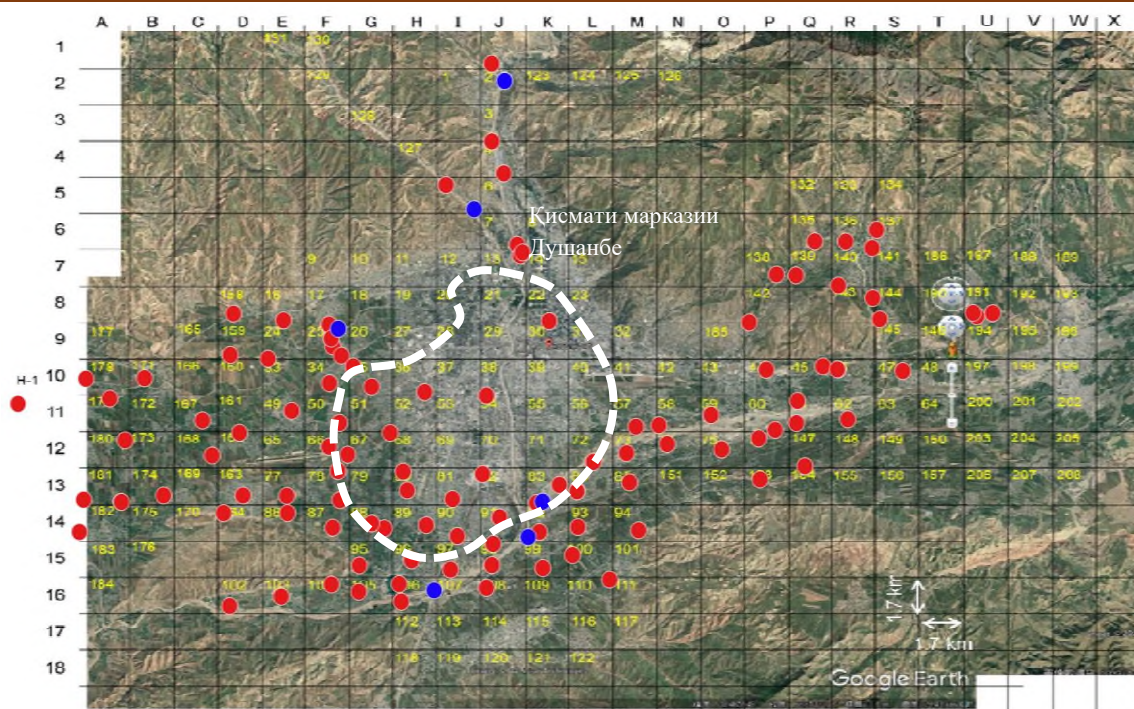
Мақсади тадқиқоти мазкур омӯзиши хусусиятҳои гидрохимиявӣ ва арзёбии сифати обҳои зеризаминии Тоҷикистонӣ Марказӣ мебошад.

Барои таҳқиқот аз 15 нуқтаи обгирӣ намунаҳо ҷамъоварӣ гардида, нишондиҳандаҳои физикӣ ва химиявии об, аз ҷумла pH, EC, Eh, катионҳо ва анионҳои асосӣ таҳлил карда шуданд. Натиҷаҳо нишон доданд, ки муҳити обҳо асосан нейтралӣ ва каме ишқорӣ буда, қимати pH дар ҳудуди 7.0–7.6 тағйир меёбад. Ионҳои асосии об калсий (Ca^{2+}) ва гидрокарбонат (HCO_3^-) мебошанд, ки ташаккули навъи гидрохимиявии Ca-HCO_3 -ро нишон медиҳанд. Дар баъзе нуқтаҳо миқдори нитрат ва сулфат баланд мушоҳида гардид, ки эҳтимолан ба таъсири фаъолияти антропогенӣ вобаста мебошад. Натиҷаҳои тадқиқот нишон медиҳанд, ки таркиби химиявии обҳои зеризаминӣ асосан зери таъсири ҳалшавии ҷинсҳои карбонатӣ ташаккул ёфтааст.

Барои муайян намудани таркиби химиявии об таҳлили катионҳо ва анионҳои асосӣ гузаронида шуд. Концентратсияи Na^+ , K^+ , Mg^{2+} ва Ca^{2+} , инчунин Cl^- , NO_3^- ва SO_4^{2-} бо усулҳои лабораторӣ муайян карда шуданд. Миқдори гидрокарбонат (HCO_3^-) аз рӯи натиҷаҳои alkalinity ҳисоб карда шуд.

Сахтии об бо формулаи зерин ҳисоб карда шуд:

$$\text{Дурушти} = (\text{Ca} \times 2.5) + (\text{Mg} \times 4.1)$$



Расми 1 – Харитаи ҷойгиршави нуқтаҳои намунагирии обҳои зерзаминӣ дар минтақаи тадқиқот
 Figure 1 – Map showing the locations of groundwater sampling points in the study area

Ҳамчунин миқдори гази карбонати озод аз рӯи консентратсияи HCO_3^- муайян карда шуд.

Натиҷаҳои таҳлил нишон доданд, ки қимати рН дар намунаҳои об аз 7.0 то 7.6 тағйир ёфта, муҳити обҳоро ҳамчун нейтралӣ ва каме ишқорӣ тавсиф менамояд. Ин нишон медиҳад, ки обҳои зерзаминӣ асосан барои истифодаи нӯшоқӣ мувофиқ мебошанд.

Таркиби катионҳо- Натиҷаҳои таҳлил нишон доданд, ки калсий (Ca^{2+}) дар аксари намунаҳои иони бартаридошта мебошад. Консентратсияи калсий аз 39.8 то 114.6 mg/L тағйир ёфт. Миқдори нисбатан баланди калсий ба ҳалшавии ҷинсҳои карбонатӣ вобаста мебошад.

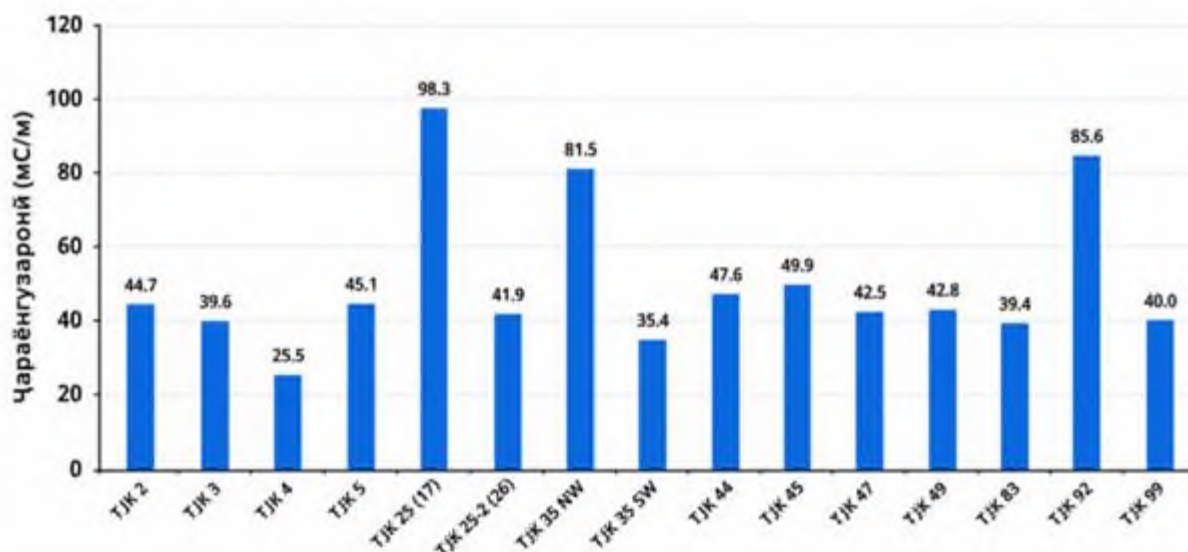
Дар табиат калсий ба таври ҳолис дида намешавад, аммо як қисми маҷмуи пайвастагӣҳо мебошад. Масалан, дар таркиби гач, флюорит ё оҳаксанг ба таври баръало дида мешавад. Асосан калсий ҳангоми аз силикатҳои ҷинсҳои гуногун ва ҷинсҳои таҳшиншуда, инчунин бо партовҳои корхонаҳои саноатӣ ва кишоварзӣ шуста шуданаш ба обҳо дохил мешавад. Миқдори зиёди калсий дар об яке аз нишонаҳои дуруштии об ба ҳисоб меравад. Сарфи назар аз манфиатҳои он ва ҳатто эҳтиёҷ ба кори бадани мо, хӯрдани об бо калсий таъми онро бадтар мекунад ва метавонад боиси мушкилоти саломатӣ гардад [2].

Аз расми 2 дида мешавад, ки қимати ҷараёнгузаронӣ (EC) дар намунаҳо аз 25.5 то 98.3 mS/m тағйир ёфт. Қимати баландтари EC дар нуқтаҳои TJK 25 ва TJK 92 мушоҳида гардид, ки ба зиёд будани минерализатсия ва миқдори ионҳои ҳалшуда вобаста мебошад.

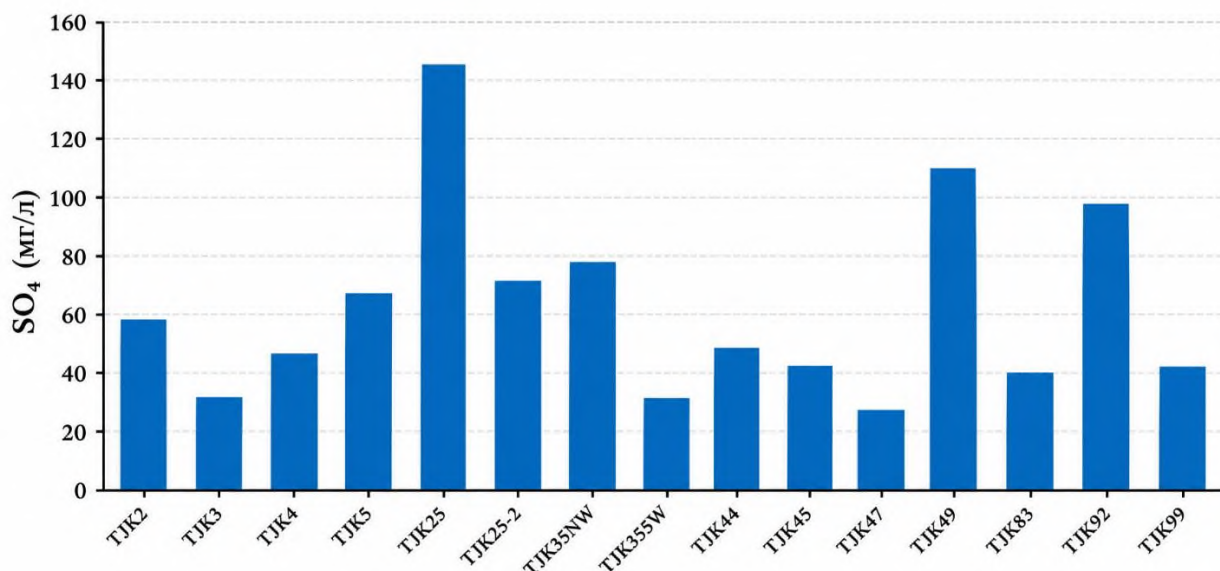
Қиматҳои Eh дар ҳудуди 347–517 mV ҷойгир буда, дар аксари намунаҳо шароити оксидшавӣ мушоҳида гардид.

Миқдори магний (Mg^{2+}) аз 9.1 то 50.8 mg/L ва натрий (Na^+) аз 7.9 то 121.8 mg/L тағйир ёфт. Дар баъзе нуқтаҳо миқдори натрий нисбатан баланд мушоҳида гардид, ки метавонад ба таъсири равандҳои геохимиявӣ вобаста бошад.

Таркиби анионҳо- Дар байни анионҳо гидрокарбонат (HCO_3^-) бартарӣ дошта, консентратсияи он аз 213 то 555 mg/L тағйир ёфт. Ин нишон медиҳад, ки обҳои зерзаминӣ асосан ба навъи гидрохимиявии Ca– HCO_3 мансуб мебошанд.



Расми 2 – Тағйирёбии чараёнгузаронӣ об дар ҳамаи нуқтаҳои минтақа
Figure 2 – Variation in water electroconductivity at all points in the region

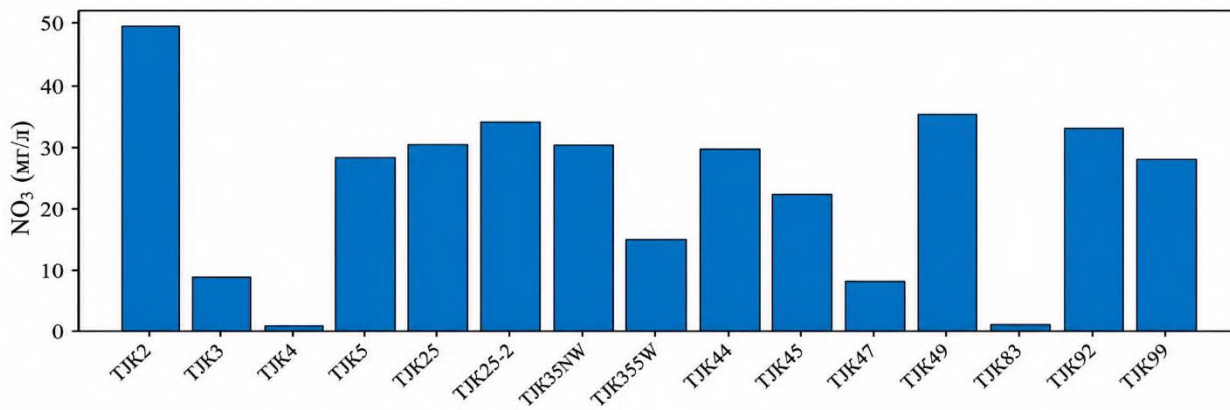


Расми 3 – Тағйирёбии консентратсияи сулфати об дар нуқтаҳои минтақа
Figure 3 – Variation in water sulfate concentration at points within the area

Консентратсияи сулфат (SO_4^{2-}) аз 27.0 то 147.3 mg/L ва хлорид (Cl^-) аз 6.8 то 24.2 mg/L тағйир ёфт. Гарчанде дар баъзе нуқтаҳо миқдори сулфат баланд мушоҳида гардид, вале он аз меъёрҳои иҷозатшавандаи оби нӯшокӣ зиёд нест. Ҳамаи намунаҳо аз меъёри тавсияшудаи Созмони ҷаҳонӣ тандурустӣ (WHO) [15] барои оби нӯшокӣ (250 mg/L) паст мебошанд ва барои истифодаи нӯшокӣ мувофиқанд. Тағйирёбии консентратсияи сулфат дар расми 3 нишон дода шудааст.

Нитрат ва арзёбии сифати об- Консентратсияи нитрат (NO_3^-) дар намунаҳо аз 0.6 то 49.9 mg/L тағйир ёфт. Қимати баландтарин дар нуқтаи TJK 2 мушоҳида гардид. Гарчанде миқдори нитрат аз ҳадди иҷозатшавандаи Созмони ҷаҳонӣ тандурустӣ зиёд нест, вале дар баъзе нуқтаҳо ба меъёри ниҳой наздик мебошад.

Баландшавии нитрат метавонад ба фаъолияти антропогенӣ, аз ҷумла истифодаи нуриҳои минералӣ ва таъсири обҳои маишӣ вобаста бошад (расми 4).

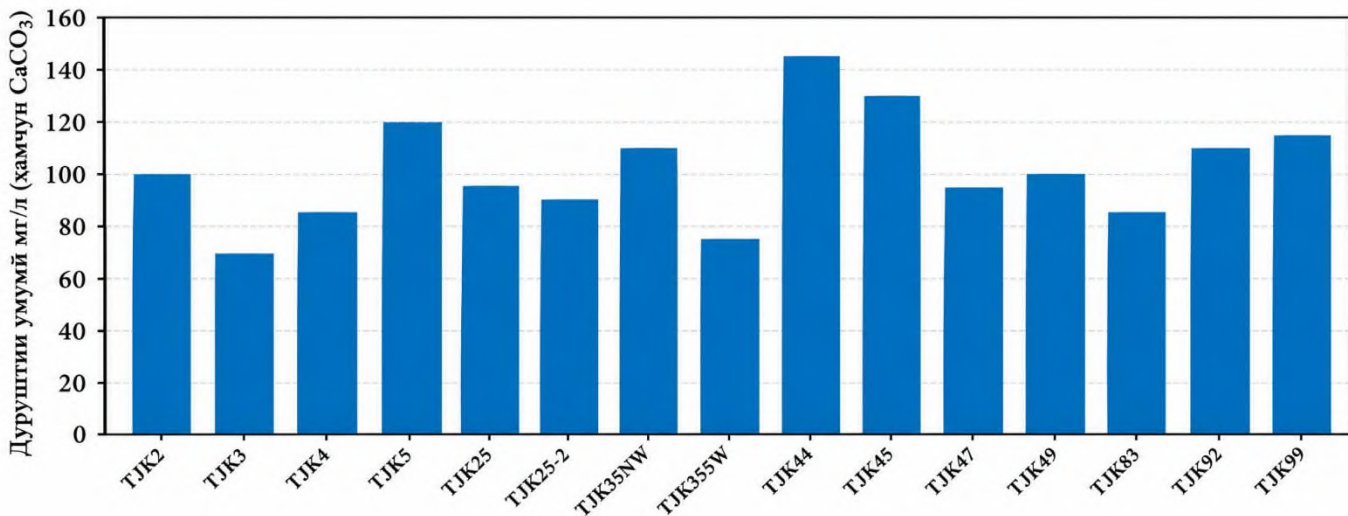


Расми 4 – Тағйирёбии консентратсияи нитрат дар намунаҳо
Figure 4 – Change in nitrate concentration in the samples

Натиҷаҳо (Results)

Натиҷаҳои таҳлили дуруштии об ва ишқорӣ (alkalinity) нишон доданд, ки дараҷаи он аз 176 то 420 mg/L бо дарназардошти CaCO_3 тағйир ёфт. Дуруштии нисбатан баланд аз ғилзати зиёди калсий ва магний вобаста мебошад [14].

Миқдори баланди гидрокарбонат инчунин нишон медиҳад, ки ишқорнокии обҳо нисбатан баланд буда, қобилияти буферии онҳо хуб мебошад (расми 5).

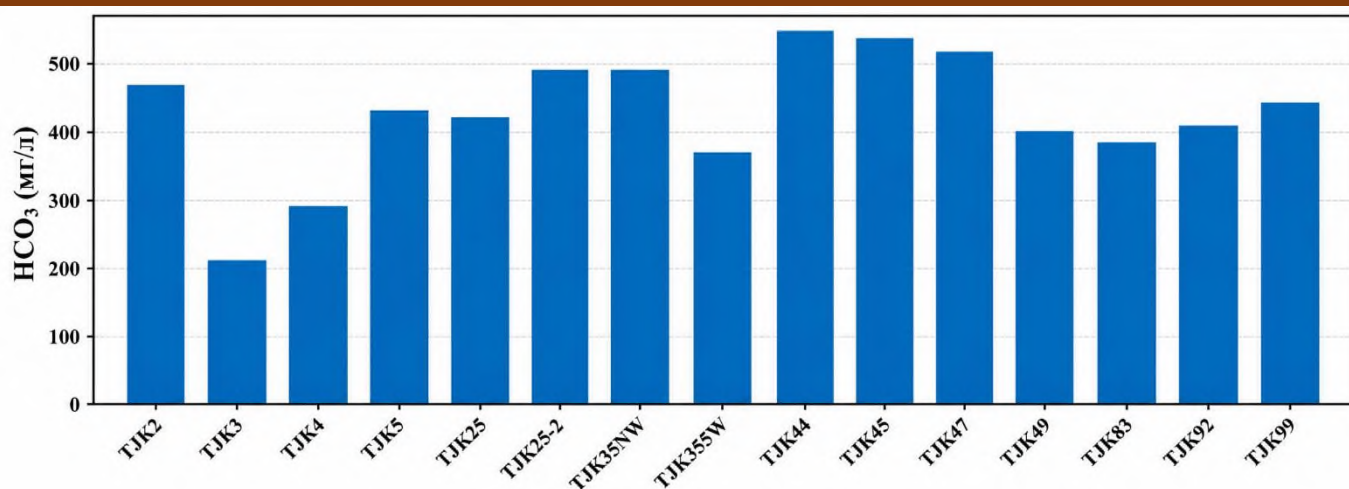


Расми 5 – Консентратсияи дуруштии об дар намунаҳо
Figure 5 – Water hardness concentration in the samples

Дар асоси натиҷаҳои бадастомада обҳои зеризаминӣ асосан ба навъи гидрохимиявии Ca-HCO_3 мансуб мебошанд. Ин ҳолат нишон медиҳад, ки таркиби химиявии обҳо асосан зери таъсири ҳалшавии чинсҳои карбонатӣ ташаккул ёфтааст.

Сахтии умумии об аз 176 то 420 mg/L ҳамчун CaCO_3 тағйир меёбад [12-13]. Қимати баландтарин дар нуқтаи TJK 44 ва пасттарин дар нуқтаи TJK 3 мушоҳида гардид. Сахтии баланд бо зиёд будани консентратсияи калсий ва магний алоқаманд мебошад. Аксари намунаҳо ба гурӯҳи обҳои саҳт ва хеле саҳт дохил мешаванд. Аксари намунаҳо ба гурӯҳи обҳои саҳт ва хеле саҳт дохил мешаванд, ки ба консентратсияи баланди Ca^{2+} ва Mg^{2+} вобаста аст.

Муносибати мусбат байни ЕС ва HCO_3^- инчунин нишон медиҳад, ки баландшавии минерализатсия бештар бо зиёдшавии гидрокарбонат алоқаманд мебошад (расми 6).



Расми 6 – Концентрация гидрокарбонат дар намунаҳо

Figure 6 – Bicarbonate concentration in the samples

Аз расми 6 дида мешавад, ки концентрация гидрокарбонат (HCO_3^-) дар намунаҳои оби зеризаминӣ аз 213 то 555 mg/L тағйир меёбад. Қимати баландтарин дар нуқтаи TJK 44 (555 mg/L) ва пасттарин дар нуқтаи TJK 3 (213 mg/L) мушоҳида гардид. Бартарии гидрокарбонат нишон медиҳад, ки таркиби химиявии об асосан таҳти таъсири ҳалшавии минералҳои карбонатӣ қарор дорад.

Дар байни катионҳо калсий (Ca^{2+}) ва магний (Mg^{2+}) мавқеи асосиро ишғол намуда, концентрацияи онҳо мутаносибан аз 39.8–114.6 mg/L ва 9.1–50.8 mg/L мебошад. Концентрацияи натрий (Na^+) дар баъзе нуқтаҳо то 121.8 mg/L мерасад, дар ҳоле ки калий (K^+) дар ҳамаи намунаҳо миқдори нисбатан паст дорад.

Дар байни анионҳо гидрокарбонат (HCO_3^-) иони бартаришода буда, концентрацияи он аз 213 то 555 mg/L тағйир меёбад. Концентрацияи сулфат (SO_4^{2-}) аз 27.0 то 147.3 mg/L ва нитрат (NO_3^-) аз 0.6 то 49.9 mg/L мебошад. Миқдори хлорид (Cl^-) дар ҳамаи намунаҳо нисбатан паст буда, аз 6.8 то 24.2 mg/L тағйир меёбад.

Натиҷаҳои бадастомада нишон медиҳанд, ки обҳои зеризаминии минтақа асосан ба навъи гидрохимиявии Ca-Mg-HCO_3 тааллуқ доранд. Афзалияти гидрокарбонат, калсий ва магний ба таъсири ҳалшавии чинсҳои карбонатӣ дар минтақа вобаста мебошад.

Дар асоси таҳлили ҷадвали 1 қиматҳои миёнаи хосиятҳои физикӣ-химиявии намунаҳои обҳои зеризаминӣ минтақа дар ҳудуди иҷозави меҳобанд. Натиҷаҳои таҳлили физикӣ-химиявии намунаҳои обҳои зеризаминии минтақаи тадқиқотро нишон медиҳад. (ниг. ба ҷадвали 1) Арзишҳои pH аз 7.0 то 7.6 тағйир ёфта, муҳити обҳоро ҳамчун нейтралӣ ва каме ишқорӣ тавсиф менамоянд. Нишондиҳандаи ноқилияти электрикӣ (EC) аз 25.5 то 98.3 mS/m тағйир ёфта, аз дараҷаи минерализатсияи обҳо шаҳодат медиҳад.

Ҷадвали 1 – Нишондиҳандаҳои миёнаи хосиятҳои физикӣ-химиявии намунаҳои обҳои зеризаминии минтақаи тадқиқот

Table 1 – Average values of physicochemical properties of groundwater samples from the study area

Параметр	Ҳади ақал	Максимум	Миёна
pH	7.0	7.6	420
EC (mS/m)	25.5	98.3	~50
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	213	555	~427
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.6	49.9	~23
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	27.0	147.3	~63
Дурушти (mg/L ҳамчун CaCO ₃)	176	420 420	~300

Хулоса (Conclusion)

Тадқиқоти гузаронидашуда нишон дод, ки обҳои зеризаминии Тоҷикистонӣ Марказӣ асосан муҳити нейтралӣ ва каме ишқорӣ доранд. Дар таркиби гидрохимиявии онҳо ионҳои калсий ва гидрокарбонат бартарӣ дошта, аксари намунаҳо ба навъи Ca-HCO_3 мансуб мебошанд.

Таркиби химиявии обҳо асосан зери таъсири ҳалшавии чинсҳои карбонатӣ ташаккул ёфтааст. Дар баъзе нуктаҳо баландшавии нитрат ва сулфат мушоҳида гардид, вале концентратсияи онҳо аз меъёрҳои иҷозатшавандаи оби нӯшокӣ зиёд нест.

Натиҷаҳои тадқиқот нишон медиҳанд, ки аксари обҳои зеризаминӣ барои истифодаи нӯшокӣ ва ҳоҷагӣ мувофиқ мебошанд. Ҳамаи намунаҳо аз рӯи концентратсияи меъёрҳои тавсияшуда қарор доранд.

Муқаррир: Абдуллоҳова Т.Н. - н.и.т., қотиби илмӣ Маркази рушди инноватсионӣ илм ва технологияҳои рақамӣ Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон.

Адабиёт

1. Кодиров, А.С. Внедрение бассейнового принципа управления водными ресурсами на речных системах для рационального водопользования / А.С. Кодиров // Известия вузов. – 2015. – № 2. – С. 27–31.
2. Қодиров, А.С. Ташаккули таркиби химиявии обҳои зеризаминӣ ва технологияи безаргардонӣ тавассути коагулянтҳо / А.С. Қодиров, У.О. Толибзода, Ф.И. Нажмудинова, Ф.И. Шаймурадов, И.М. Раҳимов // Паёми политехникӣ. – 2025. – № 4 (72). – С. 66–73.
3. Короновский, Н.В. Основы геологии [Электронный ресурс] / Н.В. Короновский, А.Ф. Якушова. – Режим доступа: <https://geo.web.ru/>. – Дата обращения: 23.07.2026.
4. Крат, В.Н. Минеральные лечебные, термальные и промышленные подземные воды Таджикистана: монография / В.Н. Крат. – Душанбе: Дониш, 1985. – 144 с.
5. Максимович, Г.А. Химическая география вод суши: монография / Г.А. Максимович. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 329 с.
6. Особенности формирования химического состава подземных вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://escjournal.spbu.ru/>. – Дата обращения: 23.07.2026.
7. Разыков, Б.Х. Экономическая оценка и промышленное использование минеральных вод Таджикистана: монография / Б.Х. Разыков. – Душанбе: Дониш, 2007. – 88 с.
8. Состав подземных вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/>. – Дата обращения: 23.07.2026.
9. Физические свойства и химический состав подземных вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/>. – Дата обращения: 23.07.2026.
10. Химический состав подземных вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ros-pipe.ru/>. – Дата обращения: 23.07.2026.
11. Appelo, C.A.J. Geochemistry, Groundwater and Pollution / C.A.J. Appelo, D. Postma. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 649 p.
12. Freeze, R.A. Groundwater / R.A. Freeze, J.A. Cherry. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979. – 604 p.
13. Hem, J.D. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. – 3rd ed. – Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1985. – 263 p.
14. Todd, D.K. Groundwater Hydrology / D.K. Todd, L.W. Mays. – 3rd ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. – 636 p.
15. World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality. – Geneva: World Health Organization, 2022. – 541 p.

References

1. Kodirov, A.S. Implementation of the Basin Principle of Water Resources Management in River Systems for Rational Water Use / A.S. Kodirov // Proceedings of Higher Educational Institutions. – 2015. – No. 2. – P. 27–31.
2. Qodirov, A.S. Formation of the Chemical Composition of Groundwater and Disinfection Technology Using Coagulants / A.S. Qodirov, U.O. Tolibzoda, F.I. Najmudinova, F.I. Shaymurodov, I.M. Rahimov // Polytechnic Bulletin. – 2025. – No. 4 (72). – P. 66–73.
3. Koronovskiy, N.V. Fundamentals of Geology [Electronic resource] / N.V. Koronovskiy, A.F. Yakushova. – Available at: <https://geo.web.ru/>. – Accessed: 23.07.2026.
4. Krat, V.N. Mineral Medicinal, Thermal and Industrial Groundwater of Tajikistan: Monograph / V.N. Krat. – Dushanbe: Donish, 1985. – 144 p.
5. Maksimovich, G.A. Chemical Geography of Inland Waters: Monograph / G.A. Maksimovich. – Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1955. – 329 p.
6. Features of the Formation of the Chemical Composition of Groundwater [Electronic resource]. – Available at: <https://escjournal.spbu.ru/>. – Accessed: 23.07.2026.
7. Razykov, B.Kh. Economic Assessment and Industrial Use of Mineral Waters of Tajikistan: Monograph / B.Kh. Razykov. – Dushanbe: Donish, 2007. – 88 p.
8. Groundwater Composition [Electronic resource]. – Available at: <https://studfile.net/>. – Accessed: 23.07.2026.

9. Physical Properties and Chemical Composition of Groundwater [Electronic resource]. – Available at: <https://studfile.net/>. – Accessed: 23.07.2026.
10. Chemical Composition of Groundwater [Electronic resource]. – Available at: <https://ros-pipe.ru/>. – Accessed: 23.07.2026.
11. Appelo, C.A.J. Geochemistry, Groundwater and Pollution / C.A.J. Appelo, D. Postma. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 649 p.
12. Freeze, R.A. Groundwater / R.A. Freeze, J.A. Cherry. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979. – 604 p.
13. Hem, J.D. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. – 3rd ed. – Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1985. – 263 p.
14. Todd, D.K. Groundwater Hydrology / D.K. Todd, L.W. Mays. – 3rd ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. – 636 p.
15. World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality. – Geneva: World Health Organization, 2022. – 541 p.

Маълумот оид ба муаллифон:

Нажмудинова Фарзона Исматуллоевна, ходими калони илмӣи Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои рақамии АМИТ. E-mail: ismatullozoda.fn@gmail.com

Қодирий Анвар Саид, доктори илмҳои техникӣ, Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои рақамии АМИТ. E-mail: as.kodirov@gmail.com

Раҳимов Илҳомиддин Мирзоевич, номзади илмҳои техникӣ, Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои рақамии АМИТ. E-mail: rahimzod74@mail.ru

Сведения об авторах:

Нажмудинова Фарзона Исматуллоевна, старший научный сотрудник Центра инновационного развития науки и цифровых технологий НАНТ. E-mail: ismatullozoda.fn@gmail.com

Қодири Анвар Саид, доктор технических наук, Центр инновационного развития науки и цифровых технологий НАНТ. E-mail: as.kodirov@gmail.com

Рахимов Илҳомиддин Мирзоевич, кандидат технических наук, Центр инновационного развития науки и цифровых технологий НАНТ. E-mail: rahimzod74@mail.ru

Information about the authors:

Nazhmudinova Farzona Ismatulloevna, Senior Researcher, Center for Innovative Science and Digital Technologies, NAST. E-mail: ismatullozoda.fn@gmail.com

Qodiri Anvar Said, Doctor of Technical Sciences, Center for Innovative Science and Digital Technologies, NAST. E-mail: as.kodirov@gmail.com

Rakhimov Ilkhomiddin Mirzoevich, Candidate of Technical Sciences, Center for Innovative Science and Digital Technologies, NAST. E-mail: rahimzod74@mail.ru

НАҚЛИЁТ - ТРАНСПОРТ - TRANSPORT

УДК: 656.13:504.06:62-192(23)

DOI: 10.65599/ENG9166

КОМПЛЕКСНАЯ КОНЦЕПЦИЯ БЕЗОПАСНОСТИ, НАДЁЖНОСТИ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Абдулло Мамадамон

Таджикский технический университет имени академик М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Безопасность, механическая надёжность и экологическая эффективность автомобильного транспорта в горных условиях традиционно изучаются как обособленные проблемы с разрозненной нормативной базой. По мере масштабной электрификации парка такое разделение теряет научную состоятельность, поскольку единый физический механизм (степень истощения ёмкости накопителя при рекуперативном торможении) одновременно определяет тепловую нагруженность фрикционных механизмов, надёжность узлов и уровень неотработавшей эмиссии частиц. В исследовании синтезированы четыре взаимосвязанных направления в рамках единой концепции, где критическая длина истощения рекуперации выступает междисциплинарным системообразующим параметром. На основе официальной статистики ДТП в Республике Таджикистан за 2016–2025 гг., фиксирующей рост смертности, на 50,6 % при стабильном числе аварий, а также натурных испытаний 117 шин, строго доказано, что для груженого грузового автомобиля ёмкость батареи истощается через 6,9–13,8 км затяжного спуска. После истощения рекуперации вся тормозная нагрузка переходит на фрикционные механизмы, нерассчитанные на столь интенсивную работу. Установленный пороговый критерий напрямую определяет соотношение неотработавшей эмиссии электромобилей с выбросами ДВС. Предложенная инвариантная модель продольной динамики позволяет научно обосновать оптимальное проектирование и размещение зарядной инфраструктуры по минимуму профиля уровня заряда.

Ключевые слова: горный автомобильный транспорт; безопасность эксплуатации; надёжность; эмиссия по полному циклу; рекуперативное торможение; электромобиль; зарядная инфраструктура; Республика Таджикистан.

КОНЦЕПСИЯ КОМПЛЕКСИИ БЕХАТАРӢ, ЭЪТИМОДНОКӢ ВА ҲИФЗИ МУҲИТИ ЗИСТ ДАР ИСТИФОДАБАРИИ НАҚЛИЁТИ АВТОМОБИЛӢ ДАР ШАРОИТИ КӢҲИСТОН

Абдулло Мамадамон

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Бехатарӣ, эътимоднокии механикӣ ва самаранокии экологии нақлиёти автомобилӣ дар шароити кӯҳӣ одатан ҳамчун масъалаҳои алоҳида дар асоси меъёрҳои гуногун омӯхта мешаванд. Бо барққунонии васеи парки нақлиётӣ чунин тақсимшавӣ пояи илмиро гум мекунад, зеро як механизми физикӣ, яъне дараҷаи пур шудани нигоҳдоранда ҳангоми боздории рекуперативӣ, ҳамзамон сарбориҳои гармии боздории фриксионӣ, эътимоднокии қисмҳо ва сатҳи партовҳои ғайрифазоли (non-exhaust) зарраҳоро муайян мекунад. Дар тадқиқот ҷаҳор самти ҳамбаста дар доираи як мафҳуми ягона муттаҳид шудаанд, ки дар он масофаи критикӣ тамомшавии рекуператсия ҳамчун параметри системасозӣ байнисоҳавӣ баромад мекунад. Дар асоси омили расмии садамаҳои нақлиётӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон барои солҳои 2016–2025, ки афзоиши фавти одамонро ба андозаи 50,6 % ҳангоми устувор мондани шумораи садамаҳо собит мекунад, ва тадқиқотҳои табиӣ 117 шина исбот карда шуд, ки барои воситаи нақлиёти боркаши сангинвазн батарея пас аз 6,9–13,8 км фуруд омадан иқтидори қабули зарядро гум мекунад. Пас аз он, тамоми сарбории боздорӣ ба механизмҳои фриксионӣ мегузарад. Ҳамин меъёр таносуби партовҳои ғайрифазоли автомобилҳои барқиро бо партовҳои муҳаррики дарунсӯз муайян мекунад. Модели пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки ҷойгиркунии инфрасохтори заряддихӣ аз рӯи ҳадди ақали профили сатҳи заряд ба таври илмӣ асоснок карда шавад.

Калидвожаҳо: воситаҳои нақлиёти кӯҳӣ; беҳатарии амалиётӣ; эътимоднокиӣ; партовҳои даври пурра; боздории рекуперативӣ; воситаи нақлиёти барқӣ; инфрасохтори заряддихӣ; Ҷумҳурии Тоҷикистон.

INTEGRATED SAFETY, RELIABILITY AND ENVIRONMENTAL FRAMEWORK FOR ROAD TRANSPORT OPERATION IN MOUNTAIN TERRAIN

Abdullo Mamadamon

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

Safety, mechanical reliability, and environmental efficiency of road transport in mountainous conditions are traditionally studied as isolated problems with separate regulatory frameworks. With the large-scale electrification of the vehicle fleet, this division loses its scientific validity because a single physical mechanism—the degree of energy storage saturation during regenerative braking—simultaneously determines the thermal load of friction brakes, component reliability, and non-exhaust particulate emissions. This study synthesizes four interrelated directions within a unified concept, where the critical length of regeneration exhaustion serves as an interdisciplinary cross-cutting parameter. Based on official traffic accident statistics in the Republic of Tajikistan for 2016–2025, recording a 50.6% increase in fatalities alongside stable accident rates, as well as field tests on 117 tires, it is strictly proven that for a loaded heavy truck, battery capacity is exhausted after 6.9–13.8 km of a descent.

Once regeneration ceases, the entire braking load shifts to friction mechanisms not designed for such continuous stress. This threshold directly determines the ratio of non-exhaust emissions from electric vehicles to internal combustion engine emissions. The proposed invariant longitudinal dynamics model enables the scientific optimization and placement of charging infrastructure based on the minimum charge level profile.

Keywords: mountain road transport; operational safety; reliability; well-to-wheel emissions; regenerative braking; electric vehicle; charging infrastructure; Republic of Tajikistan.

1. Введение (Introduction)

1.1. Проблема: горные регионы, растущие автопарки, безопасность движения

Более 93 % территории Республики Таджикистан занимают горные районы, и на долю автомобильного транспорта приходится свыше 90 % объема грузовых и пассажирских перевозок в стране, что делает его не просто экономически предпочтительным, но и на большинстве маршрутов единственным технически доступным видом транспорта [24]. Официальные данные о ДТП за 2016–2025 гг. [2–12] показывают тенденцию, которую легко упустить из виду в совокупных статистических данных, но которая имеет решающее значение для рассматриваемой проблемы: в то время как автопарк вырос на 84 %, а количество зарегистрированных ДТП увеличилось лишь на 1,3 %, число погибших выросло на 50,6 %, а доля погибших на сто ДТП возросла с 32,2 в 2016 году до 47,9 в 2025 году. В разбивке по типам ДТП столкновения и опрокидывания — две категории, наиболее непосредственно связанные с движением в горных условиях и характерные, соответственно, для лобовых столкновений вследствие отказа тормозной системы на спуске и для поворотов с малым радиусом и незащищенных краев дороги составляют 47–56 % всех смертельных случаев за весь период, при этом летальность при столкновениях выросла с 33 % до 53 %, а при опрокидываниях, с 56 % до 69 %. Эта тенденция не объясняется факторами поведения водителей, которые, как можно было бы ожидать, привели бы к увеличению частоты ДТП, а не их тяжести; напротив, она указывает на рост доли ДТП с высокой энергией столкновения, что согласуется с использованием более тяжелого и мощного автопарка на неизменной горной инфраструктуре.

1.2. Электрификация меняет физику, а не географию

Программа развития электромобильного транспорта Правительства Республики Таджикистан на 2023–2028 годы [25] нацелена на значительное расширение зарядной инфраструктуры, что отчасти обусловлено преобладанием гидроэнергетики в стране, благодаря чему Таджикистан входит в число немногих государств, где электрификация транспортных средств может обеспечить реальное, а не просто перенесенное сокращение выбросов на протяжении всего жизненного цикла [1]. Однако электрификация не упрощает проблему безопасности в горных условиях; она изменяет её физический характер. Тяговый двигатель электромобиля на аккумуляторном питании по сути нечувствителен к потерям мощности, зависящим от высоты над уровнем моря, которые исторически как создавали трудности, так и косвенно предупреждали водителей автомобилей с двигателями внутреннего сгорания [15]. Торможение на спуске может до момента насыщения аккумулятора быть рекуперативным, а не диссипативным (но только до этого момента); после чего электромобиль оказывается в худшем положении, чем автомобиль с ДВС, который он заменяет, поскольку он не сохраняет ни торможения двигателем, ни неизменной тормозной способности, а все замедление сразу переходит на механизмы трения, которые не были рассчитаны на работу при полном спуске [20].

1.3. Почему безопасность, надёжность и экология здесь должны рассматриваться как одна проблема

В существующей литературе вопросы безопасности торможения [20–23; 32; 36], надежности компонентов [14; 17; 28; 35] и экологических характеристик [1; 18; 19; 27; 29] рассматриваются в основном независимо друг от друга, причем каждая из этих областей опирается на собственную специализацию и нормативную традицию. Основной тезис данной статьи заключается в том, что именно в случае электрифицированного горного транспорта такое разделение больше не является обоснованным, поскольку одна физическая величина, критическое расстояние рекуперации-разряда L_{χ} , то есть длина спуска, на протяжении которой накопительное устройство сохраняет способность принимать заряд, полученный в процессе рекуперации, одновременно определяет: (а) остается ли система фрикционных тормозов в пределах своего теплового рабочего диапазона

(безопасность); (b) рабочий цикл и, как следствие, износ фрикционных элементов и шин (надёжность); и (c) является ли выброс твердых частиц при торможении трением на спуске ниже или выше, чем выхлопные выбросы автомобиля с ДВС, который он заменяет (экология). Поэтому исследовательская программа, построенная на двух направлениях — безопасности эксплуатации транспортных средств и технической экологии, может быть обоснованно обобщена только на основе этого общего параметра, и именно такое обобщение является вкладом настоящей статьи.

2. Материалы и методы (*Materials and methods*)

Данный синтез опирается на четыре методологически различных, но взаимосвязанных компонента, каждый из которых был разработан независимо и в данном случае интегрирован.

Безопасность. Модель продольной динамики, не зависящая от трансмиссии [30], вычисляет вектор показателей безопасности, температуру фрикционных накладок, запас замедления, запас тормозного пути, остаточное расстояние рекуперации L_x и коэффициент загрузки фрикционных тормозов K_3 — как функции расстояния вдоль маршрута, проверенные на 64-километровом горном маршруте Кулоб — Шамсиддин Шохин – Шохон (Хатлонская область) путем проверки внутренней согласованности энергетического баланса и симметрии при движении в прямом и обратном направлениях, а также уточнена с использованием профиля высот из 89 точек, полученного в ходе полевых измерений, который выявляет местные уклоны до 22,8 %, незаметные при использовании грубых трёхточечных представлений маршрута.

Надёжность. В ходе полевых исследований шин, проведённых в 2015–2018 гг. на трассе РБ07 (М41–А372) «Вахдат — Рашт — Джиргатал» и в карьерах зоны строительства Рогунской ГЭС, были зарегистрированы пирометрические и тепловизионные измерения на 117 контрольных шинах (размер 10.00R20), установленных на автопарке цементовозов [14; 17; 28]. Критериальная зависимость теплопередачи $Nu = C \cdot Re^{m \cdot Pr^n}$, ранее проверенная для ребер головки блока цилиндров ДВС с воздушным охлаждением [16; 26], переносится на систему терморегулирования тяговой батареи на том основании, что определяющий физический механизм (конвективная теплопередача от нагретой поверхности к разреженному воздушному потоку) не зависит от источника тепла.

Окружающая среда. Методология расчета углеродного следа «от скважины до колеса» $(WtW)^1$ [31; 33] сочетает данные об интенсивности выбросов в национальной энергосистеме, отражающие преобладание гидроэнергетики в Таджикистане при сезонных колебаниях выработки электроэнергии, с той же моделью рекуперации для расчета баланса выбросов, не связанных с выхлопными газами, по сравнению с выхлопными выбросами в зависимости от L_x относительно длины спуска.

Инфраструктура. Профиль уровня заряда $\sigma(s)$, рассчитанный с помощью модели безопасности, напрямую используется для вывода физически обоснованного критерия размещения зарядных станций, а концепция мобильной зарядной станции, питающейся от энергии рекуперативного торможения тяжелых транспортных средств, оценивается в сравнении с альтернативой в виде стационарной инфраструктуры.

3. Результаты (*Results*)

3.1. Безопасность: критическая длина спуска и нагрузка на фрикционные тормоза

Для загруженного тяжелого транспортного средства, начинающего спуск с высоким начальным уровнем заряда ($\sigma_0 = 0,90$), резерв рекуперации исчерпывается через 13,8 км на уклоне 7 %, а при $\sigma_0 = 0,95$ — через 6,9 км. После этого момента коэффициент загрузки тормозов трения K_3 — который для автомобиля с ДВС определяется исключительно профилем трассы и скоростью резко возрастает, поскольку электродвигатель электроавтомобиля больше не может принимать заряд, и все замедление переходит на счет механизмов трения (χ — доля отрицательной механической мощности, которая может быть возвращена в накопитель, стремится к нулю). В таблице 1 обобщен практически решающий вывод: электротранспортное средство, исчерпавшее возможности рекуперации в середине спуска, в этот момент находится в худшем положении с точки зрения

¹ Well-to-Tank (WTT) — «От скважины до бака»: включает всё, что происходит с топливом до его заправки в автомобиль. Это добыча сырья (нефти, газа), транспортировка, переработка в бензин или выработка электричества на ТЭЦ и передача его по сетям до зарядной станции

торможения, чем автомобиль с ДВС, который оно заменяет, поскольку оно не располагает ни торможением двигателем, ни системой трения, рассчитанной на работу на протяжении всего спуска.

Таблица 1 – Последствия истощения ресурса рекуперации при работе с фрикционными тормозами
Table 1 – Consequences of Exhausting Regenerative Capacity When Operating Friction Brakes

Состояние	Автомобиль с ДВС	Электромобиль $\chi > 0$	Электромобиль $(\chi \rightarrow 0)$
Источник торможения	Трение + торможение двигателем	Регенеративное (преобладающее) + трение	Только трение
Поведение K_z	Фиксированное в зависимости от профиля/скорости	Подавленное, близкое к нулю	Увеличивается до уровня, эквивалентного ДВС, или выше
Сравнительное положение	Базовый уровень	Благоприятное	Хуже, чем в базовом режиме — отсутствует резервное торможение двигателем

Это напрямую обосновывает необходимость недорогого правила эксплуатации: уровень заряда должен быть намеренно ограничен до начала известного длительного спуска ($L_{descent}$) так, чтобы условие $L_\chi \geq L_{descent}$ выполнялось на протяжении всего спуска, правило, не требующее изменений в оборудовании и реализуемое с помощью существующей логики системы управления батареями, использующей информацию о профиле маршрута от бортовой навигационной системы.

3.2. Надежность: общий тепловой механизм для системы ДВС и аккумуляторной системы

По результатам полевых измерений, проведенных на 117 шинах для большегрузных автомобилей, было установлено, что средний ресурс до выхода из строя составил примерно 23 000 км при заводском нормативе в 60 000 км (38 %), причём более 80 % отказов были механическими, а не связанными с износом, и приходилось (≈ 80 %) на осенне-зимний сезон, когда сокращение продолжительности светового дня и обнажившиеся после дождя острые камни дорожного полотна сочетаются с превышением нормы полной массы транспортного средства. Прямые пирометрические и тепловизионные измерения зафиксировали среднюю температуру поверхности шины, превышающую температуру окружающего воздуха на 13,4 °C (52,4 °C против 39,0 °C окружающего воздуха), с пиковыми значениями до 75 °C, и установили, что снижение рабочей температуры шины на 10–20 % продлевает срок службы на 50–100 %. Эти результаты, полученные для автопарков с ДВС, применимы к автопаркам электромобилей с двумя поправками, характерными для данной ситуации: электромобили имеют существенно большую полную массу из-за веса аккумуляторной батареи, что само по себе увеличивает нагрузку на шины, а распределение тормозного усилия у них качественно отличается от распределения у автомобилей с ДВС (рекуперативное торможение на электрической оси до истощения возможности рекуперации, полное фрикционное торможение после этого), что изменяет частоту и местоположение событий интенсивного ускорения/замедления, определенных как доминирующий механизм нагрева шин.

Показано, что те же соотношения конвективного теплообмена, проверенные для ребер головки блока цилиндров с воздушным охлаждением в двигателях внутреннего сгорания, применимы — с изменением лишь геометрии теплообменника — к терморегулированию тяговых аккумуляторов, поскольку обе задачи сводятся к конвективному теплообмену от нагретой поверхности к воздушному потоку, плотность и охлаждающая способность которого снижаются с ростом высоты над уровнем моря — а это означает, что, точно так же, как и в случае с фрикционными тормозами (§3.1), эксплуатация на больших высотах ухудшает охлаждение аккумулятора именно в тот момент, когда прием заряда при спуске создает наибольшую тепловую нагрузку на устройство хранения энергии.

3.3. Окружающая среда: связь L_χ – выбросы

При доминировании гидроэнергетики в национальной выработке электроэнергии углеродный след электромобиля от источника до колеса оценивается в 3,3–4,3 г CO_2 /км по сравнению с примерно 148 г/км для аналогичного автомобиля с ДВС снижение в 35–45 раз, что согласуется с независимым международным наблюдением, согласно которому электромобили, составляющие примерно 5% мирового парка легковых автомобилей, в 2024 году составляли лишь 0,7% выбросов

CO_2 от всего парка [4]. Однако показано, что это преимущество в значительной степени зависит от сезонной структуры выработки гидроэлектроэнергии, а не от характеристик транспортных средств: оценочный углеродный след меняется на порядок в течение года ($\approx 3,6$ г/км летом против ≈ 30 г/км зимой), а зима — когда выработка гидроэлектроэнергии находится на национальном минимуме совпадает с сезонным пиком спроса на транспорт, что является несоответствием, имеющим прямые последствия для сезонно-дифференцированного экологического учета.

Результаты синтеза, относящиеся к данной работе, касаются выбросов, не связанных с выхлопными газами, частиц, образующихся при торможении, износе шин и дорожном покрытии, которые не регулируются никакими нормативными актами, основанными на выбросах, и, что примечательно, не равны нулю для электромобиля. Поскольку активация фрикционного тормоза при спуске регулируется точно условием рекуперации-выхлопа, баланс между выбросами, не связанными с выхлопными газами, электромобиля и автомобиля с ДВС при том же спуске является прямой функцией отношения $L_x/L_{descent}$: пока L_x превышает оставшуюся длину спуска, активность фрикционного тормоза (и, следовательно, частиц, не связанных с выхлопными газами) подавляется, и экологическое преимущество электромобиля перед автомобилем с ДВС велико; как только L_x превышено, нагрузка фрикционного тормоза приближается к базовому уровню автомобиля с ДВС или превышает его (Таблица 1), и разрыв в выбросах, не связанных с выхлопными газами, соответственно сужается. Это центральный междисциплинарный результат статьи: тот же параметр, который определяет безопасность торможения, также определяет экологическое сравнение, а это значит, что вопросы техники безопасности и экологического учета для электрифицированного горного транспорта не могут рассматриваться как независимые исследования.

Кроме того, было обнаружено, что в замкнутых горных долинах в условиях температурной инверсии образуются локальные зоны накопления загрязняющих веществ с последующим их отложением в снежном покрове и нижележащих водосборных бассейнах. При этом электрификация в условиях ограниченных долин обеспечивает непропорционально большее улучшение качества воздуха и акустики на местном уровне, чем та же электрификация на открытой местности.

3.4. Инфраструктура: размещение объектов с учетом рекуперации энергии и зарядка мобильных устройств

Поскольку модель безопасности §3.1 вычисляет профиль состояния заряда $\sigma(s)$ вдоль любого маршрута, точка, в которой $\sigma(s)$ достигает своего минимума, является прямым, физически определенным потенциальным местом для зарядной инфраструктуры, а глубина этого минимума определяет требуемую мощность станции, заменяя административное планирование инфраструктуры, ранее единственный доступный метод для страны с географическими и другими ограничениями Таджикистана [13], расчетным критерием. Для эталонного маршрута этот минимум находится на горном перевале, а не в какой-либо из конечных точек, чего не удалось бы достичь в процессе административного планирования, организованном вокруг местоположения городов.

Дополнительный результат касается маршрутов, не имеющих подключения к сети: один спуск тяжелого транспортного средства с уклоном 7% на протяжении 25 км, с использованием механизма рекуперативного торможения §3.1, генерирует приблизительно 63 кВт · ч запасаемой энергии, что эквивалентно примерно 2,1 полным зарядам типичного легкового электромобиля, без расхода топлива, напрямую устраняя два недостатка, ранее выявленных в мобильных зарядных станциях на основе генераторов в стране (экологические издержки и зависимость от пополнения запасов топлива) [13]. Коммерческая функция зарядки и функция безопасности, заключающаяся в разгрузке системы фрикционного тормоза при спуске, здесь взаимно усиливают друг друга, а не конкурируют, а возможность подключения к сети для любой полученной стационарной установки может быть оценена стандартными методами расчета потока мощности с учетом локально слабых горных распределительных сетей [34].

4. Обсуждение (Discussions)

Результаты подтверждают целесообразность рассмотрения L_x — величины, определяемой исключительно с точки зрения безопасности тормозной системы, как организующей переменной всего синтеза, а не как одного из нескольких входных параметров, которые необходимо взвешивать

с учетом отдельно выведенных показателей надежности и экологичности. Это более сильное и опровергаемое утверждение, чем общее утверждение о «взаимосвязанности» безопасности, надежности и экологии: оно определяет механизм (насыщение рекуперации вызывает скачкообразное изменение нагрузки на фрикционный тормоз) и направление результирующего междоменного эффекта (увеличение нагрузки на фрикционный тормоз одновременно повышает как выбросы, не связанные с выхлопными газами, так и тепловую/механическую нагрузку на компоненты), а также позволяет определить проверяемый пороговый уровень, в которой L_{χ} равно оставшейся длине снижения, при котором экологическое и надежностное преимущество электромобиля по сравнению с автомобилем с двигателем внутреннего сгорания сужается.

Национальная статистика аварий (§1.1) показывает, что это не спекулятивная проблема будущего, зависящая от дальнейшей электрификации: базовая нагрузка на безопасность при торможении в горах уже возрастает при нынешнем парке автомобилей, в основном с двигателями внутреннего сгорания, что скорее укрепляет, чем ослабляет аргументы в пользу концепции, которая будет применяться без изменений по мере развития электрификации. В то же время некоторые компоненты синтеза по-прежнему имеют более веские основания, чем другие. Связь с надежностью (§3.2) основана на обширных полевых данных для шин эпохи ДВС и на методологически обоснованном, но еще не подтвержденном в полевых условиях переносе теплового критерия на охлаждение батареи; связь с окружающей средой (§3.3) основана на хорошо обоснованной методологии WtW, но на еще не измеренном коэффициенте выбросов, не связанных с выхлопными газами, специфичном для описанного здесь режима торможения при спуске с горы, который следует в первую очередь измерить напрямую (отбор проб твердых частиц на инструментальных спусках) перед дальнейшим уточнением модели. Результат, касающийся инфраструктуры (§3.4), является наиболее применимым на практике, поскольку не требует нового оборудования, а лишь применения результатов уже проверенной модели безопасности к решению о размещении, которое соответствующие министерства в настоящее время принимают в административном порядке.

5. Заключение (Conclusions)

Безопасность торможения, надежность компонентов и экологические характеристики дорожного транспорта в горной местности, традиционно рассматриваемые как отдельные исследовательские проблемы, регулируемые отдельными областями знаний, как показано, совместно определяются единым физическим порогом, критическим расстоянием рекуперации-выхлопа L_{χ} , после перехода на электромобили. Ниже этого порога электрифицированный автомобиль одновременно обеспечивает благоприятные запасы безопасности (сниженная нагрузка на фрикционные тормоза), уменьшенную тепловую нагрузку на компоненты и значительное экологическое преимущество по сравнению с автомобилем с двигателем внутреннего сгорания; выше него все три показателя движутся неблагоприятно вместе, и электрифицированный автомобиль, особенно с точки зрения безопасности торможения, может оказаться в худшем положении, чем заменяемый им автомобиль. Эта общая зависимость, подтвержденная данными национальной статистики дорожно-транспортных происшествий за десятилетие, демонстрирующими рост тяжести аварий, в основном в горных районах, данными о надежности компонентов, полученными с помощью полевых приборов, и экологической методологией, учитывающей сезонные колебания выработки гидроэнергии в стране, представляет собой междисциплинарный синтез, характерный для исследовательской программы, проводимой совместно в рамках специальностей «Безопасность эксплуатации транспортных средств» и «Техническая экология», и дает непосредственно применимые на практике результаты: правило управления уровнем заряда перед спуском, физически обоснованный критерий размещения зарядной инфраструктуры и концепцию мобильной зарядки с рекуперацией энергии для маршрутов без доступа к электросети.

Рецензент: Сайдуллозода С.С. — к.т.н., доцент кафедры ЭАП, ЛЭПГУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Абдулло, М.А. Бехатарии автомобилҳои барқӣ ва таъсири онҳо ба партови газҳои гулхонагӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон / М.А. Абдулло, Р.Д. Чурахонзода, С.Х. Давлатзода // Фурӯғи Илм. – 2025. – № 3. – С. 36-46.-EDN ZHWOVE. DOI: [10.5281/zenodo.19108735](https://doi.org/10.5281/zenodo.19108735).

2. Ахбори таҳлилий оид ба ҳолати ҳодисаҳои роҳу нақлиёт дар роҳҳои автомобилгарди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2015. – Душанбе : Раёсати БДА ВКД ҚТ, 2016.
3. Ахбори таҳлилий оид ба ҳолати ҳодисаҳои роҳу нақлиёт дар роҳҳои автомобилгарди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2016. – Душанбе : Раёсати БДА ВКД ҚТ, 2017.
4. Ахбори таҳлилий оид ба ҳолати ҳодисаҳои роҳу нақлиёт дар роҳҳои автомобилгарди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2017. – Душанбе : Раёсати БДА ВКД ҚТ, 2018.
5. Ахбори таҳлилий оид ба ҳолати ҳодисаҳои роҳу нақлиёт дар роҳҳои автомобилгарди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2018. – Душанбе : Раёсати БДА ВКД ҚТ, 2019.
6. Ахбори таҳлилий оид ба ҳолати ҳодисаҳои роҳу нақлиёт дар роҳҳои автомобилгарди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2019. – Душанбе : Раёсати БДА ВКД ҚТ, 2020.
7. Ахбори таҳлилий оид ба ҳолати ҳодисаҳои роҳу нақлиёт дар роҳҳои автомобилгарди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2020. – Душанбе : Раёсати БДА ВКД ҚТ, 2021.
8. Ахбори таҳлилий оид ба ҳолати ҳодисаҳои роҳу нақлиёт дар роҳҳои автомобилгарди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2021. – Душанбе : Раёсати БДА ВКД ҚТ, 2022.
9. Ахбори таҳлилий оид ба ҳолати ҳодисаҳои роҳу нақлиёт дар роҳҳои автомобилгарди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2022. – Душанбе : Раёсати БДА ВКД ҚТ, 2023.
10. Ахбори таҳлилий оид ба ҳолати ҳодисаҳои роҳу нақлиёт дар роҳҳои автомобилгарди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2023. – Душанбе : Раёсати БДА ВКД ҚТ, 2024.
11. Ахбори таҳлилий оид ба ҳолати ҳодисаҳои роҳу нақлиёт дар роҳҳои автомобилгарди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2024. – Душанбе : Раёсати БДА ВКД ҚТ, 2025.
12. Ахбори таҳлилий оид ба ҳолати ҳодисаҳои роҳу нақлиёт дар роҳҳои автомобилгарди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар соли 2025. – Душанбе : Раёсати БДА ВКД ҚТ, 2026.
13. Абдулло, М.А. Техничко-экономический анализ применения мобильных зарядных станций для электромобилей в условиях Республики Таджикистан / М.А. Абдулло // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 5. – С. 51-63. DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-5-51>.
14. Абдуллоев, М.А. Анализ влияния температуры воздуха на интенсивность изнашивания шин грузовых автомобилей / М.А. Абдуллоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – Т. 42. – № 2. – С. 72-76.
15. Абдуллоев, М.А. Влияние атмосферного давления на мощность дизельного двигателя / М.А. Абдуллоев, Р.А. Давлатшоев, Д. Садуллобеков // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – Т. 41. – № 1. – С. 135-139.
16. Абдуллоев, М.А. Теоретическое обоснование параметров обрешения головок цилиндров дизелей с воздушным охлаждением / М.А. Абдуллоев, А.А. Саилов, А.М. Умирзоков и др. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2016. – № 2. – С. 57-67.
17. Абдуллоев, М.А. Анализ отказов автомобильных шин в условиях высокогорья Республики Таджикистан / М.А. Абдуллоев, А.М. Умирзоков, А.А. Саилов и др. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2016. – Т. 33. – № 1. – С. 36-41.
18. Айрапетов, Д.А. Транспорт, экология и здоровье: Монография / Д.А. Айрапетов, Ю. Шадиметов. – Ташкент : ЯТТ «Ризаев М.Х.», 2022. – 256 с.
19. Горчаков, Ю. Н. Экологическая безопасность электромобилей и автомобилей с традиционными силовыми агрегатами / Ю. Н. Горчаков, М. Д. Дунаева // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XIV Национальной научно-практической конференции с международным участием, Тюмень, 13 мая 2021 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. – С. 293-296. – EDN XRQQFB.
20. Давлатшоев, Р.А. Влияние термонагруженности тормозных механизмов на эффективность торможения автомобиля в горных условиях эксплуатации / Р.А. Давлатшоев, М.А. Абдулло // Политехнический вестник. Серия: инженерные исследования. – 2021. – Т. 55. – № 3. – С. 64-68.
21. Давлатшоев, Р.А. Повышение тормозных свойств автотранспортных средств в горных условиях эксплуатации : специальность 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р.А. Давлатшоев. – Душанбе, 2007.
22. Давлатшоев, Р.А. Оценка эффективности рабочей тормозной системы автомобиля с регулятором тормозных сил в горных условиях эксплуатации / Р.А. Давлатшоев, А.А. Турсунов, М.А. Абдуллоев, Ф.С. Бодурбеков // Нефть и газ Западной Сибири. Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университета. Том II. – 2011. – С. 133-140.
23. Заблоцкий, М. А. Воздействие автомобильных шин и тормозных колодок на окружающую среду / М. А. Заблоцкий, О. В. Шулепова // Аграрная наука в контексте времени : Сборник трудов LX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 11–14 марта 2025 года. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2025. – С. 30-34. – EDN INZOPC.
24. Нуралиев, Б. Экологическая и дорожная безопасность автомобильного транспорта Республики Таджикистан / Б. Нуралиев, М.А. Абдуллоев, Ф.С. Бодурбеков, Р.А. Давлатшоев // Нефть и газ Западной Сибири. – Тюменский индустриальный университет (Тюмень), 2011. – С. 343-347.

25. Программа развития электротранспорта в Республике Таджикистан на 2023-2028 годы (утверждена постановлением правительства № 532 от 31 октября 2022 года). – Режим доступа: <https://mmih.adlia.tj/SEARCH/DocumentView?DocumentId=143588> (дата обращения: 01.07.2026). – [Электронный ресурс].
26. Саибов, А. А. Экспериментальное обоснование теоретических исследований параметров оребрения головок цилиндров дизелей с воздушным охлаждением / А. А. Саибов, М. А. Абдуллоев, А. М. Умирзоков [и др.] // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2016. – № 1(33). – С. 47–56. – EDN YPTJRF.
27. Сайфиддинзода, О.С. Углеродный след и климатическая уязвимость Республики Таджикистан / О.С. Сайфиддинзода, М.А. Абдулло, Р.Д. Джурахонзода, С.Х. Давлатзода // Фуруги илм (Сияние науки). – 2025. – № 4. – С. 53-62.-EDN WFXLQI. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18910312>.
28. Умирзоков, А.М. Влияние дорожных, климатических и эксплуатационных факторов на долговечность автомобильных шин / А.М. Умирзоков, А.А. Саибов, М.А. Абдуллоев, Ф. Джобиров // Вестник Таджикского технического университета. – 2015. – Т. 31. – № 3. – С. 89-94.
29. Юнусов, М. Ю. Оценка состояния парниковых газов автотранспорта города Душанбе / М. Ю. Юнусов, М. Абдулло, Б. Ж. Мажитов, Н. Б. Сахибов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2022. – № 4(60). – С. 115–120.
30. Abdullo, M. A numerically stable cruise control model for an electric vehicle on a mountain route based on a smooth approximation of traction–regeneration mode switching / M. Abdullo // Furughi Ilm. Series: Natural and Mathematical Sciences. – 2026. – Vol. 10. – № 2. – P. 145-157. DOI: <https://doi.org/10.24412/3078-395X-2026-2-10-145-457>.
31. Artaş, S.B. A country-based well-to-wheel efficiency comparison of electric and fossil-fuelled vehicles: A comprehensive study considering fuel sources and policy implications / S.B. Artaş, H. Yağlı, A. Kahraman // Transport Policy. – 2026. – Vol. 180. – A country-based well-to-wheel efficiency comparison of electric and fossil-fuelled vehicles. – P. 104041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2026.104041>.
32. Germany. Endurance braking: reminder on meaning purpose and suitable requirements | UNECE. – Режим доступа: <https://unece.org/transport/documents/2024/09/informal-documents/germany-endurance-braking-reminder-meaning-purpose> (accessed August 3, 2026). – [Electronic resource].
33. Ke, W. Well-to-wheels energy consumption and emissions of electric vehicles: Mid-term implications from real-world features and air pollution control progress / W. Ke, S. Zhang, X. He et al. // Applied Energy. – 2017. – Vol. 188. – Well-to-wheels energy consumption and emissions of electric vehicles. – P. 367-377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.011>.
34. Luo, Y. Recursive power flow calculation based on polar coordinates holomorphic embedding method / Y. Luo, C. Liu, M. Abdullo и др. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2026. – Т. 177. – С. 111729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2026.111729>.
35. Umirzokov, A.M. Assessment of the resource of elements of transportation machines operated in mining energy enterprises / A.M. Umirzokov, M.A. Abdullo, F.I. Jobirov и др. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Т. 990. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/990/1/012063>
36. Zhang, Q. Regenerative braking system effectively reduces the formation of brake wear particles / Q. Zhang, J. Yin, T. Fang et al. // Journal of Hazardous Materials. – 2024. – Vol. 465. – P. 133350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133350>.

References

1. Abdullo, M. A., Jurakhonzoda, R. D., & Davlatzoda, S. Kh. (2025). Bekhatarii avtomobilhoi barqi va tasiri onho ba partovi gazhoi gulkhonagi dar Jumhurii Tojikiston [Safety of electric vehicles and their impact on greenhouse gas emissions in the Republic of Tajikistan]. Furughi Ilm [The Glow of Science], (3), 36-46. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19108735>. EDN ZHWOVE. (In Taj.).
2. Department of State Automobile Inspection of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan. (2016). Akhbori tahlili oid ba holati hodisahoi rohu naqliyot dar rohhoi avtomobilgardi Jumhurii Tojikiston dar soli 2015 [Analytical report on the state of road traffic accidents on the highways of the Republic of Tajikistan in 2015]. (In Taj.).
3. Department of State Automobile Inspection of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan. (2017). Akhbori tahlili oid ba holati hodisahoi rohu naqliyot dar rohhoi avtomobilgardi Jumhurii Tojikiston dar soli 2016 [Analytical report on the state of road traffic accidents on the highways of the Republic of Tajikistan in 2016]. (In Taj.).
4. Department of State Automobile Inspection of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan. (2018). Akhbori tahlili oid ba holati hodisahoi rohu naqliyot dar rohhoi avtomobilgardi Jumhurii Tojikiston dar soli 2017 [Analytical report on the state of road traffic accidents on the highways of the Republic of Tajikistan in 2017]. (In Taj.).
5. Department of State Automobile Inspection of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan. (2019). Akhbori tahlili oid ba holati hodisahoi rohu naqliyot dar rohhoi avtomobilgardi Jumhurii Tojikiston dar soli 2018 [Analytical report on the state of road traffic accidents on the highways of the Republic of Tajikistan in 2018]. (In Taj.).
6. Department of State Automobile Inspection of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan. (2020). Akhbori tahlili oid ba holati hodisahoi rohu naqliyot dar rohhoi avtomobilgardi Jumhurii Tojikiston dar soli 2019 [Analytical report on the state of road traffic accidents on the highways of the Republic of Tajikistan in 2019]. (In Taj.).

7. Department of State Automobile Inspection of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan. (2021). Akhbori tahlili oid ba holati hodisahoi rohu naqliyot dar rohhoi avtomobilgardi Jumhurii Tojikiston dar soli 2020 [Analytical report on the state of road traffic accidents on the highways of the Republic of Tajikistan in 2020]. (In Taj.).
8. Department of State Automobile Inspection of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan. (2022). Akhbori tahlili oid ba holati hodisahoi rohu naqliyot dar rohhoi avtomobilgardi Jumhurii Tojikiston dar soli 2021 [Analytical report on the state of road traffic accidents on the highways of the Republic of Tajikistan in 2021]. (In Taj.).
9. Department of State Automobile Inspection of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan. (2023). Akhbori tahlili oid ba holati hodisahoi rohu naqliyot dar rohhoi avtomobilgardi Jumhurii Tojikiston dar soli 2022 [Analytical report on the state of road traffic accidents on the highways of the Republic of Tajikistan in 2022]. (In Taj.).
10. Department of State Automobile Inspection of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan. (2024). Akhbori tahlili oid ba holati hodisahoi rohu naqliyot dar rohhoi avtomobilgardi Jumhurii Tojikiston dar soli 2023 [Analytical report on the state of road traffic accidents on the highways of the Republic of Tajikistan in 2023]. (In Taj.).
11. Department of State Automobile Inspection of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan. (2025). Akhbori tahlili oid ba holati hodisahoi rohu naqliyot dar rohhoi avtomobilgardi Jumhurii Tojikiston dar soli 2024 [Analytical report on the state of road traffic accidents on the highways of the Republic of Tajikistan in 2024]. (In Taj.).
12. Department of State Automobile Inspection of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Tajikistan. (2026). Akhbori tahlili oid ba holati hodisahoi rohu naqliyot dar rohhoi avtomobilgardi Jumhurii Tojikiston dar soli 2025 [Analytical report on the state of road traffic accidents on the highways of the Republic of Tajikistan in 2025]. (In Taj.).
13. Abdullo, M. A. (2024). Tekhniko-ekonomicheskii analiz primeneniya mobil'nykh zaryadnykh stantsiy dlya elektromobiley v usloviyakh Respubliki Tadjikistan [Techno-economic analysis of using mobile charging stations for electric vehicles in the conditions of the Republic of Tajikistan]. Intellect. Innovatsii. Investitsii [Intellect. Innovation. Investments], (5), 51-63. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-5-51>. (In Russ.).
14. Abdulloev, M. A. (2018). Analiz vliyaniya temperatury vozdukha na intensivnost' iznashivaniya shin gruzovykh avtomobiley [Analysis of the air temperature influence on the wear rate of truck tires]. Politekhicheskiy vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya [Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies], 42(2), 72-76. (In Russ.).
15. Abdulloev, M. A., Davlatshoyev, R. A., & Sadullobekov, D. (2018). Vliyaniye atmosfernogo davleniya na moshchnost' dizel'nogo dvigatelya [Influence of atmospheric pressure on diesel engine power]. Politekhicheskiy vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya [Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies], 41(1), 135-139. (In Russ.).
16. Abdulloev, M. A., Saibov, A. A., Umirzokov, A. M., et al. (2016). Teoreticheskoye obosnovaniye parametrov orebreniya golovok tsilindrov dizeley s vozdushnym okhlazhdeniyem [Theoretical substantiation of parameters for finning of air-cooled diesel cylinder heads]. Politekhicheskiy vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya [Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies], (2), 57-67. (In Russ.).
17. Abdulloev, M. A., Umirzokov, A. M., Soibov, A. A., et al. (2016). Analiz otkazov avtomobil'nykh shin v usloviyakh vysokogor'ya Respubliki Tadjikistan [Analysis of automobile tire failures in the high-altitude conditions of the Republic of Tajikistan]. Politekhicheskiy vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya [Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies], 33(1), 36-41. (In Russ.).
18. Ayrapetov, D. A., & Shadimetov, Yu. (2022). Transport, ekologiya i zdorov'ye: Monografiya [Transport, ecology and health: Monograph]. YaTT «Rizayev M.Kh.». (In Russ.).
19. Gorchakov, Yu. N., & Dunayeva, M. D. (2021). Ekologicheskaya bezopasnost' elektromobiley i avtomobiley s traditsionnymi silovymi agregatami [Environmental safety of electric vehicles and vehicles with traditional power units]. In Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya (pp. 293-296). Tyumen State Oil and Gas University. EDN XRQQFB. (In Russ.).
20. Davlatshoyev, R. A., & Abdullo, M. A. (2021). Vliyaniye termonagruzhennosti tormoznykh mekhanizmov na effektivnost' tormozheniya avtomobilya v gornyx usloviyakh ekspluatatsii [The impact of thermal loading of brake mechanisms on vehicle braking efficiency under mountainous operating conditions]. Politekhicheskiy vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya [Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies], 55(3), 64-68. (In Russ.).
21. Davlatshoyev, R. A. (2007). Povysheniye tormoznykh svoystv avtotransportnykh sredstv v gornyx usloviyakh ekspluatatsii [Improving the braking properties of motor vehicles in mountainous operating conditions] (Candidate dissertation). Dushanbe. (In Russ.).
22. Davlatshoyev, R. A., Tursunov, A. A., Abdulloev, M. A., & Bodurbekov, F. S. (2011). Otsenka effektivnosti rabochey tormoznoy sistemy avtomobilya s regul'yatorom tormoznykh sil v gornyx usloviyakh ekspluatatsii [Evaluating the effectiveness of a vehicle's service brake system with a brake force regulator in mountainous operating conditions]. In Neft' i gaz Zapadnoy Sibiri (Vol. 2, pp. 133-140). Tyumen State Oil and Gas University. (In Russ.).
23. Zablotskiy, M. A., & Shulepova, O. V. (2025). Vozdeystviye avtomobil'nykh shin i tormoznykh kolodok na okruzhayushchuyu sredu [Impact of car tires and brake pads on the environment]. In Agrarnaya nauka v kontekste vremeni (pp. 30-34). Northern Trans-Ural State Agricultural University. EDN INZOPC. (In Russ.).
24. Nuraliyev, B., Abdulloev, M. A., Bodurbekov, F. S., & Davlatshoyev, R. A. (2011). Ekologicheskaya i dorozhnaya bezopasnost' avtomobil'nogo transporta Respubliki Tadjikistan [Environmental and road safety of road transport in the Republic of Tajikistan]. In Neft' i gaz Zapadnoy Sibiri (pp. 343-347). Tyumen Industrial University. (In Russ.).

25. Government of the Republic of Tajikistan. (2022, October 31). Programma razvitiya elektrotransporta v Respublike Tadjikistan na 2023-2028 gody [Electric transport development program in the Republic of Tajikistan for 2023-2028] (Decree No. 532). <https://mmih.adlia.tj/SEARCH/DocumentView?DocumentId=143588>. (In Russ.).
26. Saibov, A. A., Abdulloyev, M. A., Umirzokov, A. M., et al. (2016). Eksperimental'noye obosnovaniye teoreticheskikh issledovaniy parametrov orebreniya golovok tsilindrov dizeley s vozdushnym okhlazhdeniyem [Experimental justification of theoretical studies of finning parameters for cylinder heads of air-cooled diesel engines]. Politekhicheskiy vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya [Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies], 1(33), 47-56. EDN YPTJRF. (In Russ.).
27. Sayfiddinzoda, O. S., Abdullo, M. A., Jurakhonzoda, R. D., & Davlatzoda, S. Kh. (2025). Uglerodnyy sled i klimaticheskaya uyazvimost' Respubliki Tadjikistan [Carbon footprint and climate vulnerability of the Republic of Tajikistan]. Furugi ilm (Siyaniye nauki) [The Glow of Science], (4), 53-62. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18910312>. EDN WFXLQI. (In Russ.).
28. Umirzokov, A. M., Saibov, A. A., Abdulloyev, M. A., & Jobirov, F. (2015). Vliyanie dorozhnykh, klimaticheskikh i ekspluatatsionnykh faktorov na dolgovechnost' avtomobil'nykh shin [Influence of road, climatic and operational factors on the durability of car tires]. Vestnik Tadjikskogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tajik Technical University], 31(3), 89-94. (In Russ.).
29. Yunusov, M. Yu., Abdullo, M., Mazhitov, B. Zh., & Sakhibov, N. B. (2022). Otsenka sostoyaniya parnikovykh gazov avtotransporta goroda Dushanbe [Assessment of the greenhouse gas state from motor vehicles in Dushanbe city]. Politekhicheskiy vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya [Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies], 4(60), 115-120. (In Russ.).
30. Abdullo, M. (2026). A numerically stable cruise control model for an electric vehicle on a mountain route based on a smooth approximation of traction–regeneration mode switching. Furughi Ilm. Series: Natural and Mathematical Sciences, 10(2), 145-157. <https://doi.org/10.24412/3078-395X-2026-2-10-145-457>
31. Artaş, S. B., Yağlı, H., & Kahraman, A. (2026). A country-based well-to-wheel efficiency comparison of electric and fossil-fuelled vehicles: A comprehensive study considering fuel sources and policy implications. Transport Policy, 180, 104041. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2026.104041>
32. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2024, September). Germany. Endurance braking: Reminder on meaning purpose and suitable requirements (Informal document). <https://unece.org/transport/documents/2024/09/informal-documents/germany-endurance-braking-reminder-meaning-purpose>
33. Ke, W., Zhang, S., He, X., et al. (2017). Well-to-wheels energy consumption and emissions of electric vehicles: Mid-term implications from real-world features and air pollution control progress. Applied Energy, 188, 367-377. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.011>
34. Luo, Y., Liu, C., Abdullo, M., et al. (2026). Recursive power flow calculation based on polar coordinates holomorphic embedding method. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 177, 111729. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2026.111729>
35. Umirzokov, A. M., Abdullo, M. A., Jobirov, F. I., et al. (2022). Assessment of the resource of elements of transportation machines operated in mining energy enterprises. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 990, 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/990/1/012063>
36. Zhang, Q., Yin, J., Fang, T., et al. (2024). Regenerative braking system effectively reduces the formation of brake wear particles. Journal of Hazardous Materials, 465, 133350. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133350>

Сведения об авторе:

Абдулло Мамадамон Абдурахмонбек, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Таджикского технического университета по им. акад. М.С. Осими. <https://farzonagon.tj/tg/profile/2108-4205>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-5946>. E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com

Маълумот оид ба муаллиф:

Абдулло Мамадамон Абдурахмонбек, номзади илмҳои техники, дотсенти кафедраи истифодабарии нақлиёти автомобилӣ, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. <https://farzonagon.tj/tg/profile/2108-4205>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-5946>. E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com

Information about the author:

Abdullo Mamadamon Abdurahmonbek, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Operation of road transport» Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi. <https://farzonagon.tj/tg/profile/2108-4205>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-5946>. E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com.

ПРИОРИТЕТЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В РЕСПУБЛИКЕ ТАДЖИКИСТАН

Ф.Н. Низомзода

Таджикский технический университет имени академика М.С.Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В данной статье обозначены приоритетные и стратегические направления развития транспортной инфраструктуры в Республике Таджикистан, обоснованные положениями законодательных и нормативно-правовых актов в сфере транспорта. Рассмотрено современное состояние транспортной инфраструктуры страны, включая основные показатели развития автомобильных дорог и международных транспортных коридоров, проходящих по территории Республики Таджикистан. Проанализированы ключевые проблемы, сдерживающие эффективное функционирование и дальнейшее развитие транспортной системы, а также определены основные меры по совершенствованию транспортной инфраструктуры. Особое внимание уделено повышению качества и безопасности автомобильных дорог, развитию международных транспортных связей, совершенствованию транзитного потенциала страны и формированию благоприятных условий для увеличения объемов грузовых и пассажирских перевозок. На основе проведенного анализа определены стратегические направления дальнейшего развития транспортной инфраструктуры, направленные на повышение ее эффективности, конкурентоспособности и интеграции Республики Таджикистан в международную транспортную систему. Предложенные направления предусматривают внедрение цифровых технологий, совершенствование управления транспортными потоками, развитие логистической инфраструктуры и повышение инвестиционной привлекательности отрасли.

Ключевые слова: транспортная инфраструктура, развитие транспортной системы, международные транспортные коридоры, автомобильные дороги, дорожная инфраструктура, транзитный потенциал.

АФЗАЛИЯТҶО ВА САМТҶОИ СТРАТЕГИИ РУШДИ ИНФРАСОҲОРИ НАҚЛИЁТӢ ДАР ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

Ф.Н. Низомзода

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақолаи мазкур самтҳои афзалиятнок ва стратегии рушди инфрасохтори нақлиётӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон, ки ба муқаррароти санадҳои қонунгузорӣ ва меъёрии ҳуқуқӣ дар соҳаи нақлиёт асос ёфтаанд, муайян гардидаанд. Вазъи мӯсоири инфрасохтори нақлиётии кишвар, аз ҷумла нишондиҳандаҳои асосии рушди роҳҳои автомобилгард ва долонҳои байналмилалӣ нақлиётии аз ҳудуди Ҷумҳурии Тоҷикистон гузаранда, мавриди баррасӣ қарор гирифтааст. Мушкилоти асосие, ки ба фаъолияти самаранок ва рушди минбаъдаи низоми нақлиётӣ монеъ мешаванд, таҳлил гардида, чораҳои асосии тақмили инфрасохтори нақлиётӣ муайян шудаанд. Ба баланд бардоштани сифат ва беҳатарии роҳҳои автомобилгард, рушди робитаҳои байналмилалӣ нақлиётӣ, тақмили иқтидори транзитии кишвар ва фароҳам овардани шароити мусоид барои афзоиши ҳаҷми ҳамлу нақли бор ва мусофирон таваҷҷуҳи махсус зоҳир шудааст. Дар асоси таҳлили гузаронидашуда самтҳои стратегӣ рушди минбаъдаи инфрасохтори нақлиётӣ муайян гардида, ба баланд бардоштани самаранокӣ, рақобатпазирӣ ва ҳамгироии Ҷумҳурии Тоҷикистон ба низоми байналмилалӣ нақлиётӣ равона шудаанд. Самтҳои пешниҳодшуда ҷорӣ намудани технологияҳои рақамӣ, тақмили идоракунии чараёнҳои нақлиётӣ, рушди инфрасохтори логистикӣ ва баланд бардоштани ҷолибияти сармоягузори соҳаро дар бар мегиранд.

Калидвожаҳо: инфрасохтори нақлиётӣ, рушди низоми нақлиётӣ, долонҳои байналмилалӣ нақлиётӣ, роҳҳои автомобилгард, инфрасохтори роҳ, иқтидори транзитӣ.

PRIORITIES AND STRATEGIC DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN

F.N. Nizomzoda

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

This article identifies the priority and strategic directions for the development of transport infrastructure in the Republic of Tajikistan, based on the provisions of legislative and regulatory acts governing the transport sector. The current state of the country's transport infrastructure is examined, including key indicators of road development and international transport corridors passing through the territory of the Republic of Tajikistan. The main problems hindering the efficient functioning and further development of the transport system are analyzed, and key measures for improving transport infrastructure are identified. Particular attention is paid to improving the quality and safety of roads, developing international transport links, enhancing the country's transit potential, and creating favorable conditions for increasing freight and passenger transportation volumes. Based on the analysis, strategic directions for the further development of transport infrastructure are identified, aimed at improving its efficiency, competitiveness, and integration of the Republic of Tajikistan into the international transport system. The proposed directions include the introduction of digital technologies, improvement of transport flow management, development of logistics infrastructure, and enhancement of the sector's investment attractiveness.

Keywords: transport infrastructure, transport system development, international transport corridors, highways, road infrastructure, transit potential.

Введение (Introduction)

Эффективное управление транспортно-логистической инфраструктурой является одной из важнейших задач устойчивого развития страны, влияющей на развитие ее экономики. Стратегическое географическое положение страны в Центральноазиатском регионе имеет свои особенности, влияющие на размещение и развитие транспортно-логистических центров. Формирование и развитие этого сектора не только ускорит доставку грузов, но и снизит транспортные издержки и повысит эффективность транспортного процесса, укрепив конкурентоспособность между производителями и потребителями.

Развитие международной торговли, глобализация транспортной системы и значительный рост смешанных грузоперевозок требуют комплексного подхода к развитию этого сектора. В этой связи необходимо установить координацию всех транспортных систем с транспортными коридорами, оптимизировать транспортный план, размещение транспортно-логистической инфраструктуры и активизировать мультимодальные перевозки. Республика Таджикистан, благодаря своему местоположению и территориальному положению, имеет потенциал стать транзитной зоной и обеспечить условия для связи с дальними и ближними странами.

Материалы и методы (Materials and methods)

Такие возможности и преимущества требуют модернизации транспортно-логистических объектов, реконструкции дорог и железных дорог, создания транспортно-логистических центров, складов и другой важной транспортной инфраструктуры [1].

В качестве объекта исследования рассматривается транспортная инфраструктура Республики Таджикистан, включающая автомобильный, железнодорожный, воздушный и логистические комплексы, а также процессы их функционирования и развития.

Практический опыт показывает, что эффективное развитие таких транспортно-логистических объектов осуществляется при государственной поддержке и внедрении стратегических направлений посредством программ и концепций. Следует отметить, что Республика Таджикистан приняла следующие программы развития дорожно-транспортно-логистического сектора:

1. Национальная стратегия развития Республики Таджикистан до 2030 года, утвержденная парламентом страны, которая определяет все направления развития экономической и социальной сфер страны, транспорта и связи, а также поддержку импорта и экспорта товаров. Как долгосрочный план, она обязывает все сектора выполнять возложенные на них задачи и играть достойную роль в развитии страны.

2. Государственная программа развития логистических систем Республики Таджикистан на 2023-2028 годы, направленная на создание современных логистических и транспортных объектов, совершенствование инфраструктуры, привлечение отечественных и зарубежных инвестиций и развитие отечественных стандартов в соответствии с международными стандартами. Данная программа предусматривает реализацию следующих стратегических планов:

3. Стратегия устойчивого экономического развития и зеленой экономики до 2037 года, которая включает развитие сектора логистики посредством продвижения экономических секторов и совершенствования транспортно-логистической инфраструктуры.

Практический опыт показывает, что эффективное развитие таких транспортно-логистических объектов осуществляется при государственной поддержке и внедрении стратегических направлений посредством программ и концепций. Следует отметить, что Республика Таджикистан приняла следующие программы развития дорожно-транспортно-логистического сектора:

1. Национальная стратегия развития Республики Таджикистан до 2030 года, утвержденная парламентом страны, которая определяет все направления развития экономической и социальной сфер страны, транспорта и связи, а также поддержку импорта и экспорта товаров. Как долгосрочный план, она обязывает все сектора выполнять возложенные на них задачи и играть достойную роль в развитии страны.

2. Государственная программа развития логистических систем Республики Таджикистан на 2023-2028 годы, направленная на создание современных логистических и транспортных объектов, совершенствование инфраструктуры, привлечение отечественных и зарубежных инвестиций и развитие отечественных стандартов в соответствии с международными стандартами. Данная программа предусматривает реализацию следующих стратегических планов:

- ✓ модернизация отечественных терминалов и строительство современных транспортно-логистических центров;
- ✓ стандартизация логистических услуг и разработка новых услуг;
- ✓ внедрение цифровизации сектора при управлении избыточным количеством транспортных средств;
- ✓ подготовка и обучение специалистов, ответственных за рынок труда, на основе обмена опытом и т. д.

3. Стратегия устойчивого экономического развития и зеленой экономики до 2037 года, которая включает развитие сектора логистики посредством продвижения экономических секторов и совершенствования транспортно-логистической инфраструктуры.

Еще одним нормативно-правовым актом, служащим нормативным стандартом и определяющим перспективы развития, является Кодекс дорожного транспорта Республики Таджикистан, принятый под номером 1594 от 12 февраля 2020 года. Этот нормативно-правовой акт устанавливает все права и обязанности грузоотправителей и грузополучателей, порядок организации перевозки грузов и пассажиров, деятельность объектов транспортно-логистической инфраструктуры, а также требования к грузам и транспортным средствам при перевозке грузов. Такие программы и стратегии направлены не только на определение развития сектора, но и на создание благоприятной базы для привлечения отечественных и зарубежных инвестиций, осуществления цифровизации и повышения уровня обслуживания. Основные направления развития транспортно-логистической системы страны, включенные в государственные отраслевые программы, следующие:



Рисунок 1 – Стратегическая цель развития системы транспорта

Figure 1 – Strategic Objective of Transport System Development

- Развитие транзитных транспортных мощностей страны и их интеграция с международными автомагистралями;
- Привлечение отечественных и зарубежных инвестиций для создания и реконструкции современных транспортно-логистических центров;
- Создание и развитие сети логистических и транспортных центров в стране;
- Развитие интермодальных перевозок и совершенствование различных видов транспорта;

- Пересмотр и реконструкция транспортно-логистической инфраструктуры и увеличение пропускной способности международных автомагистралей;
- Переход к цифровизации информации и практическая реализация отраслевых программ;
- Создание эффективного регулирования логистических услуг и совершенствование правовой базы;
- Развитие транспортно-логистического сектора в сотрудничестве с зарубежными партнерами на основе заключения взаимных соглашений и т. д.

Как мы уже отмечали, одним из методов развития логистической системы страны является гармонизация и приведение логистических услуг в соответствие с международными стандартами. Государство и Правительство Республики Таджикистан в сотрудничестве с партнерами по развитию в сфере транспорта и логистики приняли ряд национальных стандартов, воплощающих гармонизацию сектора с международными стандартами. В этом контексте Государственное предприятие «Автомобильный транспорт и логистическое обслуживание» создало на высоком уровне услуги 3PL, 4PL и 5PL для расширения международного сотрудничества и приведения его в соответствие с международными стандартами. По этому направлению мы можем повысить эффективность использования транзитного потенциала страны и установить внешнеэкономические связи в сфере международных перевозок. Одним из главных элементов формирования транзитного потенциала страны является строительство дорог международного, республиканского и местного значения, посредством которых мы можем укрепить связи страны с другими странами и обеспечить транзитную пропускную способность. По статистическим данным Министерства транспорта Республики Таджикистан, в последние годы строительство и реконструкция дорог в стране постепенно нарастают.

Результаты (Results)

К 2025 году с учетом имеющихся данных протяженность этих дорог достигнет 14307 км, которые относятся к отдельным регионам и включают дороги международного, республиканского и местного значения, как показано в таблице ниже [2].

Таблица 1- Общая протяженность автомобильных дорог Таджикистана

Table 1 – Total Length of Roads in the Republic of Tajikistan

№	Регионы	Автомобильные дороги общего пользования, 14307км			
		МД	РД		Общие
1	Гиссарский регион	275	375	1199	1849
2	Раштский регион	294	175	473	942
3	Согдийский регион	735	413	2422	3570
4	Бохтарский регион	435	335	1984	2754
5	Кулябский регион	318	429	1706	2453
6	ГБАО	1276	384	1079	2739
	Всего	3333	2111	8863	14307

Источник: Министерство транспорта Республики Таджикистан

Source: Ministry of Transport of the Republic of Tajikistan

Обсуждение (Discussion)

Следует отметить, что роль автомагистралей как основных элементов дорожной сети в формировании транзитного потенциала страны весьма значительна, обеспечивая связь между странами. Также очень важна роль международных мультимодальных коридоров в формировании транзитной страны, определяющих характер и специфику транспорта. В рамках данного исследования мы предложили такие международные транспортные коридоры.

Таблица 2- Мультимодальные коридоры для транзита грузов через РТ

Table 2 – Multimodal Corridors for Freight Transit through the Republic of Tajikistan

Обозначение	Наименование коридоров
МК1	Вахдат(РТ)–Карамык(РКГ)–Сары-Таш(РКГ) –Кашгар(КНР)
МК2	Руми(РТ) – Кундуз(Афганистан) - Пешавар(Пакистан)
МК3	Кулоб(РТ) – Кульма(перевал) – Кашгар КНР

МК4	Ош(РКГ)–Мургаб(РТ)–Ишкошим(РТ)– Файзабад(Афг.)
МК5	Кашгар(КНР) – Кульма(перевал) – Мургаб(РТ) – Ишкошим -Файзабад(Афг.)
МК6	Кашгар(КНР) – Ош(РКГ) – Худжанд(РТ) – Кундуз(Афг.) – Пешавар(Пакистан)

Привлечение инвестиций является важным инструментом экономического укрепления и основным механизмом формирования и развития транспортно-логистической инфраструктуры, которая рассматривается как создание объектов сервиса. Одним из таких объектов являются транспортно-логистические центры, которые можно рассматривать как средство повышения эффективности национальной экономики за счет предоставляемых ими услуг. Сегодня благодаря привлечению инвестиций строительство и реконструкция транспортно-логистической инфраструктуры продолжаются целенаправленно, и на развитие этого сектора выделены определенные объемы финансирования и обеспечения техническими средствами.

По данным Министерства транспорта Республики Таджикистан, на сегодняшний день реализуются 16 государственных инвестиционных проектов на общую сумму 11,3 миллиарда сомони. Также для определения приоритетных районов размещения транспортно-логистических центров в сотрудничестве с зарубежными партнерами были проведены технико-экономические обоснования в ряде регионов Республики Таджикистан. В том числе разработка проекта «Технико-экономическое обоснование логистического центра в городе Куляб». Данный проект реализуется в рамках Программы партнерства в области экономических инноваций Экспортно-импортного банка Кореи (Eximbank), его финансирование осуществляется Кореей в виде гранта и планируется завершить в июне текущего года. Проект «Технико-экономическое обоснование логистического центра Куляб» разработан на сумму 2,78 миллиона сомони (299 тысяч долларов США), и эта сумма также предоставлена Экспортно-импортным банком Кореи в виде гранта. Другой проект - это предварительное технико-экономическое обоснование и предварительное проектирование логистического центра на государственном контрольно-пропускном пункте «Фотехобод», и в соответствии с трехсторонним соглашением банк выделит 155 тысяч долларов США на проведение технико-экономического обоснования (ТЭО) [2-4].

Стоит отметить, что цифровизация является одним из ключевых факторов развития промышленности, направленным на повышение эффективности систем управления и производства, снижение издержек и конкурентоспособности всех производственных процессов в промышленности. Цифровизация, как катализатор, влияет на развитие промышленности и может привести к увеличению производства. Транспортный сектор, который считается одним из ключевых секторов, благодаря цифровизации может удвоить свое развитие. Сегодня цифровизация транспортного сектора в Республике Таджикистан направлена на повышение прозрачности в отрасли, улучшение транспортных процессов и превращение страны в транзитную державу [3-5].

Таблица 3- Процесс цифровизации и ее технологии, которые применяются

Table 3 – Digitalization Processes and Applied Technologies

Операция	Основные способы	Технология работы
Оформление груза	Система управления складом (СУС)	Система управления и регистрация всех товаров, наблюдения и размещения пакетов на складе
Проверка транспорта	Система управления перевозками (СУП)	Разработка маршрута движения внутри логистического центра, управления автопарком
Наблюдение	Интеллектуальные сенсоры	Применение ГЛОНАСС/GPS и датчики давления для наблюдения процесс работы
Документация	Электронные накладные (электронные перевозочные документы) и eTIR (электронная книжка МДП)	Отправка документов онлайн с использованием технологий.
Оценка	Большие наборы данных	Проанализировать грузопотоки, перспективы объёмов на логистических центрах

Цифровизация в транспортно-логистическом секторе Республики Таджикистан охватывает все этапы - от приема до отгрузки товаров, документирования транспортных процессов, таможенного оформления и досмотра импортируемых транспортных средств, а также автоматизацию всех процессов. Сегодня использование информационных технологий и цифровизации в транспортном секторе Республики Таджикистан развивается, и все операционные процессы осуществляются с их помощью. Особенно в грузовых и пассажирских терминалах постепенно продолжается внедрение информационной прозрачности для повышения эффективности и прозрачности. В Республике Таджикистан насчитывается более 17 грузовых терминалов, где операции осуществляются как в электронном, так и в письменном виде. Например, одним из таких терминалов является закрытое акционерное общество «Таджиквнештранс», где успешно внедряется цифровизация. Начиная с приема транспортного средства, товары и продукция обрабатываются посредством кодирования, а также документации. Аналогичный процесс осуществляется и в других терминалах. Как мы уже отмечали, государство и правительство Республики Таджикистан принимают все меры для совершенствования секторов и создания благоприятных условий. В этой связи Министерство транспорта Республики Таджикистан на основании Постановления Правительства Республики Таджикистан от 29 декабря 2022 года № 617 «О создании государственного унитарного предприятия «Центр цифровизации транспортного сектора»» утвердило соответствующее решение. Цель создания данного предприятия – прежде всего, предоставление услуг в электронном виде; снижение коррупционных факторов; сбор точных и прозрачных статистических показателей и искоренение теневой экономики [6-9].

Участие в международных проектах в области транспорта и логистики является одним из способов построения международного сотрудничества, что является главным ключом к развитию логистических и транспортных систем. В последние годы участие страны в международных проектах возросло, что служит введением транспортного сектора страны в международное русло. Примером этого является проект Транскаспийского транспортного коридора, предусматривающий организацию смешанных грузоперевозок из Китайской Народной Республики и Центральной Азии в Исламскую Республику Иран через порт Чабахар [9-10].



Р и с у н о к 2 - Транскаспийский международный транспортный маршрут
Figure 2 – Trans-Caspian International Transport Route

Внедрение элементов международного сотрудничества, а также использование стандартов e-TIR и e-CMR является еще одним важным способом повышения прозрачности, упрощения пересечения границ, внедрения электронной документации и повышения прозрачности процесса

логистического обслуживания. Кроме того, Правительство Республики Таджикистан сотрудничает с рядом организаций и финансовых учреждений, постоянно координируя усилия по реконструкции транспортно-логистической инфраструктуры, созданию таких центров и внедрению информационных технологий и цифровизации управления. Эти инициативы направлены на развитие транспортно-логистических систем, их координацию в международной логистической цепочке и создание благоприятной экономической среды.

Подготовка высококвалифицированных специалистов является еще одним приоритетным и стратегическим фактором развития транспортной инфраструктуры в Республике Таджикистан, способных сыграть свою роль в реализации цифровизации транспортно-логистического сектора. С течением времени и глобализацией транспортных систем растет спрос на современных специалистов, и все большее значение придается опытным и квалифицированным кадрам. Также значительна роль образовательных учреждений в подготовке специалистов в области транспорта и логистики, они готовят специалистов для обеспечения рынка труда, делая их высокопрофессиональными. Одним из таких учреждений является Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, который всесторонне готовит специалистов в области транспорта и логистики. Для дальнейшего укрепления их знаний можно предложить активизировать систему связи науки с производством, тем самым повысив уровень их квалификации и обеспечив им значительную роль в развитии экономики страны.

Заключение (Conclusions)

В условиях развития технологий и оборудования, сокращения трудозатрат, повышения экономического уровня и обеспечения экологической безопасности одним из направлений развития транспортно-логистического сектора сегодня является использование электромобилей и гибридных автомобилей в логистических центрах и терминалах. Как экологически чистый вид транспорта, не использующий топливо, а также обеспечивающий экономию средств, они могут положительно повлиять на деятельность центров. Кроме того, механизация и автоматизация транспортных и грузовых процессов с помощью таких экономически эффективных и экологически чистых видов транспорта могут способствовать развитию предприятия.

Рецензент: Пиров Дж.П. — к.т.н., первый заместитель директора Государственного учреждения «Автомобильный транспорт и логистическое обслуживание»

Литература

1. Низомзода, Ф. Н. Размещение транспортно-логистических центров в Республике Таджикистан и их роль в повышении эффективности работы транспорта / Ф. Н. Низомзода // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2024. – № 3(67). – С. 42-46.
2. Asian Development Bank. Развитие транспортного сектора Таджикистана. – Manila: Asian Development Bank, 2011. – 72 с
3. Рахмангулов, А.Н. Методологические основы организации функционирования железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем [Текст]: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.22.01 / Рахмангулов Александр Нельевич. - Москва, 2012. - 374 с.
4. Азимов, П. Х. Развитие транспортно-логистической инфраструктуры в Республике Таджикистан / П. Х. Азимов // Экономика и менеджмент. – 2017. – Т. 11, № 2. – С. 14–20.
5. Низомзода, Ф.Н. Использование кластерного анализа при размещении транспортно-логистических центров в Хатлонской области (на примере районов Кулябского региона) / Ф. Н. Низомзода // Светоч науки. – 2025. – № 3. – С. 53-56. – EDN JRLXHK
6. Каролина, А.С. Развитие региональной транспортно-логистической системы доставки грузов (на примере Самарской области)
7. Азимов, П. Х. Развитие транспортно-логистической инфраструктуры в Республике Таджикистан / П. Х. Азимов // Экономика и менеджмент. – 2017. – Т. 11, № 2. – С. 14-20.
8. Шарипов, С. Х. Анализ современного состояния и перспектив развития наземной инфраструктуры автотранспорта Республики Таджикистан / С. Х. Шарипов // Государственное управление. – 2022. – № 4/2(59). – С. 143-151.
9. Правительство Республики Таджикистан. Государственная целевая программа развития транспортного комплекса Республики Таджикистан до 2025 года: утверждена постановлением Правительства Республики Таджикистан от 1 апреля 2011 года № 165 (в редакции постановления от 25 октября 2022 года № 518). – Душанбе, 2011.

10. Исмаилова, М.М. Механизм повышения конкурентоспособности региональной транспортной инфраструктуры / М.М. Исмаилова, М.М. Осимова // Учёные записки Худжандского государственного университета имени академика Б. Гафурова. – 2023. – № 4 (67).

References

1. Nizomzoda, F. N. Placement of Transport and Logistics Centers in the Republic of Tajikistan and Their Role in Improving Transport Efficiency / F. N. Nizomzoda // *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*. – 2024. – No. 3(67). – P. 42–46.
2. Asian Development Bank. *Development of the Transport Sector of Tajikistan*. – Manila: Asian Development Bank, 2011. – 72 p.
3. Rakhmangulov, A. N. *Methodological Foundations for Organizing the Operation of Railway Industrial Transport and Technological Systems* [Text]: Abstract of the Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences: Specialty 05.22.01 / Alexander N. Rakhmangulov. – Moscow, 2012. – 374 p.
4. Azimov, P. Kh. Development of Transport and Logistics Infrastructure in the Republic of Tajikistan / P. Kh. Azimov // *Economics and Management*. – 2017. – Vol. 11, No. 2. – P. 14–20.
5. Nizomzoda, F. N. Application of Cluster Analysis in the Placement of Transport and Logistics Centers in Khatlon Region (Based on the Example of the Districts of the Kulob Region) / F. N. Nizomzoda // *The Light of Science*. – 2025. – No. 3. – P. 53–56. – EDN JRLXHK.
6. Karolina, A. S. *Development of a Regional Transport and Logistics System for Freight Delivery (Based on the Example of Samara Region)*. – [Publication details not provided].
7. Azimov, P. Kh. Development of Transport and Logistics Infrastructure in the Republic of Tajikistan / P. Kh. Azimov // *Economics and Management*. – 2017. – Vol. 11, No. 2. – P. 14–20.
8. Sharipov, S. Kh. Analysis of the Current State and Prospects for the Development of Road Transport Infrastructure in the Republic of Tajikistan / S. Kh. Sharipov // *Public Administration*. – 2022. – No. 4/2(59). – P. 143–151.
9. Government of the Republic of Tajikistan. *State Target Program for the Development of the Transport Complex of the Republic of Tajikistan until 2025*: Approved by Resolution No. 165 of the Government of the Republic of Tajikistan dated April 1, 2011 (as amended by Resolution No. 518 dated October 25, 2022). – Dushanbe, 2011.
10. Ismailova, M.M. Mechanism for Increasing the Competitiveness of Regional Transport Infrastructure / M.M. Ismailova, M.M. Osimova // *Scientific Notes of Khujand State University named after Academician B. Gafurov*. – 2023. – No. 4 (67).

Сведения об авторе:

Низомзода Фахридин Низом, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте,» Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2336-9228>. E-mail: fakhridin670@gmail.com

Information about the author:

Nizomzoda Fakhridin Nizom, candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transportation Organization and Transport Management, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2336-9228>. E-mail: fakhridin670@gmail.com

Маълумот оид ба муаллиф:

Низомзода Фахридин Низом, номзади илмҳои техники, дотсент, дотсенти кафедраи ташкили ҳамлу нақл ва идоракунии дар нақлиёт, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осими. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2336-9228>. E-mail: fakhridin670@gmail.com

MATHEMATICAL MODELLING OF TIME-DEPENDENT HEAT FLUX AND TEMPERATURE VARIATION IN A BRAKE DISC DURING BRAKING

¹A. Shermukhamedov, ²U. Rahmatov

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

²Jizzakh Polytechnic Institute, Jizzakh, Uzbekistan

A two-dimensional axisymmetric mathematical model is developed to determine the time-dependent heat flux applied to a brake disc and the resulting temperature variation during braking. The model combines vehicle braking dynamics, the time-dependent decrease in vehicle speed, the relative sliding velocity between the brake disc and pad, and the frictional heat generation rate. The fraction of frictional heat transferred to the disc is estimated using the thermal effusivities of the disc and pad materials. The heat flux acting on the real contact area is converted into an equivalent axisymmetric heat flux while preserving the total thermal power. The temperature field in the brake disc is calculated numerically in MATLAB using the transient heat conduction equation, the initial condition, and convective boundary conditions. In the baseline calculation, the temperature at the selected monitoring point increased from the initial value of 35.0000 °C to 48.3220 °C at 10 s and then decreased to 44.0341 °C at 180 s. The results demonstrate that the developed model can be used to evaluate the relationship between time-dependent thermal loading and temperature variation in the brake disc.

Keywords: brake disc, heat flux, temperature variation, axisymmetric model, sliding velocity, thermal effusivity, heat conduction, MATLAB, braking process.

МОДЕЛСОЗИИ МАТЕМАТИКИИ ҶАРАЁНИ ГАРМИИ ВОБАСТА БА ВАҚТ ВА ТАҒЙИРЁБИИ ҲАРОРАТИ ДИСКИ ТОРМОЗ ҲАНГОМИ ТОРМОЗГИРӢ

¹А.Шермухамедов, ²У. Раҳматов

¹Донишгоҳи давлатии нақлиёти Тошканд, Тошканд, Ўзбекистон

²Донишкадаи политехникии Қиззах, Қиззах, Ўзбекистон

Моделҳои математикӣ дученакаи меҳварсимметрӣ барои муайян намудани ҷараёни гармии вобаста ба вақт, ки ба диски тормоз таъсир мерасонад, ва тағйирёбии ҳарорати он ҳангоми тормозгирӣ таҳия гардид. Модел динамикаи тормозгирӣи автомобил, коҳишёбии суръати ҳаракат бо гузашти вақт, суръати нисбии лағжиш байни диски тормоз ва колодка, инчунин суръати ҳосилшавии гармӣ дар натиҷаи соишро ба ҳам мепайвандад. Ҳиссаи гармии соиш, ки ба диск интиқол меёбад, дар асоси эффузивияти гармии маводи диск ва колодкаи тормоз муайян карда мешавад. Ҷараёни гармие, ки ба масоҳати воқеии тамос таъсир мекунад, бо нигоҳ доштани иқтидори умумии гармӣ ба ҷараёни гармии эквивалентии меҳварсимметрӣ табдил дода мешавад. Майдони ҳарорат дар диски тормоз ба таври ададӣ дар муҳити MATLAB бо истифода аз муодилаи ғайристатсионарии гармигузаронӣ, шартҳои ибтидоӣ ва шартҳои сарҳадии конвективӣ ҳисоб карда мешавад. Дар ҳисоби базавӣ ҳарорат дар нуктаи назоратии интиҳобшуда аз қимати ибтидоии 35,0000 °C то 48,3220 °C дар сонияи 10-ум зиёд гардид, баъдан то 44,0341 °C дар сонияи 180-ум коҳиш ёфт. Натиҷаҳои бадастомада нишон медиҳанд, ки модели таҳияшуда метавонад барои арзёбии робитаи байни сарбории гармии вобаста ба вақт ва тағйирёбии ҳарорати диски тормоз истифода шавад.

Калидвожаҳо: диски тормоз, ҷараёни гармӣ, тағйирёбии ҳарорат, модели меҳварсимметрӣ, суръати лағжиш, эффузивияти гармӣ, гармигузаронӣ, MATLAB, раванди тормозгирӣ.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА И ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОРМОЗНОГО ДИСКА В ПРОЦЕССЕ ТОРМОЖЕНИЯ

¹А. Шермухамедов, ²У. Рахматов

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

²Джизакский политехнический институт, Джизак, Узбекистан

Разработана двумерная осесимметричная математическая модель для определения изменяющегося во времени теплового потока, действующего на тормозной диск и соответствующего изменения его температуры в процессе торможения. Модель объединяет динамику торможения автомобиля, временное снижение скорости движения, относительную скорость скольжения между тормозным диском и колодкой, а также интенсивность тепловыделения вследствие трения. Доля тепла трения, передаваемого тормозному диску, определяется на основе тепловой эффузивности материалов диска и тормозной колодки. Тепловой поток, действующий на фактическую площадь контакта, преобразуется в эквивалентный осесимметричный тепловой поток при сохранении полной тепловой мощности. Температурное поле тормозного диска рассчитывается численно в среде MATLAB на основе нестационарного уравнения теплопроводности с учётом начального условия и конвективных граничных условий. В базовом расчёте температура в выбранной контрольной точке увеличилась с начального значения 35,0000 °C до 48,3220 °C на 10-й секунде, после чего снизилась до 44,0341 °C к 180-й секунде. Полученные результаты показывают, что разработанная модель может быть использована для оценки взаимосвязи между изменяющейся во времени тепловой нагрузкой и изменением температуры тормозного диска.

Ключевые слова: тормозной диск, тепловой поток, изменение температуры, осесимметричная модель, скорость скольжения, тепловая эффузивность, теплопроводность, MATLAB, процесс торможения.

Introduction

During braking, the kinetic energy of the vehicle is converted into thermal energy due to friction between the brake pad and the disc. The heat generated is distributed between the brake disc, the pad surface and the environment. In this case, the heat flux on the surface of the brake disc does not remain constant during braking, since as the vehicle speed decreases, the relative sliding velocity between the disc and the pad also decreases. Therefore, considering the heat flux on the disc surface as a time-dependent quantity allows a more accurate representation of the thermal processes in the brake mechanism.

During braking, the temperature on the disc surface is not uniformly distributed. The formation of the temperature field is affected by the location of the friction zone, the inner and outer radii of the disc, its thickness, the thermal conductivity, density and specific heat capacity of the material, as well as the heat exchange between the disc and the environment. A local increase in temperature in some parts of the disc changes its thermal state and affects the operating conditions of the brake mechanism. Therefore, it is necessary to use a mathematical model to estimate the time and space distribution of heat in the brake disc.

One of the main issues in calculating the temperature of the brake disc is to correctly determine the heat flux on the disc surface. The heat energy generated during friction depends on the contact pressure, the friction coefficient, and the sliding velocity between the disc and the pad. At the same time, only a certain part of the generated heat is transferred to the disc, while the rest is absorbed by the pad lining. When determining the proportion of heat transferred to the disc, it is necessary to take into account the heat absorption and transfer properties of the disc and lining.

During braking, as the vehicle speed and, accordingly, the sliding velocity decrease, the heat flux also changes over time. After braking, new heat input to the disc surface stops, and the processes of internal heat dissipation in the disc and convective cooling with the environment continue. In such conditions, it is necessary to include the time-dependent heat flux in the boundary condition of the heat transfer equation to determine the temperature change in the disc.

The brake disc is geometrically symmetrical with respect to the axis of rotation. Therefore, expressing its temperature distribution in the radial and through-thickness directions using an axisymmetric model allows simplifying the calculation process. In such a model, the disc is considered as a homogeneous and isotropic body, and the heat generated by friction is given as an external heat flux to the friction surface of the disc. Heat transfer from the disc to the environment is taken into account by means of a convective boundary condition.

When using an axisymmetric model, it is required to distribute the heat flux generated on the real pad-disc contact surface equivalently to the surface of the friction ring of the disc. In this case, the equality of the total heat power in the real contact surface and the axisymmetric calculation area must be maintained. This approach allows the heat flux in the real contact area to be included in the two-dimensional radial-thickness calculation model.

The purpose of this study is to determine the time-dependent heat flux on the surface of the brake disc and develop a mathematical model of the temperature change in the disc based on the relationship between braking dynamics, the sliding velocity between the disc and the pad, the heat generated by friction, and the fraction of heat transferred to the disc.

To achieve this objective, the vehicle-speed history and disc-pad sliding velocity are determined, the frictional heat flux and the fraction transferred to the disc are evaluated, the real contact heat flux is transformed into an equivalent axisymmetric load, and the transient heat-conduction problem is solved numerically in MATLAB.

As a result of this study, a single mathematical calculation sequence is formed that relates the braking conditions to the heat flux on the disc surface and the time-dependent temperature field of the disc. The main result of the model is to determine the temperature distribution of the brake disc in the radial and thickness directions over time.

During braking, the kinetic energy of the vehicle is converted into thermal energy due to friction between the disc and the pad. The overall energy balance of the process is expressed as:

$$E_k = \frac{mv_0^2}{2} \quad (1)$$

Here, m — calculated mass of the vehicle, kg; v_0 — speed at the beginning of braking, m/s. Some of the energy produced is absorbed by the brake disc and pad, while the rest is transferred to the environment through convection, radiation, and thermal conduction.

Belhocine and Bouchetara [1] developed a three-dimensional model of solid and ventilated automotive brake discs in ANSYS and showed that the brake mode, geometric structure, and thermophysical properties of the material affect the disc temperature. This study substantiates the need to consider not only the total energy dissipated, but also the disc geometry and cooling conditions when evaluating the temperature state of the brake disc.

Previous studies have employed 1D analytical, 2D axisymmetric, and 3D non-axisymmetric models to investigate thermal processes in brake discs. One-dimensional models allow for a simple and quick assessment of the effect of time-dependent friction loading on temperature, but do not determine the temperature distribution in the radial and circumferential directions of the disc. Three-dimensional models represent the local contact zone and maximum temperature in detail, but require large computational resources. The two-dimensional axisymmetric approach allows for the determination of the temperature field in the radial and thickness directions of the disc with relatively low computational complexity. Therefore, the 2D axisymmetric model was chosen in this study.

Yevtushenko, Kuciej and Topczewska [2] analyzed ten different time profiles of friction force analytically. The results showed that even under the same total energy conditions, the shape of the $q(t)$ function is affected by the surface temperature, the maximum temperature and the temperature gradient along the thickness. Therefore, taking the heat flux on the brake disc as a constant value may not accurately describe the temperature process.

Topczewska, Gerlici and Yevtushenko [3] proposed an analytical model that takes into account the initial increase in contact pressure, the average friction coefficient and the time-dependent speed during a single braking. The model is based on a one-dimensional semi-infinite body problem and is verified with thermocouple results obtained on a full-scale dynamometer stand. This approach confirms that contact pressure, friction coefficient, and time-dependent sliding velocity are key factors governing the thermal load.

Not all frictional heat is transferred to the brake disc. Under ideal thermal contact, the heat partition between the disc and pad can be estimated from their thermal effusivities. Under real contact conditions, however, surface roughness, thermal contact resistance, actual contact area, and pressure non-uniformity may also affect the heat partition [3, 4].

Table 1 – Physical factors considered in thermal models

Source	$q(t)$	Heat distribution in the disc–pad	Convection	Radiation	Experimental investigation
[1]	✓	✓	✓	–	–
[2]	✓	✓	–	–	–
[3]	✓	✓	–	–	✓
[4]	✓	✓	✓	–	–
[5]	✓	–	✓	–	–
[6]	✓	partially	✓	–	✓
[7]	✓	partially	✓	✓	✓
[8]	✓	✓	✓	–	Numerical comparison
Proposed model	✓	✓	✓	–	Next step

Table 1 shows that time-dependent heat flux and convective cooling are considered as the main physical factors in most of the models considered. The heat distribution between the disc and the pad is also considered in most studies, since not all the heat generated during friction is transferred to the disc. Radiative heat transfer is included only in some models, mainly those focused on high temperatures or long-term braking. Since this study considered a single and relatively short braking, the main attention was

paid to the time-dependent friction load, heat distribution between the disc and the pad, and convective cooling. Radiation was not considered in order to simplify the model. Experimental verification is planned for a later stage of the study.

Gao and Lin [4] investigated the non-axisymmetric three-dimensional temperature field of a brake disc by representing the moving pad as a local heat source. Their results showed that the disc temperature varies significantly in the circumferential direction and that local maximum temperatures develop near the friction source, indicating that a 2D axisymmetric model cannot fully reproduce local hot spots. In contrast, Wolff and Kukulski [6] applied a two-dimensional axisymmetric transient thermal model using the finite element method and validated the results against full-scale dynamometer data, demonstrating that this approach can effectively determine temperature variations in the radial and thickness directions of the disc with considerably lower computational cost. Wu et al. [7] also employed a symmetric two-dimensional formulation based on the barycentric rational interpolation collocation method and additionally considered radiative heat transfer together with convection. Overall, 2D axisymmetric models provide a practical balance between computational efficiency and the ability to describe the principal radial and through-thickness temperature variations in a brake disc. However, because circumferential variations are neglected, such models are inherently limited in predicting moving local heat sources, non-uniform circumferential temperature fields, and local hot spots that can be captured more accurately by three-dimensional non-axisymmetric models.

In local and regional studies, Inagamov et al. [8] investigated temperature and thermal stresses in a railway wheel–shoe braking system using COMSOL, demonstrating the importance of contact pressure, velocity, and material properties in thermal calculations. Tilavov [9] discussed the conversion of kinetic energy into heat in automotive braking systems, although a time-dependent spatial thermal model was not developed.

Previous studies have demonstrated the effectiveness of analytical, two-dimensional axisymmetric, and three-dimensional non-axisymmetric approaches for analysing thermal processes in braking systems. However, the principal components of the braking process, including vehicle deceleration, time-dependent sliding velocity, frictional heat generation, heat partition between the disc and pad, and transient heat conduction in the disc, are often considered separately or under simplified thermal loading conditions. Furthermore, although three-dimensional models can reproduce circumferential temperature non-uniformity and local hot spots, they require substantially greater computational resources.

In the present study, these physical processes are integrated within a unified two-dimensional axisymmetric mathematical model. The model links vehicle braking dynamics with the time-dependent disc–pad sliding velocity and frictional heat generation, accounts for heat partition between the disc and pad on the basis of their thermal effusivities, and converts the heat flux acting over the actual contact area into an equivalent axisymmetric heat flux while preserving the total thermal power. The resulting transient temperature field is then determined numerically from the heat conduction equation with convective boundary conditions. This approach provides a computationally efficient framework for evaluating the relationship between time-dependent thermal loading and the radial and through-thickness temperature variation of the brake disc, while acknowledging that local circumferential hot spots are beyond the scope of the axisymmetric formulation.

Materials and methods

Physical scheme of the mathematical model and accepted assumptions

During braking, the kinetic energy of the vehicle is converted into thermal energy due to the friction between the brake disc and the pad. Part of the heat generated is transferred to the disc, part to the pad, and the rest is transferred to the environment. The heat flux on the disc surface changes over time as the speed decreases during braking.

The physical sequence of the model is expressed as follows:

$$E_k \rightarrow P_f(t) \rightarrow q_{\text{real}}(t) \rightarrow q_{\text{axi}}(t) \rightarrow T(r, z, t) \quad (2)$$

Here:

- E_k — initial kinetic energy of the car, J;
- $P_f(t)$ — Power of the friction, W;

- $q_{\text{real}}(t)$ — heat flux on the real disc-pad contact surface, W/m²;
- $q_{\text{axi}}(t)$ — equivalent heat flux to be included in the axisymmetric model, W/m²;
- $T(r, z, t)$ — Time-dependent temperature field on the brake disc, °C.

Computational domain

The brake disc is considered as a hollow cylinder with an inner radius R_i , an outer radius R_o and a total thickness of $2b$. The calculation area:

$$R_i \leq r \leq R_o, \quad -b \leq z \leq b, \quad t \geq 0 \quad (3)$$

is determined in the intervals.

Here:

- r — radial coordinate, m;
- z — coordinate by disc thickness, m;
- b — half-thickness of the disc, m;
- t — time, s.

The heat flux applied to the disc surface is distributed over time in the radial and thickness directions.

In the axisymmetric approach, the temperature change along the circular coordinate is not taken into account:

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \quad (4)$$

Therefore, the general three-dimensional:

$$T = T(r, \theta, z, t) \quad (5)$$

The temperature field is represented in the following two-dimensional form:

$$T = T(r, z, t) \quad (6)$$

This simplification serves to determine the equivalent temperature distribution along the friction ring of the disc. The model calculates the temperature field in the radial and through-thickness directions, rather than local circumferential hot spots.

Assumptions Adopted in the Model

The main assumptions adopted in formulating the model are presented in Table 2.

Table 2 – Key assumptions made in the mathematical model

№	Assumption	Mathematical expression or content	Impact on the model
1	The disc is homogeneous and isotropic	$k_d, \rho_d, c_d = \text{const}$	Properties are assumed to be the same in all directions
2	There is no volumetric heat source inside the disc	$\dot{q}_v = 0$	Heat is introduced only through the surface
3	The model is axisymmetric	$\partial T / \partial \theta = 0$	Unevenness in the circumferential direction is not taken into account
4	The contact pressure is represented by an average value	$p(t) \approx p_{\text{eq}}$	Real pressure fluctuations are averaged
5	The speed decreases linearly during braking	$v(t) = v_0 - at$	Heat flux decreases with time
6	Heat is partitioned between the disc and the brake-pad lining	$q_d(t) = \eta_d q_f(t)$	Only a part of the generated heat is transferred to the disc
7	The actual contact heat flux is distributed equivalently over the friction annulus	$q_{\text{real}} A_c = q_{\text{axi}} A_{\text{ann}}$	Total thermal power is conserved
8	The cooling is represented by convection	$q_{\text{conv}} = h(T - T_{\infty})$	Heat loss from the disc to the environment is taken into account
9	No new heat is introduced after braking is over	$q(t) = 0, t > t_b$	In the next stage, only diffusion and cooling continue

The assumption that the disc is considered a homogeneous and isotropic body, that there is no internal volumetric heat source, and that frictional heat is given in the form of an external surface load is consistent with the initial model assumptions.

Energy transfer in the brake disc

The initial kinetic energy of the car during braking is:

$$E_k = \frac{mv_0^2}{2} \quad (7)$$

Here, m — effective vehicle mass, kg; v_0 — speed at the beginning of braking, m/s.

This energy is distributed among all the braking mechanisms of the car, the resistive forces, and the disc and the pad. Therefore, the value of E_k cannot be directly equated to the thermal energy entering a single brake disc. In this model, the heat transferred to the disc is determined not from the total kinetic energy of the car, but from the friction force at the disc-pad contact.

The total energy balance of the brake disc is:

$$\frac{dU_d}{dt} = \dot{Q}_{in}(t) - \dot{Q}_{conv}(t) \quad (8)$$

written as above. Here, U_d — internal energy stored in the disc; $\dot{Q}_{in}$ — heat energy entering the disc through friction; $\dot{Q}_{conv}$ — the heat energy convectively transferred from the disc surface to the surroundings.

Thermal conductivity within the disc is not an energy loss, but a redistribution of heat in the radial and thickness directions. Therefore, it is not separately isolated in the overall energy balance of the disc, but is taken into account in the heat conduction equation.

Thus, the heat transferred to the disc is determined not directly from the total kinetic energy of the car, but through the friction force at the disc-pad contact.

Braking dynamics and sliding velocity determination

The heat flux on the disc surface depends on the tangential sliding velocity of the disc relative to the pad. Therefore, the average deceleration of the vehicle, the duration of braking, and the change in speed over time are initially determined. In this model, the calculation was organized in the sequence of first determining the braking distance and average deceleration, then the vehicle speed and the sliding velocity between the disc and the pad.

Average deceleration and braking duration

Let the car travel the braking distance from the initial speed v_0 until it comes to a complete stop. Here, the braking distance is the distance traveled from the moment the brake mechanism is activated until the car stops, not the driver reaction distance.

On a flat road and assuming a constant average deceleration:

$$v^2 = v_0^2 - 2aS \quad (9)$$

Since $v = 0$ at the end of braking:

$$a = \frac{v_0^2}{2S} \quad (10)$$

Here, a — average deceleration of the car, m/s².

Braking duration:

$$t_b = \frac{v_0}{a} \quad (11)$$

or considering expression (10):

$$t_b = \frac{2S}{v_0} \quad (12)$$

Change in car speed over time

It is assumed that the vehicle speed decreases linearly during braking:

$$v(t) = \begin{cases} v_0 - at, & 0 \leq t \leq t_b, \\ 0, & t > t_b. \end{cases} \quad (13)$$

This simplification represents the time-varying average of the real deceleration. A linear decrease in speed is also assumed in this mathematical model.

Angular velocity of the disc

The model does not lock the wheel during braking and does not take into account the longitudinal sliding of the tire relative to the road. In such conditions:

$$v(t) = \omega_w(t)R_w \quad (14)$$

Here, $\omega_w(t)$ — angular velocity of the wheel, rad/s; R_w — effective radius of the wheel, m. Since the brake disc is kinematically connected to the wheel hub:

$$\omega_d(t) = \omega_w(t) = \frac{v(t)}{R_w} \quad (15)$$

From this:

$$\omega_d(t) = \begin{cases} \frac{v_0 - at}{R_w}, & 0 \leq t \leq t_b, \\ 0, & t > t_b. \end{cases} \quad (16)$$

If a wheel locks or there is significant tire slip, the relationship $v = \omega_w R_w$ will be broken. This situation is not included in the scope of this simplified model.

Average friction radius

The tangential velocity of the disc surface depends on the radial coordinate:

$$v_r(r, t) = \omega_d(t)r \quad (17)$$

The average friction radius R_m is used to express the velocity in the contact zone with a single value. When the contact pressure is assumed to be uniformly distributed in the radial direction:

$$R_m = \frac{2 R_{f,o}^3 - R_{f,i}^3}{3 R_{f,o}^2 - R_{f,i}^2} \quad (18)$$

Here $R_{f,i}$ and $R_{f,o}$ — inner and outer radii of the friction ring.

If R_m is previously determined based on the actual geometry of the brake disc and pad, this value is used in the numerical model.

Disc-pad sliding velocity

When the pad is considered stationary and the disc is in rotational motion, the tangential sliding velocity of the disc friction surface relative to the pad is:

$$v_s(t) = \omega_d(t)R_m \quad (19)$$

Considering expression (17):

$$v_s(t) = \frac{R_m}{R_w} v(t) \quad (20)$$

and during braking:

$$v_s(t) = \frac{R_m}{R_w} (v_0 - at), \quad 0 \leq t \leq t_b \quad (21)$$

The complete time-dependent function is:

$$v_s(t) = \begin{cases} \frac{R_m}{R_w} (v_0 - at), & 0 \leq t \leq t_b, \\ 0, & t > t_b. \end{cases} \quad (22)$$

At the beginning of braking:

$$v_s(0) = \frac{R_m}{R_w} v_0 \quad (23)$$

and at the end of braking:

$$v_s(t_b) = 0 \quad (24)$$

Determining the average friction radius on the disc and the sliding velocity through the wheel radius is one of the key steps in the model.

Determining time-dependent heat flux

The friction force generated at the disc-pad contact depends on the contact pressure, the coefficient of friction, and the sliding velocity. The normal force acting on the pad and the friction force are:

$$N = p_{eq} A_c, \quad P_f(t) = \mu p_{eq} A_c v_s(t) \quad (25)$$

Here, p_{eq} — average equivalent contact pressure; A_c — disc-pad contact surface; μ — coefficient of friction.

Only η_d part of the heat generated by friction is transferred to the disc. Therefore, the heat flux on the real contact surface is:

$$q_{real}(t) = \eta_d \mu p_{eq} v_s(t) \quad (26)$$

Substituting the sliding velocity obtained in the previous section gives:

$$q_{real}(t) = \begin{cases} \eta_d \mu p_{eq} \frac{R_m}{R_w} (v_0 - at), & 0 \leq t \leq t_b, \\ 0, & t > t_b \end{cases} \quad (27)$$

is obtained. Therefore, as the speed decreases during braking, the heat flux also decreases linearly, and when braking is over, no new frictional heat enters the disc. In this study, the heat flux is determined by the fraction of heat transferred to the disc, the contact pressure, the coefficient of friction, and the time-dependent sliding velocity.

When the disc and the pad are considered as semi-infinite bodies in ideal thermal contact, the fraction of heat transferred to the disc is estimated by the thermal effusivity of the materials:

$$e = \sqrt{k\rho c}, \quad \eta_d = \frac{e_d}{e_d + e_p} \quad (28)$$

Here, k , ρ and c — thermal conductivity of the material, density and specific heat capacity; e_d and e_p — thermal effusivity of the disc and pad. This assessment is based on the assumption of ideal contact and does not directly take into account the thermal resistance of contact and surface roughness in real conditions.

In a real brake system, the pad is in contact with only a limited part of the disc circumference. In an axisymmetric model, the heat flux is distributed over the entire friction ring. In this study, A_c denotes the total nominal contact area of the pads on both sides of the disc, and A_{ann} denotes the total surface area of the friction rings on both sides of the disc. If the nominal contact area of one pad is A_p , then for a double-sided disc brake, $A_c = 2A_p$ is taken. From the condition of conservation of total heat energy:

$$q_{real}(t) A_c = q_{axi}(t) A_{ann} \quad (29)$$

$$q_{axi}(t) = \frac{A_c}{A_{ann}} q_{real}(t) \quad (30)$$

where is the total area of the two friction surfaces:

$$A_{ann} = 2\pi(R_{f,o}^2 - R_{f,i}^2) \quad (31)$$

As a result, the heat flux introduced into the axisymmetric model is:

$$q_{\text{axi}}(t) = \begin{cases} \frac{A_c}{A_{\text{ann}}} \eta_d \mu p_{\text{eq}} \frac{R_m}{R_w} (v_0 - at), & 0 \leq t \leq t_b, \\ 0, & t > t_b \end{cases} \quad (32)$$

This equivalence adapts the loading to the axisymmetric calculation domain while conserving the total thermal power over the actual contact area.

The determined function $q_{\text{axi}}(t)$ is introduced into the boundary condition of the heat transfer equation in the brake disc in the next step.

Mathematical model of heat conduction in the brake disc

In the axisymmetric approach, the disc temperature depends on the radial coordinate, the thickness coordinate, and time:

$$T = T(r, z, t) \quad (33)$$

Assuming that the disc is homogeneous and isotropic, and that there is no volumetric heat source inside it, the unsteady heat transfer equation is expressed as follows:

$$\rho_d c_d \frac{\partial T}{\partial t} = k_d \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (34)$$

where k_d , ρ_d and c_d are the thermal conductivity, density, and specific heat capacity of the disc material, respectively. This equation describes the temperature change in the radial and thickness directions of the disc.

Computational domain:

$$R_i \leq r \leq R_o, \quad -b \leq z \leq b \quad (35)$$

is taken in the range. Here R_i and R_o are the inner and outer radius of the disc, and $2b$ is its total thickness.

The assumption of the disc as a hollow cylinder is consistent with the initial model.

The heat transfer on the disc surface is expressed by a single general boundary condition:

$$k_d \frac{\partial T}{\partial n} = q_s(r, t) - h(T - T_\infty) \quad (36)$$

here n — external normal direction of the surface; h — convective heat transfer coefficient; T_∞ — ambient temperature.

Surface heat flux:

$$q_s(r, t) = \begin{cases} q_{\text{axi}}(t), & R_{f,i} \leq r \leq R_{f,o}, \\ 0, & \text{"outside the friction zone"}. \end{cases} \quad (37)$$

Thus, in the friction ring, heat input to the disc and convective cooling are taken into account together. On the remaining surfaces, only convective heat exchange with the environment occurs. In the model, the time-dependent heat flux and convective cooling are given by a single boundary condition.

Initial condition:

$$T(r, z, 0) = T_0 \quad (38)$$

is taken as, where T_0 is the disc temperature before the start of braking.

After braking is complete:

$$q_{\text{axi}}(t) = 0, \quad t > t_b \quad (39)$$

and only internal heat dissipation and convective cooling continue in the disc.

As a result, the mathematical problem consists of the following system:

$$\boxed{\begin{aligned} \rho_d c_d \frac{\partial T}{\partial t} &= k_d \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \\ k_d \frac{\partial T}{\partial n} &= q_s(r, t) - h(T - T_\infty), \\ T(r, z, 0) &= T_0. \end{aligned}} \quad (40)$$

This system is introduced with $q_{\text{axi}}(t)$, which was determined in the section on determining the time-dependent heat flux, and the disc:

$$T(r, z, t)$$

is the temperature field. This equation was solved numerically in MATLAB.

The formulated mathematical problem is solved numerically in the MATLAB program in the next section.

Numerical solution algorithm in MATLAB

The heat transfer equation is solved numerically in MATLAB. In this case, a two-dimensional, axisymmetric model of the disc section is assumed and discretized in the radial and thickness directions:

$$r_i = R_i + (i - 1)\Delta r, \quad z_j = -b + (j - 1)\Delta z \quad (41)$$

$$\Delta r = \frac{R_o - R_i}{N_r - 1}, \quad \Delta z = \frac{2b}{N_z - 1} \quad (42)$$

here N_r and N_z — number of nodes by radius and thickness.

According to the initial condition, at the initial time of the calculation, the temperature is assumed to be uniform throughout the entire cross section of the disc and equal to:

$$T_{i,j}^0 = T_0 \quad (43)$$

At each time step, the vehicle speed and the sliding velocity between the disc and pad are first determined, after which the time-dependent axisymmetric heat flux $q_{\text{axi}}(t)$ is calculated. This heat flux is applied only to the surface nodes located within the disc-pad contact region. Once braking is completed, no additional frictional heat is introduced, and only internal heat conduction and convective cooling are considered.

The axisymmetric heat flux is applied only to the surface nodes located within the friction annulus:

$$R_{f,i} \leq r \leq R_{f,o}$$

When the braking is over, i.e. when $t > t_b$, the new heat input is stopped and only the heat dissipation and convective cooling inside the disc are continued in the calculation. The calculation in the model is also organized in the same order.

During the calculation, the velocity, sliding velocity and heat flux are updated at each time step, and then the temperature values at the disc nodes are calculated. As a result, the time-dependent temperature field along the disc and the temperature change at the selected control point are obtained.

Thus, the numerical solution establishes the following computational relationship:

$$q_{\text{axi}}(t) \rightarrow T(r, z, t)$$

Baseline computational conditions

To demonstrate the application of the developed mathematical model, a single baseline case corresponding to a metal-based brake lining was adopted. This calculation was not performed to compare materials, but to demonstrate the time-dependent thermal load and temperature change in the brake disc.

Table 3 – Main parameters used in the baseline calculation

Parameter	Symbol	Value
Initial speed	v_0	16.66 m/s
Ratio of average friction radius to wheel radius	R_m/R_w	0.32334
Initial sliding velocity	$v_s(0)$	5.3869 m/s
Fraction of heat transferred to the disc	η_d	0.8226
Combined area of the two friction annuli	A_{ann}	0.05485 m ²
Surface equivalence coefficient	k_A	0.07384
Initial disc temperature	T_0	35 °C
Calculation duration	t_{max}	180 s

The principal parameters adopted for the baseline case are listed in Table 3: $\eta_d = 0.8226$, $R_m/R_w = 0.32334$, $v_s(0) = 5.3869$ m/s, $A_{\text{ann}} = 0.05485$ m² and $k_A = 0.07384$.

Thermophysical properties of metal-based brake-pad lining:

$$k_p = 5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}, \quad \rho_p = 1400 \text{ kg/m}^3, \quad c_p = 1000 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

These values are used to determine the fraction of heat transferred to the disc based on thermal effusivity.

Based on the adopted parameters, the initial heat flux on the real contact surface is:

$$q_{\text{real},0} = 5.5834 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

The initial equivalent heat flux introduced into the axisymmetric model is:

$$q_{\text{axi},0} = 4.1230 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

The calculation was performed for 180 s. The heat flux was applied only to the friction zone of the disc during braking, after which heat dissipation and convective cooling within the disc were taken into account. The temperature change over time was recorded at the monitoring point P4 on the disc surface.

Results

Based on the adopted baseline parameters and the time-dependent heat flux, the temperature change in the brake disc was calculated. During braking, the heat flux decreased with speed and became zero at $t = t_b$. After that, no new heat was introduced into the disc, and the temperature change was determined by heat dissipation and convective cooling within the disc.

Table 4 – Temperature change over time at monitoring point P4

Time, s	Temperature, °C
0	35.0000
10	48.3220
20	47.5079
30	47.0000
60	45.8872
90	45.1304
120	44.6201
180	44.0341

The change in temperature over time at monitoring point P4 is graphically presented in Figure 1.

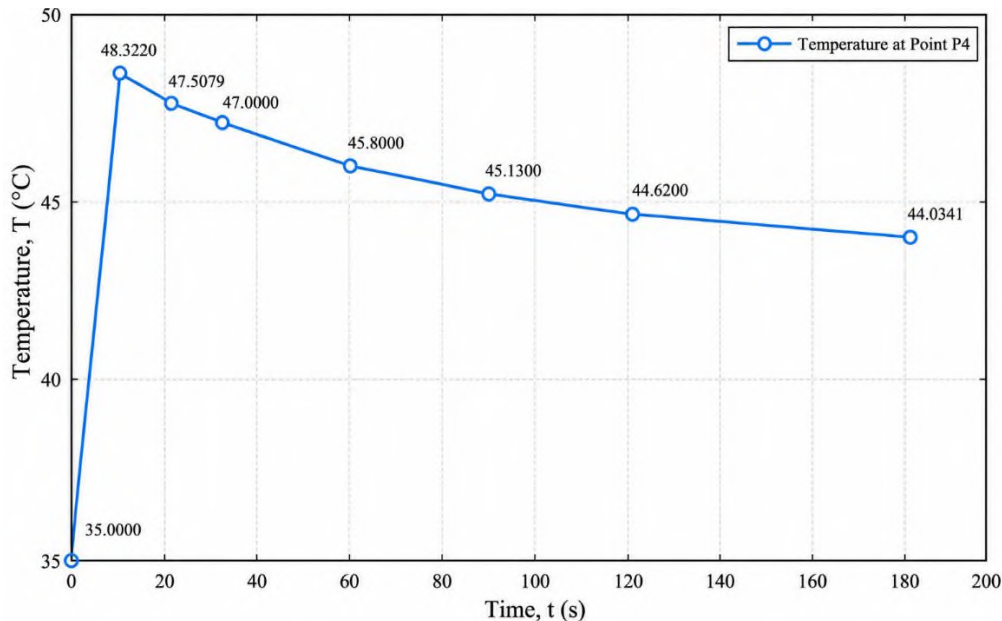


Figure 1 – Temperature variation over time at monitoring point P4 for a metal-based brake lining

Figure 1 shows that the temperature at monitoring point P4 increased from 35.0000 °C to 48.3220 °C in the first 0–10 seconds. At subsequent selected time points, the temperature was 47.5079 °C at 20 seconds, 47.0000 °C at 30 seconds, and then decreased steadily. At 180 seconds, the temperature at the control point was 44.0341 °C.

The highest calculated temperature at the selected time points was observed at 10 seconds. Temperature increase compared to the initial temperature:

$$\Delta T_{10} = T_{10} - T_0 = 48.322 - 35 = 13.322 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperature drop between 10–180 seconds:

$$\Delta T_{10-180} = T_{10} - T_{180} = 48.3220 - 44.0341 = 4.2879 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

At the end of the calculation, the difference between the temperature at 180 seconds and the initial temperature is:

$$\Delta T_{0-180} = T_{180} - T_0 = 44.0341 - 35.000 = 9.0341 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Thus, at the end of the calculation, it was determined that the disc temperature increased by 9.0341 °C compared to the initial state.

The results obtained show that time-dependent thermal loading leads to an increase in the disc temperature, and after the loading is completed, the temperature decreases due to heat dissipation and convective heat exchange within the disc.

Discussions

The baseline calculation results showed that the heat flux on the disc varies depending on the vehicle speed. In the adopted linear deceleration model, the sliding velocity and the associated axisymmetric heat flux decrease during braking and become zero at the end of braking. This result is consistent with the formulated mathematical relationships.

The temperature at monitoring point P4 increased from 35.0000 °C to 48.3220 °C in the first 0–10 seconds. In the subsequent time interval, the temperature decreased and was 47.5079 °C at 20 seconds, 47.0000 °C at 30 seconds, and 44.0341 °C at 180 seconds. Thus, at the selected time points, an initial heating and then a cooling process were observed. At the end of the calculation, at 180 seconds, the disc temperature was 9.0341 °C higher than the initial value.

The obtained values are related to the selected baseline parameters, the assumed thermophysical properties and the model assumptions. The two-dimensional axisymmetric model takes into account the radial and thickness heat dissipation in the disc, but does not reflect the local temperature irregularities in the circumferential direction. This is due to the fact that the heat flux on the real contact surface is distributed equivalently over the entire friction ring.

The contact pressure, friction coefficient and thermophysical properties of the materials are taken as constant effective parameters in the model. The contact thermal resistance, surface roughness and temperature-dependent changes in the parameters are not taken into account separately. Therefore, the model does not serve to fully represent all local processes in a real brake mechanism, but to evaluate the main connection between the time-dependent heat flux and the temperature change in the disc.

Thus, in the basic calculation, the temperature change corresponding to the assumed physical connections and boundary conditions of the model was obtained. The developed model can serve as a theoretical basis for comparison with further experimental results and for assessing the influence of key parameters on disc temperature.

Conclusion

In this study, a two-dimensional axisymmetric mathematical model was developed to determine the time-dependent heat flux acting on the brake disc and the temperature field on the disc during braking.

The model determined the vehicle deceleration, the time-dependent speed change, and the sliding velocity between the disc and the pad based on the braking distance. The heat flux generated by friction was expressed in terms of the heat transfer fraction to the disc, the contact pressure, and the friction coefficient. The heat flux on the real contact surface was adapted to the axisymmetric friction ring while conserving the total thermal power.

The temperature field on the disc was calculated numerically in MATLAB based on the transient heat-conduction equation, initial conditions, and convective boundary conditions. In the baseline calculation, the initial temperature at the monitoring point P4 was 35.0000 °C and increased to 48.3220 °C at the 10th second. The temperature decreased in the next time interval, reaching 44.0341 °C at 180 seconds. The temperature decrease in the period from 10 to 180 seconds was 4.2879 °C, and at the end of the calculation, the temperature was found to be 9.0341 °C higher than the initial value. The results

showed that it is possible to estimate the relationship between the time-dependent thermal load and the temperature change in the brake disc under the conditions of the adopted model. The developed model can serve as a basis for theoretical studies of the influence of the main parameters on the temperature field in the disc and for comparison with subsequent experimental results.

Reviewer: R.A. Davlatshoev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of “Automobile Transport Operation”, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi.

Reference

1. Belhocine, A. Thermal analysis of a solid brake disc / A. Belhocine, M. Bouchetara // Applied Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 32. – P. 59–67. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.08.029.
2. Yevtushenko, A. Analytical model for investigation of the effect of friction power on temperature in the disc brake / A. Yevtushenko, M. Kuciej, K. Topczewska // Advances in Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 9, No. 12. – DOI: 10.1177/1687814017744095.
3. Topczewska, K. Analytical model of the frictional heating in a railway brake disc at single braking with experimental verification / K. Topczewska, J. Gerlici, A. Yevtushenko // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 19. – Art. 6821. – DOI: 10.3390/ma15196821.
4. Gao, C.H. Transient temperature field analysis of a brake in a non-axisymmetric three-dimensional model / C.H. Gao, X.Z. Lin // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 129, No. 1–3. – P. 513–517. – DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00622-2.
5. Adamowicz, A. Influence of convective cooling on a disc brake temperature distribution during repetitive braking / A. Adamowicz, P. Grzes // Applied Thermal Engineering. – 2011. – Vol. 31, No. 14–15. – P. 2177–2185. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.05.016.
6. Wolff, A. Numerical and experimental analysis of the heat transfer process in a railway disc brake tested on a dynamometer stand / A. Wolff, J. Kukulski // Open Engineering. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – Art. 20220466. – DOI: 10.1515/eng-2022-0466.
7. Wu, B. Numerical simulation of the temperature in a train brake disc using the barycentric rational interpolation collocation method / B. Wu, Y. Zhuo, L. Yao, Q. Shen, G. Xiao, Z. Wang // Lubricants. – 2024. – Vol. 12, No. 10. – Art. 335. – DOI: 10.3390/lubricants12100335.
8. Inagamov, S.G. Analysis of the Distribution of Thermal Stresses in Three-Section Brake Shoes of Freight Cars During Motion / S.G. Inagamov, Sh.B. Dzhabbarov, B.A. Abdullaev // Izvestiya TransSiba. – 2022. – No. 3 (51). – P. 63–71. [in Russian].
9. Tilavov, D.S. The Process of Heat Generation in an Automobile Braking System and Its Effect on Materials / D.S. Tilavov // Science and Innovation in the Education System. – 2026. – Vol. 5, No. 3. – P. 55–58.

Сведения об авторах:

Шермухамедов Абдулазиз Азизович, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильной и производственной инженерии, Ташкентский государственный транспортный университет. ORCID: 0000-0002-1119-4053. E-mail: sheraziz@mail.ru.

Рахматов Уткиржон, докторант Ташкентского государственного транспортного университета, старший преподаватель кафедры «Инженерия транспортных средств» Джизакского политехнического института. ORCID: 0000-0003-2329-2256. E-mail: magicutkir2992@gmail.com.

Маълумот оид ба муаллифони:

Шермухамедов Абдулазиз Азизович, доктори илмҳои техники, профессори кафедраи муҳандисии автомобилӣ ва истеҳсоли, Донишгоҳи давлатии нақлиёти Тошканд. ORCID: 0000-0002-1119-4053. E-mail: sheraziz@mail.ru.

Рахматов Уткиржон, докторанти Донишгоҳи давлатии нақлиёти Тошканд, омӯзгори калони кафедраи «Муҳандисии воситаҳои нақлиёт»-и Донишқадаи политехникии Ҷиззах. ORCID: 0000-0003-2329-2256. E-mail: magicutkir2992@gmail.com.

Information about the authors:

Abdulaziz A. Shermukhamedov, DSc (Engineering), Professor, Department of Automotive and Manufacturing Engineering, Tashkent State Transport University. ORCID: 0000-0002-1119-4053. E-mail: sheraziz@mail.ru.

Utkirjon Rakhmatov, PhD Candidate at Tashkent State Transport University, Senior Lecturer, Department of Vehicle Engineering, Jizzakh Polytechnic Institute. ORCID: 0000-0003-2329-2256. E-mail: magicutkir2992@gmail.com.

УРОВНИ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМИ АКТИВАМИ: ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ

С.Б. Мирзозода

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье рассмотрены теоретические и прикладные аспекты управления дорожными активами автомобильных дорог с учетом современных требований к организации содержания, ремонта и планирования развития дорожной инфраструктуры. Обосновано, что в современных условиях объектом управления целесообразно рассматривать дорожные активы, включающие дорожную сеть, дорожные одежды, мосты и водопропускные сооружения, элементы обустройства, а также данные инвентаризации, диагностики и мониторинга. Систематизированы сетевой, программный, проектный и эксплуатационный уровни управления, определены их основные функции, используемые данные и характер принимаемых решений. Особое внимание уделено роли диагностики технического состояния дорог, цифровой паспортизации, ГИС, автоматизированных банков данных и мониторинга в информационном обеспечении управленческих процессов. Рассмотрена необходимость перехода от реактивного устранения дефектов к превентивному управлению дорожными активами на протяжении их жизненного цикла. Показано, что при ограниченных финансовых ресурсах приоритизация мероприятий должна учитывать фактическое состояние объектов, прогноз деградации, транспортную значимость, риски, стоимость работ и последствия отсрочки ремонта. Сделан вывод о необходимости формирования интегрированной системы управления дорожными активами, обеспечивающей взаимосвязь диагностики, планирования, финансирования, реализации мероприятий и последующего мониторинга результатов.

Ключевые слова: автомобильные дороги, дорожные активы, жизненный цикл, диагностика состояния, ремонт и содержание, ГИС, мониторинг.

САТҲИ ИДОРАКУНИИ ДОРОИҲОИ РОҲ: ҶАНБАҲОИ ТАШКИЛӢ, ТЕХНИКӢ ВА ИТТИЛООТӢ

С.Б. Мирзозода

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола ҷанбаҳои назариявӣ ва амалии идоракунии дороиҳои роҳ бо дарназардошти талаботи муосир ба ташкили нигоҳдорӣ, таъмир ва банақшагирии рушди инфрасохтори роҳ баррасӣ шудаанд. Асоснок карда шудааст, ки дар шароити муосир ҳамчун объекти идоракунии баррасӣ намудани дороиҳои роҳ мувофиқ мебошад, ки шабакаи роҳҳо, либоси роҳ, кӯпрукҳо ва иншооти обгузар, унсурҳои ободонии роҳ, инчунин маълумоти инвентаризатсия, ташхис ва мониторингро дар бар мегиранд. Сатҳҳои шабакавӣ, барномавӣ, лоиҳавӣ ва истифодабарии идоракунии ба низом дароварда шуда, вазифаҳои асосӣ, маълумоти истифодашаванда ва хусусияти қарорҳои қабулшаванда муайян гардидаанд. Ба нақши ташхиси ҳолати техникии роҳҳо, шиносномакунонии рақамӣ, СИҶ (ГИС), бонкҳои автоматикунонидашудаи маълумот ва мониторинг дар таъмини иттилоотии раванди идоракунии диққати махсус дода шудааст. Зарурати гузариш аз бартарафсозии реактивии нуксонҳо ба идоракунии пешгирикунандаи дороиҳои роҳ дар тамоми давраи хизмати онҳо баррасӣ шудааст. Нишон дода шудааст, ки дар шароити маҳдудияти захираҳои молиявӣ афзалиятбандии чорабиниҳо бояд ҳолати воқеии объектҳо, пешгӯии фарсудашавӣ, аҳамияти нақлиётӣ, хавфҳо, арзиши корҳо ва оқибатҳои ба таъхир гузоштани таъмиро ба назар гирад. Хулоса шудааст, ки ташаққули низоми ҳамгирошудаи идоракунии дороиҳои роҳ зарур буда, он бояд робитаи мутақобилаи ташхис, банақшагирӣ, маблағгузорӣ, иҷрои чорабиниҳо ва мониторинги минбаъдаи натиҷахоро таъмин намояд.

Калидвожаҳо: роҳҳои автомобилгард, дороиҳои роҳ, давраи хизмат, ташхиси ҳолат, таъмир ва нигоҳдорӣ, СИҶ (ГИС), мониторинг.

ROAD ASSET MANAGEMENT LEVELS: ORGANIZATIONAL, TECHNICAL AND INFORMATIONAL ASPECTS

S.B. Mirzozoda

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

The article examines theoretical and applied aspects of road asset management, taking into account modern requirements for organizing maintenance, repair, and planning the development of road infrastructure. It is substantiated that, under current conditions, road assets should be considered the appropriate object of management, including the road network, pavements, bridges and drainage structures, roadside facilities, as well as inventory, diagnostic, and monitoring data. Network, program, project, and operational management levels are systematized, and their main functions, information inputs, and types of management decisions are identified. Particular attention is paid to the role of road condition diagnostics, digital road passports, GIS, automated data banks, and monitoring in supporting management processes with reliable information. The need to move from reactive defect elimination to preventive road asset management throughout the asset life cycle is considered. It is shown that, under limited financial resources, prioritization should take into account actual asset condition, deterioration forecasts, transport significance, risks, work costs, and the consequences of postponing repairs. The article concludes that an integrated road asset management system is required to ensure consistent links among diagnostics, planning, financing, implementation of interventions, and subsequent monitoring of results.

Keywords: highways, road assets, life cycle, condition diagnostics, repair and maintenance, GIS, monitoring.

Введение (*Introduction*)

Развитие транспортной инфраструктуры выступает одним из базовых условий экономического роста, территориальной связности и социальной устойчивости государства. В этой системе автомобильные дороги выполняют не только транспортную, но и стратегическую функцию, обеспечивая доступ населения и хозяйствующих субъектов к рынкам, услугам, промышленным и сельскохозяйственным центрам. Однако сама по себе протяжённость сети не гарантирует качества транспортного обслуживания. Ключевое значение приобретает способность отрасли поддерживать дороги в работоспособном и безопасном состоянии на протяжении всего жизненного цикла [1, 3, 4, 8, 13].

В связи с этим в научной и управленческой практике всё более широко используется понятие управления дорожными активами. В отличие от традиционного подхода, ориентированного преимущественно на учет протяженности дорог и выполнение отдельных ремонтных работ, система управления дорожными активами рассматривает дорогу как совокупность взаимосвязанных материальных и информационных элементов, обладающих стоимостью, состоянием, сроком службы и потребностью в управленческих воздействиях. Такой подход предполагает увязку технических, экономических и организационных решений, а также их опору на достоверные данные диагностики, прогнозирования и оценки эффективности [2, 4, 5, 8].

Современные международные документы в области управления активами подчеркивают, что управление активами должно обеспечивать получение ценности от инфраструктуры, оптимизировать использование ресурсов, снижать риски и поддерживать требуемый уровень эксплуатационных характеристик. Для дорожного хозяйства это особенно важно, поскольку на практике органы управления вынуждены принимать решения в условиях старения сети, роста транспортных нагрузок и постоянного дефицита бюджетных средств [1, 2, 3, 8].

Материалы и методы (*Materials and methods*)

Актуальность рассматриваемой темы обусловлена совокупностью факторов. Во-первых, в большинстве стран, включая государства с переходной экономикой, дорожная инфраструктура испытывает возрастающее воздействие интенсивного движения, осевых нагрузок, климатических факторов и естественного старения конструкций. Во-вторых, ограниченность финансирования не позволяет поддерживать всю сеть на одинаково высоком уровне, что требует строгой приоритизации вмешательств. В-третьих, традиционная система управления, основанная на разрозненных данных и локальных решениях, уже не обеспечивает требуемой эффективности [3, 4, 6, 8].

Особую значимость рассматриваемая тема приобретает применительно к условиям Республики Таджикистан, где значительная часть автомобильных дорог проходит в сложных горных условиях. Для таких дорог характерны повышенное воздействие природно-климатических факторов, сезонная неустойчивость эксплуатационного состояния, высокая вероятность развития деформаций, оползневых и селевых процессов, а также ускоренное разрушение отдельных элементов дорожной инфраструктуры. В этих условиях традиционный подход, основанный преимущественно на эпизодическом ремонте по факту возникновения повреждений, оказывается недостаточно эффективным, поскольку не позволяет своевременно учитывать реальные риски, прогнозировать ухудшение состояния и рационально распределять ограниченные ресурсы [5, 8, 9].

Дополнительную остроту проблеме придает ограниченность финансовых возможностей дорожной отрасли, высокая стоимость восстановления поврежденных участков в горной местности, а также неравномерность состояния автомобильных дорог по регионам и категориям. При этом отсутствие единой цифровой системы учета дорожных активов, интегрирующей данные диагностики, инвентаризации, мониторинга и планирования, затрудняет принятие обоснованных управленческих решений. В связи с этим для Республики Таджикистан особую актуальность приобретает формирование системы управления дорожными активами, основанной на цифровом учете объектов, приоритизации мероприятий по техническому состоянию и экономической целесообразности, а также на учете специфики горных условий эксплуатации автомобильных дорог [8, 9].

Сохранение реактивной модели, при которой ремонт выполняется преимущественно после значительного ухудшения состояния покрытия, приводит к росту совокупных затрат дорожных организаций и пользователей дорог. Мировой опыт показывает, что гораздо более эффективным

является переход к превентивному и жизненно-цикловоу управлению, при котором решения принимаются заранее, на основе состояния, прогноза деградации и оценки экономических последствий различных стратегий вмешательства [1, 3, 4, 7, 8].

Поэтому исследование уровней управления дорожными активами, их информационной и методической базы, а также инструментов принятия решений имеет как научное, так и выраженное прикладное значение.

Целью статьи является систематизация представлений об уровнях управления дорожными активами автомобильных дорог и обоснование основных организационных, технических и информационных условий повышения эффективности такого управления. Для достижения поставленной цели использованы следующие методы исследования: анализ научной и нормативно-методической литературы; сравнительный анализ международных и отраслевых подходов к управлению активами; обобщение практики диагностики и мониторинга состояния дорог; логико-структурный анализ уровней управления дорожными активами; синтез рекомендаций по совершенствованию управленческих процедур в дорожной отрасли [1-8].

Результаты (Results)

Понятие дорожных активов и сущность управления ими

В современных условиях под дорожными активами целесообразно понимать не только линейную протяженность дорог, но и весь комплекс объектов, формирующих транспортно-эксплуатационные свойства сети. К ним относятся земляное полотно, дорожная одежда, мосты и трубы, водоотводные сооружения, средства организации движения, элементы обустройства, а также данные инвентаризации, диагностики, мониторинга и планирования. Такой расширенный взгляд соответствует международным принципам управления активами, согласно которым актив рассматривается как ресурс, создающий ценность и требующий управления на протяжении всего срока службы [2, 4, 5, 8].

С практической точки зрения управление дорожными активами представляет собой систему последовательных действий, охватывающих сбор и актуализацию данных, оценку состояния, прогнозирование изменения параметров, формирование альтернатив ремонтных воздействий, расчет затрат и эффектов, выбор приоритетов и контроль исполнения. В этом смысле управление дорожными активами выступает не отдельной функцией, а интегрированным управленческим циклом, объединяющим технический анализ, экономическое обоснование и организационное обеспечение [1, 3, 4, 8].

Принципиально важным является то, что такая система ориентирована не только на устранение уже возникших дефектов, но и на сохранение стоимости и потребительской ценности актива. Именно поэтому в развитых системах управления большое значение придается жизненно-цикловоу подходу, контролю рисков, мониторингу показателей эффективности и связи технических решений с бюджетным планированием [1, 2, 8].

Уровни управления дорожными активами

Для целей дорожной отрасли управление дорожными активами целесообразно рассматривать по трем взаимосвязанным уровням: сетевому, программному и проектному; подобное разграничение согласуется с классической методологией управления дорожными покрытиями и современными руководствами по транспортному управлению активами [10, 11].

Сетевой уровень является стратегическим. На этом уровне объектом управления выступает вся сеть дорог, находящаяся в ведении соответствующего органа управления. Основными задачами являются инвентаризация активов, установление целевых показателей, формирование политики содержания и ремонта, распределение ресурсов между категориями дорог и определение допустимых уровней риска. Здесь принимаются решения о том, какие участки требуют первоочередного внимания, какова общая потребность в финансировании и как соотносятся интересы сохранения существующей сети с задачами нового строительства и реконструкции [1, 3, 4].

Именно на сетевом уровне особенно велика роль единой базы данных, цифровой паспортизации, показателей ровности, дефектности, прочности и аварийности. Без системного сбора и анализа этих сведений невозможно объективно оценить фактическое состояние сети и выстроить рациональную инвестиционную политику [3, 6].

Программный уровень связан с формированием среднесрочных и краткосрочных программ работ. Если сетевой уровень отвечает на вопрос, что происходит с сетью в целом, то программный уровень отвечает на вопрос, какие мероприятия и в какие сроки должны быть выполнены в рамках доступного бюджета. Здесь осуществляется выбор между вариантами содержания, профилактического ремонта, среднего ремонта, капитального ремонта или реконструкции; рассчитываются ожидаемые затраты и эффекты; сопоставляются альтернативные сценарии финансирования [1, 4, 7].

Для этого уровня характерно использование моделей деградации, нормативных и фактических показателей состояния, а также методов оценки эффективности по жизненному циклу. Международная практика указывает, что приоритезация мероприятий должна опираться не только на текущую дефектность, но и на будущие последствия откладывания ремонта, включая рост стоимости восстановительных работ и ухудшение условий движения [3, 4, 7, 8].

Проектный уровень является операционно-техническим. На нем принимаются решения по конкретному участку дороги: выбирается технология ремонта, уточняются объемы работ, конструктивные решения, применяемые материалы, график выполнения и система контроля качества. В отличие от программного уровня, здесь важны уже не общие приоритеты сети, а инженерная обоснованность отдельных решений и соответствие проектных решений фактическому состоянию объекта [6].

Именно на проектном уровне обеспечивается переход от аналитической модели к реальному исполнению. Ошибки, допущенные на этой стадии, могут нивелировать преимущества качественного сетевого и программного планирования. Поэтому современная система управления дорожными активами должна обеспечивать преемственность между уровнями: от стратегии и программы — к конкретному проекту и обратно, через систему обратной связи, мониторинга и корректировки данных [1, 4, 8].

Управление дорожными активами представляет собой многоуровневую систему, в рамках которой управленческие решения принимаются последовательно — от оценки состояния всей дорожной сети до выбора конкретных проектных и эксплуатационных мероприятий на отдельных участках. Такая система основывается на взаимосвязи стратегического, программного, проектного и эксплуатационного уровней, а также на использовании единой информационной базы, обеспечивающей сбор, обработку и анализ данных о состоянии автомобильных дорог. Для наглядного представления структуры этой системы и взаимодействия ее основных элементов на рис. 1 приведена схема уровней управления дорожными активами.



Рисунок 1 – Схема взаимосвязи уровней управления дорожными активами. (Сгенерировано ИИ).
Figure 1 – Diagram of the relationship between the levels of road asset management. (Generated by AI).

Как видно из рис. 1, эффективное управление дорожными активами обеспечивается только при наличии устойчивой связи между уровнями принятия решений, информационной базой и процедурами мониторинга состояния дорог. Представленная схема показывает, что данные о состоянии дорожной сети служат основой для выбора приоритетов, разработки программ ремонта и содержания, а также для обоснования проектных решений по конкретным объектам. При этом важную роль играет обратная связь, позволяющая по результатам эксплуатации и повторной диагностики уточнять ранее принятые решения и повышать обоснованность последующих управленческих воздействий.

В целях систематизации функций, состава используемой информации и характера принимаемых решений на различных стадиях управления дорожными активами целесообразно выделить несколько взаимосвязанных уровней управления. Каждый из них отличается своими задачами, глубиной анализа, временным горизонтом планирования и ожидаемыми результатами. Для наглядного представления содержания этих уровней в таблице 1 приведена их сравнительная характеристика.

Таблица 1 – Характеристика уровней управления дорожными активами
Table 1 – Characteristics of road asset management levels

Уровни управления	Основные функции	Используемые данные	Основные управленческие решения	Ожидаемый результат
Сетевой уровень	Инвентаризация дорожных активов, оценка общего состояния сети, установление целевых показателей, распределение финансовых ресурсов по направлениям	Данные паспортизации дорог, протяжённость, категория дороги, интенсивность движения, результаты диагностики, показатели аварийности	Определение приоритетных направлений развития сети, формирование общей политики содержания и ремонта, распределение бюджета	Повышение обоснованности стратегического управления дорожной сетью и активами
Программный уровень	Формирование среднесрочных и краткосрочных программ работ, ранжирование объектов, выбор очередности вмешательств	Показатели эксплуатационного состояния, прогноз деградации, данные о стоимости работ, бюджетные ограничения, критерии эффективности	Выбор участков для ремонта, определение видов и сроков работ, оптимизация программы при ограниченных ресурсах	Повышение эффективности использования финансовых средств и снижение риска несвоевременного ремонта
Проектный уровень	Детализация объектов, инженерное обследование, технико-экономический анализ, выбор проектных решений	Результаты детальной диагностики, конструктивные параметры дорожной одежды, локальные дефекты, данные о нагрузках и материалах	Выбор технологии ремонта, конструктивных решений, объемов и очередности выполнения работ	Повышение технической обоснованности проектных решений и качества ремонта
Эксплуатационный уровень	Организация выполнения работ, контроль качества, мониторинг состояния после ремонта, актуализация данных	Результаты производственного контроля, данные повторных обследований, сведения о фактическом состоянии участка, эксплуатационные показатели	Корректировка мероприятий по содержанию, уточнение параметров состояния, обновление информационной базы	Поддержание требуемого эксплуатационного состояния дорог и формирование обратной связи для последующих решений

Таким образом, представленная в таблице 1 характеристика показывает, что управление дорожными активами представляет собой не совокупность разрозненных мероприятий, а единую многоуровневую систему, в которой решения стратегического, программного, проектного и эксплуатационного характера взаимосвязаны между собой. В этой связи особое значение приобретает вопрос о том, какие именно инструменты и подходы обеспечивают согласованность указанных уровней и позволяют повысить обоснованность принимаемых решений. Прежде всего, такая роль принадлежит диагностике состояния автомобильных дорог, информационному обеспечению и современным методам анализа данных, которые формируют основу для эффективного управления дорожными активами.

Диагностика как основа принятия решений

Надежность любой системы управления дорожными активами определяется качеством данных о состоянии дороги. В отраслевых рекомендациях по диагностике подчеркивается, что оценка технического состояния должна базироваться на совокупности визуальных, инструментальных и расчетных методов, позволяющих выявлять дефекты покрытия, изменения ровности, прочности, колеиности, состояния обочин, водоотвода и других элементов [6, 8, 9].

Инструментальная диагностика дает возможность перейти от субъективного восприятия состояния дороги к измеряемым параметрам. При этом сама по себе регистрация дефектов еще не решает задачу управления. Необходима их интерпретация в контексте остаточного ресурса, категории дороги, интенсивности движения, климатических условий и допустимого уровня обслуживания. Именно поэтому современные системы управления дорожными активами объединяют инвентарные данные, показатели состояния и аналитические модели, а не ограничиваются только полевым обследованием [1, 3, 6, 8, 9].

Для практики дорожной отрасли особое значение имеют показатели, позволяющие сопоставлять состояние участков между собой. К их числу относятся показатели ровности, дефектности, несущей способности, безопасности и эксплуатационной надежности. При наличии ограниченного бюджета именно эти данные становятся основой ранжирования участков и выбора типа вмешательства. Иными словами, диагностика должна быть встроена в систему принятия решений, а не существовать отдельно от нее [4, 6, 8, 9].

Экономическая логика управления: от устранения дефектов к управлению жизненным циклом

Одним из важнейших отличий управления дорожными активами от традиционного содержания является смещение акцента с разовых работ на жизненный цикл актива. Международные документы в этой области подчеркивают, что решения должны приниматься исходя из совокупного эффекта на протяжении срока службы объекта, а не только из текущей сметной стоимости вмешательства [2, 4, 5, 8, 9-12].

Это означает, что при выборе между профилактическим ремонтом, усилением конструкции, капитальным ремонтом или отсрочкой вмешательства необходимо учитывать не только бюджет текущего года, но и изменение будущих расходов, риска отказов, стоимости для пользователей дороги и возможного снижения уровня безопасности. В материалах Всемирного банка и OECD особо отмечается необходимость применения методов сравнения альтернатив по жизненно-цикловым затратам и последствиям, поскольку именно такой подход позволяет более обоснованно распределять ресурсы [3, 4, 8, 9, 10].

Практически это ведет к переходу от простой схемы «обнаружили повреждение — устранили» к более рациональной модели: «оценили состояние — спрогнозировали ухудшение — сравнили варианты — определили момент вмешательства — выбрали наилучшее решение». Для стран с ограниченными ресурсами такой подход особенно важен, так как позволяет предотвращать ускоренное разрушение покрытия и сдерживать рост капиталоемких восстановительных работ [1, 3, 7, 8, 9-11].

Цифровизация и информационное обеспечение управления

Современный уровень управления дорожными активами невозможен без развитой информационной среды; качество данных, их интеграция и использование в планировании рассматриваются как ключевые элементы современных систем управления дорожными активами [10, 11]. Уже в ранних работах Всемирного банка по информационным системам для дорожного

управления подчеркивалось, что рост сложности дорожных сетей и ограниченность финансирования требуют перехода к объективным данным, интеграции информации о трафике, состоянии, материалах, нагрузках и экономических параметрах [3, 9].

В актуальных международных руководствах PIARC цифровизация рассматривается как составная часть управления активами. Она охватывает ведение инвентаря активов, сбор данных о состоянии, мониторинг показателей, моделирование деградации, риск-ориентированное планирование, формирование программ работ и коммуникацию со стейкхолдерами [1, 5].

На практике информационная система управления дорожными активами должна обеспечивать как минимум следующие функции: централизованное хранение данных; пространственную привязку объектов; накопление результатов обследований; анализ состояния по участкам и категориям дорог; прогноз изменения параметров; подготовку вариантов программ работ; контроль исполнения и обновление базы знаний. Технологически это предполагает использование ГИС, мобильных и стационарных средств диагностики, а также инструментов визуализации и аналитики [1, 3, 6, 8, 9, 11, 12].

Следует подчеркнуть, что цифровизация сама по себе не является конечной целью. Она эффективна только в том случае, если служит повышению качества решений. Поэтому внедрение ГИС, автоматизированных банков данных, мобильных диагностических комплексов и беспилотных средств обследования должно сопровождаться разработкой регламентов обновления данных, критериев качества информации и процедур ее использования в планировании [1, 5, 8, 9, 10, 12].

Международный опыт и его значение для дорожной отрасли

Международный опыт показывает, что успешные системы управления дорожными активами формируются не за счет одного программного продукта, а на основе сочетания организационной зрелости, нормативной базы, достоверных данных и устойчивых процедур планирования [11, 12]. В материалах PIARC подчеркивается, что практика управления активами может отличаться по степени зрелости между дорожными организациями, однако общими остаются требования к последовательности, прозрачности и ориентации на результат [1].

В документах OECD отмечено, что система управления активами должна интегрировать ранее разрозненные подсистемы для отдельных видов объектов, обеспечивать хранение инвентарной и условной информации, поддерживать выбор вариантов по жизненно-цикловым затратам и использовать показатели эффективности как инструмент обратной связи [4].

В руководящих документах ISO 55000 и ISO 55001 особое внимание уделяется связи управления активами со стратегическими целями организации, управлению рисками, постоянному улучшению и получению ценности от активов на протяжении их жизненного цикла [2, 5]. Для дорожной отрасли это означает необходимость перехода от фрагментарных решений к единой управленческой архитектуре, где технические службы, планово-экономические подразделения и руководящие органы работают в общей логике данных и целевых показателей.

Обсуждение (Discussions)

Основные проблемы действующих систем управления дорожными активами

Несмотря на развитие методик и цифровых инструментов, в практике многих дорожных администраций сохраняется ряд системных ограничений.

Прежде всего, это неполнота и несопоставимость данных о состоянии дорог. В отсутствие единой методологии обследований и централизованной базы данных результаты диагностики оказываются трудно сопоставимыми во времени и пространстве, что снижает качество приоритезации [3, 6, 8].

Вторая проблема заключается в разрыве между технической и финансовой логикой управления. Нередко программы работ формируются исходя преимущественно из текущей доступности средств, а не из реальной потребности сети и оценки последствий отсрочки вмешательств. В результате ресурсы направляются не туда, где достигается наибольший эффект от вложений [3, 4, 8].

Третья проблема связана с недостаточной институциональной зрелостью. Даже при наличии отдельных цифровых решений и результатов обследований отсутствие регламентов,

ответственных процедур, KPI (ключевые показатели эффективности) и системы контроля исполнения ограничивает возможность перехода к полноценному управлению активами [1, 5, 8, 9].

Наконец, существенным ограничением остается кадровый фактор. Для эффективной работы современной системы требуются специалисты, способные одновременно понимать инженерные аспекты состояния дороги, методы анализа данных, принципы ГИС и основы экономической оценки. Без такого междисциплинарного кадрового ядра цифровизация и методические нововведения не дадут полного результата [1, 4, 8].

Направления совершенствования управления дорожными активами

На основе проведенного анализа можно выделить ряд приоритетных направлений повышения уровня управления дорожными активами.

Во-первых, необходимо нормативно и организационно закрепить переход от управления «дорожной сетью вообще» к управлению конкретными дорожными активами и их жизненным циклом. Это позволит увязать технические параметры, стоимость владения, остаточный ресурс и риски в единой модели принятия решений [2, 5, 8, 9].

Во-вторых, требуется создать единую информационно-аналитическую платформу дорожной отрасли, которая должна включать электронный банк данных, пространственный модуль, результаты обследований, инструменты прогноза и блок формирования программ работ. Такая платформа должна работать не как архив сведений, а как механизм поддержки управленческих решений [1, 3, 8].

В-третьих, необходимо расширять применение диагностических технологий и стандартов оценки состояния, обеспечивая регулярность мониторинга и сопоставимость данных. Для этого важны не только приборы и программное обеспечение, но и единая процедура верификации результатов обследований [6, 8].

В-четвертых, программы ремонта и содержания должны формироваться на основе многокритериальной оценки, учитывающей техническое состояние, функциональную значимость дороги, транспортную нагрузку, безопасность, климатические риски и экономическую эффективность мероприятий. Подобный подход особенно актуален для стран со сложными природно-географическими условиями и ограниченными бюджетами [1, 4, 7].

В-пятых, следует усиливать подготовку кадров в области управления активами, включая обучение методам диагностики, работе с ГИС, анализу данных, моделированию деградации и оценке жизненно-цикловых затрат. Подготовка специалистов должна ориентироваться не только на эксплуатацию дорог, но и на цифровое сопровождение всего управленческого цикла [1, 5, 8].

Заключение (Conclusions)

Проведенное исследование показало, что в современных условиях более обоснованным является использование категории «управление дорожными активами», а не только «управление дорожной сетью». Такой подход позволяет рассматривать автомобильные дороги как комплекс взаимосвязанных объектов и данных, требующих системного управления в течение всего жизненного цикла [1, 2, 4].

Установлено, что эффективная система управления дорожными активами должна функционировать на трех взаимосвязанных уровнях: сетевом, программном и проектном. На сетевом уровне формируются стратегические цели и параметры состояния сети; на программном – определяются очередность и состав работ при заданных ресурсных ограничениях; на проектном – реализуются конкретные инженерные решения по объектам [1, 4, 6].

Показано, что ключевой основой принятия решений выступают достоверные данные диагностики, интегрированные в единую информационную среду. Без инвентаризации активов, регулярного мониторинга, оценки состояния, анализа риска и прогноза деградации невозможно обеспечить рациональное распределение ограниченных финансовых ресурсов [3, 4, 6].

Сделан вывод, что дальнейшее развитие дорожной отрасли связано с переходом к жизненно-цикловому, риск-ориентированному и поддержанному цифровизацией управлению дорожными активами. Для этого необходимы совершенствование нормативно-методической базы, развитие автоматизированных систем учета и мониторинга, внедрение процедур

многокритериальной приоритизации ремонтов и подготовка квалифицированных специалистов нового профиля [1, 2, 5, 8, 9].

Предложения по адаптации к условиям Республики Таджикистан:

1. Адаптацию системы управления дорожными активами в Таджикистане целесообразно осуществлять с обязательным учетом горных условий эксплуатации и природных рисков. При классификации и приоритизации участков необходимо учитывать не только транспортное значение дорог, но и подверженность селевым, оползневым, эрозионным и иным опасным процессам, которые существенно влияют на темпы ухудшения их состояния и стоимость восстановительных работ [8, 9].

2. Систему диагностики и мониторинга следует расширить за счет показателей, отражающих специфику горных территорий. Наряду со стандартной оценкой покрытия необходимо обеспечить регулярный контроль состояния откосов, водоотводных устройств, защитных сооружений и участков повышенной геодинамической уязвимости, что позволит своевременно выявлять потенциальные угрозы и переходить от реактивных решений к превентивному планированию ремонтов [8, 9].

3. Необходимым условием повышения эффективности управления является создание единой цифровой системы учета дорожных активов. Такая система должна объединять данные инвентаризации, результатов обследований, истории ремонтов, интенсивности движения, эксплуатационных показателей и природных рисков в общей информационно-аналитической среде, обеспечивающей сопоставимость данных, обоснованность приоритизации и поддержку решений на сетевом, программном, проектном и эксплуатационном уровнях [8, 9].

4. Практическая реализация адаптированной системы должна сопровождаться развитием организационного и кадрового обеспечения. Для этого требуется внедрение единых регламентов сбора и обновления данных, поэтапное внедрение системы на наиболее значимых и уязвимых участках дорожной сети, а также подготовка специалистов, владеющих методами диагностики, цифрового учета, геоинформационного анализа и экономического обоснования дорожно-ремонтных мероприятий [8, 9, 11].

Рецензент: Расулов И. — к.т.н. Главный инженер Центра реализации проекта Шогон-Зигар Министерства транспорта

Литература

1. PIARC. Asset Management Manual: A Guide for Practitioners. – World Road Association, 2024–2026.
2. ISO 55000:2024. Asset management – Vocabulary, overview and principles. – Geneva: International Organization for Standardization, 2024.
3. Paterson, W.D.O. Information Systems for Road Management / W.D.O. Paterson, T. Scullion, E.R. Brown et al. – Washington: World Bank, 1987.
4. OECD. Asset Management for the Roads Sector. – Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2001.
5. PIARC. Guidelines for the Implementation of ISO 55001 in Road Organizations. – World Road Association, 2024.
6. ОДМ 218.4.039-2018. Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог. – М.: Росавтодор, 2018.
7. Highway Development and Management Model (HDM-4): Road Use Costs Model Documentation. – Washington: World Bank.
8. Мирзозода, С.Б. Система управления дорожными активами (СУДА): монография / С.Б. Мирзозода, О.А. Красиков, Б.Б. Каримов. – Душанбе: Ирфон, 2023. – 264 с.
9. Мирзозода, С.Б. Цифровизация дорожной отрасли Таджикистана / С.Б. Мирзозода // Международный научный журнал ВАК при Президенте Республики Таджикистан «Фурӯғи илм» («Сияние науки»). – Душанбе: Издательство ООО «Сармат-компания», 2025. – № 4 (08). – С. 79–86.
10. Haas, R. Modern Pavement Management / R. Haas, W.R. Hudson, J.P. Zaniewski. – 2nd ed. – Malabar, FL: Krieger Publishing Company, 1994. – 583 p.
11. AASHTO. Transportation Asset Management Guide: A Focus on Implementation. – 2nd ed. – Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
12. Mikolaj, J. Road Asset Value Calculation Based on Asset Performance, Community Benefits and Technical Condition / J. Mikolaj, E. Remek, M. Kozel // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, No. 7. – Art. 4375. – DOI: 10.3390/su14074375.
13. Бердиев, Д. А. Теоретические аспекты и физико-механическое обоснование использования холодного асфальтобетона в условиях Таджикистана / Д. А. Бердиев, Р. Х. Сайрахмонов, С. С. Умаров // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 2(70). – С. 114-121.

References

1. PIARC. Asset Management Manual: A Guide for Practitioners. – World Road Association, 2024–2026.
2. ISO 55000:2024. Asset Management – Vocabulary, Overview and Principles. – Geneva: International Organization for Standardization, 2024.
3. Paterson, W.D.O. Information Systems for Road Management / W.D.O. Paterson, T. Scullion, E.R. Brown et al. – Washington, D.C.: World Bank, 1987.
4. OECD. Asset Management for the Roads Sector. – Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2001.
5. PIARC. Guidelines for the Implementation of ISO 55001 in Road Organizations. – World Road Association, 2024.
6. ODM 218.4.039-2018. Recommendations for the Diagnosis and Assessment of the Technical Condition of Motor Roads. – Moscow: Rosavtodor, 2018.
7. Highway Development and Management Model (HDM-4): Road Use Costs Model Documentation. – Washington, D.C.: World Bank.
8. Mirzozoda, S.B. Road Asset Management System (RAMS): Monograph / S.B. Mirzozoda, O.A. Krasikov, B.B. Karimov. – Dushanbe: Irfon, 2023. – 264 p.
9. Mirzozoda, S.B. Digitalization of the Road Sector of Tajikistan / S.B. Mirzozoda // International Scientific Journal of the Higher Attestation Commission under the President of the Republic of Tajikistan “Furughi Ilm” (“Radiance of Science”). – Dushanbe: Sarmat-Kompaniya LLC Publishing House, 2025. – No. 4 (08). – P. 79–86.
10. Haas, R. Modern Pavement Management / R. Haas, W.R. Hudson, J.P. Zaniewski. – 2nd ed. – Malabar, FL: Krieger Publishing Company, 1994. – 583 p.
11. AASHTO. Transportation Asset Management Guide: A Focus on Implementation. – 2nd ed. – Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
12. Mikolaj, J. Road Asset Value Calculation Based on Asset Performance, Community Benefits and Technical Condition / J. Mikolaj, E. Remek, M. Kozel // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, No. 7. – Art. 4375. – DOI: 10.3390/su14074375.
13. Berdiev, D.A. Theoretical Aspects and Physicomechanical Justification of the Use of Cold Asphalt Concrete under the Conditions of Tajikistan / D.A. Berdiev, R.Kh. Sayrakhmonov, S.S. Umarov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2025. – No. 2 (70). – P. 114–121. [in Russian].

Сведения об авторе:

Мирзозода Сухроб Бегмат, доктор технических наук, доцент кафедры «Строительство дорог, сооружений и транспортных коммуникаций» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9817-3633>. E-mail: sukhrob63@mail.ru.

Маълумот оид ба муаллиф:

Мирзозода Сухроб Бегмат, доктори илмҳои техники, дотсенти кафедраи Сохтмони роҳҳо, иншоот ва коммуникасияҳои нақлиётӣ Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9817-3633>. E-mail: sukhrob63@mail.ru.

Information about the author:

Mirzozoda Sukhrob Begmat, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Road, Structure and Transport Communications Construction, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9817-3633>. E-mail: sukhrob63@mail.ru.

АСОСНОККУНИИ ИҚТИСОДИИ САМАРАНОКИИ МОЛИЯВИИ ВОСИТАҲОИ НАҚЛИЁТИ БАРҚӢ ВА МОДЕЛСОЗИИ ТАРОФАҲО ДАР БОЗОРИ ТАКСИИ ШАҲРИ ДУШАНБЕ

Ҷ.Т. Пиров

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола самаранокии молиявии истифодаи воситаҳои нақлиёти барқӣ шахсӣ ва иҷоравӣ дар бозори таксии шаҳри Душанбе таҳқиқ шудааст. Дар асоси маълумоти 13 324 воситаи нақлиёти таксӣ ва 18 348 ронанда, параметрҳои ғайбӣ ба баст, фонди вақти корӣ, масофаи солона, хароҷоти амалиётӣ, арзиши аслии 1 км, даромад ва ғайбӣ ронанда ҳисоб карда шудаанд. Барои ҳисобҳои масофаи миёнаи 180 км дар як рӯз, 276 рӯзи воқеии корӣ ва тарифи 3 сомонӣ барои 1 км қабул гардидааст. Хароҷоти солонаи воситаи нақлиёти шахсӣ 114 035 сомонӣ ва воситаи нақлиёти иҷоравӣ 124 280 сомони рошарики дода, ғайбӣ солона мутаносибан 35 005 ва 24 760 сомонӣ муайян шудааст. Таъсири сатҳи даромаднокӣ ба давомнокии вақти кор, ҳастагии ронанда, бехатарии ҳаракат ва сифати хизматрасонӣ арзёбӣ гардида, таърибаи кишварҳои минтақа оид ба комиссияи агрегаторҳо ва автопаркҳо муқоиса шудааст. Бо истифода аз моделсозии иқтисодӣ-математикӣ таъсири комиссияи аз 0 то 30 ғайбӣ ба ғайбӣ ронандагонии воситаи нақлиёти шахсӣ ва иҷоравӣ муайян шуда, зарурати гузариш аз пардохти собитӣ ҳар рӯз ба низоми мутавозинии ғайбӣ асоснок карда шудааст.

Калидвожаҳо: таксӣ, воситаи нақлиёти барқӣ, хароҷоти амалиётӣ, арзиши асли, даромаднокӣ, комиссия, агрегатор, автопарк, вақти корӣ, бехатарии ҳаракат, сифати хизматрасонӣ, шаҳри Душанбе.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИНАНСОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОРОН НА РЫНКЕ ТАКСИ ГОРОДА ДУШАНБЕ

Ж.Т. Пиров

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье исследована финансовая эффективность использования собственных и арендованных электромобилей на рынке такси города Душанбе. На основе данных о 13 324 автомобилях такси и 18 348 водителях рассчитаны параметры рабочей смены, годовой фонд рабочего времени, пробег, эксплуатационные затраты, себестоимость 1 км, доход и прибыль водителя. В расчетах приняты средний пробег 180 км в день, 276 фактических рабочих дней и тариф 3 сомони за 1 км. Годовые затраты составляют 114 035 сомони для собственного автомобиля и 124 280 сомони для арендованного, а годовая прибыль - соответственно 35 005 и 24 760 сомони. Оценено влияние доходности на продолжительность труда, утомляемость водителей, безопасность движения и качество обслуживания. Проведен сравнительный анализ международной практики комиссий агрегаторов и автопарков. Экономико-математическое моделирование комиссии в диапазоне 0–30% позволило обосновать переход от фиксированного ежедневного платежа к сбалансированной процентной модели.

Ключевые слова: такси, электромобиль, эксплуатационные затраты, себестоимость, доходность, комиссия, агрегатор, автопарк, рабочее время, безопасность дорожного движения, качество обслуживания, Душанбе.

ECONOMIC FOUNDATION OF FINANCIAL EFFICIENCY OF ELECTRIC TRANSPORT VEHICLES AND MODELING OF PARTIES IN THE TAXI MARKET OF DUSHANBE

J.T. Pirov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

The article examines the financial efficiency of privately owned and rented electric vehicles in the Dushanbe taxi market. Using data on 13,324 taxis and 18,348 registered drivers, the study estimates shift parameters, annual working time, mileage, operating costs, cost per kilometre, revenue, and driver profit. The calculations assume an average daily mileage of 180 km, 276 actual working days per year, and a fare of 3 somoni per kilometre. Annual costs are estimated at 114,035 somoni for a privately owned vehicle and 124,280 somoni for a rented vehicle, while annual profits amount to 35,005 and 24,760 somoni, respectively. The paper assesses how low profitability affects working hours, driver fatigue, road safety, and service quality. It also compares international practices regarding aggregator and fleet commissions. An economic and mathematical model evaluates commission rates from 0% to 30% and supports replacing the fixed daily payment with a more balanced percentage-based commission system.

Keywords: taxi, electric vehicle, operating costs, cost price, profitability, commission, aggregator, taxi fleet, working time, road safety, service quality, Dushanbe.

Муқаддима (Introduction)

Хизматрасонии таксӣ яке аз чузъҳои муҳими низоми нақлиёти шаҳр ба ҳисоб рафта, дар таъмини ҳаракатнокии аҳоли, дастрасии нақлиётӣ ва пайваст намудани минтақаҳои гуногуни шаҳр нақши назаррас мебозад. Бар хилофи нақлиёти ҷамъиятии хатсайрӣ, таксӣ имконияти интиқоли мусофирро аз нуқтаи интиҳобшуда то макони таъинот бе маҳдудияти хатсайр, ҷадвали доимӣ ва истгоҳҳои муайян фароҳам меорад. Аз ин рӯ, таксӣ ҳамзамон хусусиятҳои нақлиёти ҷамъиятӣ ва

хизматрасони инфиродро дар бар гирифта, махсусан дар соатҳои шабона, минтақаҳои дорои фарағии маҳдуди нақлиёти ҷамъиятӣ ва ҳолатҳои талаботи фаврӣ аҳамияти махсус дорад [14, 15].

Таҳқиқоти байналмилалӣ нишон медиҳанд, ки самаранокии фаъолияти такси на танҳо аз шумораи сафарҳои анҷомдодашуда, балки аз масофаи умумии ҳаракат, вақти ҷустуҷӯи мусофир, ҳаракати ҳолӣ ва вақти интизорӣ вобаста мебошад. Аз ҷумла, Tengilimoglu ва Wadud нишон медиҳанд, ки ҳангоми баҳодиҳии хизматрасониҳои ridesourcing бояд ҳам масофаи ҳаракат ва ҳам самаранокии истифодаи вақт ба назар гирифта шавад [1].

Афзоиши аз ҳад зиёди шумораи автомобилҳои такси метавонад ба зиёдшавии сарбории шабакаи кӯчаю роҳҳо, афзоиши ҳаракати ҳолӣ, рақобат бо дигар намудҳои нақлиёти ҷамъиятӣ ва коҳиш ёфтани даромади миёнаи ронандагон оварда расонад. Таҷрибаи байналмилалӣ нишон медиҳад, ки ҳам танзими аз ҳад зиёд ва ҳам либерализатсияи нодурусти бозори такси метавонанд оқибатҳои манфӣ дошта бошанд [13]. Аз ин рӯ, сиёсати танзими бозори такси бояд на танҳо шумораи воситаҳои нақлиёт, балки сифати хизматрасонӣ, сатҳи тарифҳо, комиссияҳои ширкату агрегаторҳо, шароити меҳнати ронандагон, рақобат ва талаботи бехатарии ҳаракатро ба таври комплексӣ ба назар гирад.

Таҳқиқоти таҷрибаи Uber дар Лондон ва моделсозии рақобати Taxi–Uber дар Нью-Йорк нишон медиҳанд, ки воридшавии платформаҳои рақамӣ ба сохтори бозор, рақобат ва рафтори иштирокчиёни он таъсири назаррас мерасонад. Дар шароити рушди технологияҳои автономӣ бошад, пайдоиши robotaxi низ метавонад ба даромади ронандагони анъанавии такси таъсир расонад.

Таҳқиқоти Шевчук ва ҳаммуаллифон нишон медиҳад, ки фаъолияти ронандагони такси дар шароити идоракунии алгоритмӣ дорои хусусиятҳои махсуси ташкили меҳнат мебошад. Norlander ва ҳаммуаллифон низ таъсири назорати технологиро ба ҳавасмандӣ ва фаъолияти ронандагони Uber, такси ва лимузинҳо баррасӣ намудаанд.

Таҷрибаи кишварҳои гуногун нишон медиҳад, ки андоза ва сохтори комиссияҳои агрегаторҳо, пардохтҳои паркҳои такси ва механизмҳои муайян намудани тарифҳо метавонанд ба даромади воқеии ронандагон таъсири ҷиддӣ расонанд. Масалан, маводи таҳлилий оид ба фаъолияти Yandex Taxi, inDrive ва дигар платформаҳо дар кишварҳои Осиёи Марказӣ фарқиати комиссия, шартҳои ҳамкорӣ ва механизми тақсмоти даромадро нишон медиҳанд [7]. Маълумот оид ба бозори Қазоқистон инчунин сатҳи баланди тамаркузи бозор ва масъалаҳои назорати нархгузори хизматрасониҳои агрегаториро нишон медиҳад [8].

Маводи амалии иқтисодии фаъолияти такси низ нишон медиҳанд, ки байни даромади умумӣ ва маблағи воқеан дар ихтиёри ронанда боқимонда фарқи назаррас вучуд дошта метавонад.

Ин масъала махсусан барои ронандагоне муҳим аст, ки автомобилро ба иҷора мегиранд. Таҳқиқоти иқтисодии фаъолияти ронандагони такси нишон медиҳад, ки даромаднокии онҳо аз сохтори хароҷот, моликияти воситаи нақлиёт ва ҳаҷми пардохтҳои доимӣ вобастагии зиёд дорад.

Санадҳои меъёрӣ ва дастурҳои байналмилалӣ зарурати маҳдуд намудани вақти ронандагӣ ва таъмини давраҳои кофии истироҳатро таъкид менамоянд [2, 4]. Ташкили дурусти рӯзи меҳнат ва истироҳати ронанда ҳамчун яке аз шартҳои асосии пешгирии ҳастагӣ ва нигоҳ доштани қобилияти корӣ арзёбӣ мешавад [3, 7]. Маводи Созмони байналмилалӣ меҳнат низ ба масъалаҳои шароити меҳнат, ҳифзи меҳнат ва бехатарии кормандони соҳаи нақлиёт аҳамияти махсус медиҳад [5].

Таҳқиқотҳои илмӣ нишон медиҳанд, ки давомнокии зиёди ронандагӣ ва ҳастагӣ метавонанд ба паст шудани диққат, суст шудани аксуламал ва афзоиши хатари садамаҳои нақлиётӣ оварда расонанд. Таҳқиқоти Li ва ҳаммуаллифон махсусан хатари садамаҳои вобаста ба ҳастагии ронандагони таксиро моделсозӣ намуда, зарурати таҳияи чораҳои коҳишдиҳандаи ин хатарро нишон медиҳад. Баҳодиҳии нишондиҳандаҳои бехатарии истифодабарандагони такси низ зарурати муносибати системавиро ба бехатарии ин намуди хизматрасонӣ тасдиқ менамояд.

Аз ин рӯ, тариф, комиссия, пардохтҳои доимии оператор ва низоми тақсмоти фармоишҳо бояд на танҳо ҳамчун параметрҳои иқтисодии бозор, балки ҳамчун омилҳои ғайримустақими бехатарии ҳаракат низ арзёбӣ карда шаванд. Агар пас аз пардохти ҳамаи хароҷот фоидаи соати ронанда аз сатҳи иқтисодии қобили қабул паст гардад, эҳтимоли зиёд намудани давомнокии кор ва масофаи рӯзонаи ҳаракат ба вучуд меояд [11, 12]. Дар чунин ҳолат занҷири сабабию натиҷавии «хароҷоти баланд - фоидаи паст - зиёдшавии вақти кор- ҳастагӣ -баландшавии ҳавфи садама» метавонад ташаккул ёбад.

Дар таҳлили иқтисодии электромобилҳо махсусан масъалаи фарсудашавӣ ва коҳиши арзиши бозорӣ аҳаммияти калон дорад. Маълумоти бозори автомобил нишон медиҳад, ки коҳиши арзиши воситаи нақлиёт аз синну сол, масофаи тайшуда, ҳолати техникӣ ва талаботи бозори дуумдараҷа вобаста мебошад [10]. Барои электромобилҳо ба ин омилҳо ҳолати батарея ва хусусиятҳои технологияи он низ илова мешаванд [6].

Илова бар ин, гарчанде электромобил нисбат ба автомобили дорои муҳаррики дарунсӯз аз рӯйи сохтори техникӣ шумораи камтари чузъҳои хизматрасонишаванда дошта бошад ҳам, он аз ҳароҷоти техникӣ пурра озод нест. Масалан, барои баъзе моделҳои электромобил иваз намудани рағбани редуктор ва дигар амалиёти хизматрасонии даврӣ пешбинӣ мешавад [9].

Дар шароити масофаи миёнаи тақрибан 180 км дар як рӯз ва тарифи миёнаи тақрибан 3 сомонӣ барои як километр, арзёбии дурусти ҳароҷоти барқгирӣ, пардохти ширкат, комиссия, иҷораи автомобил, фарсудашавӣ, шустушӯ, андоз, хизматрасонии техникӣ ва дигар ҳароҷоти амалиётӣ барои муайян намудани даромаднокии воқеии фаъолияти ронанда аҳаммияти ҳалкунанда дорад. Ҳамзамон, муқоисаи чунин нишондиҳандаҳо бо таҷрибаи иқтисодии фаъолияти ронандагони таксӣ дар дигар кишварҳо имконият медиҳад, ки хусусиятҳои бозори Душанбе дақиқтар муайян карда шаванд.

Мавод, усулҳо ва параметрҳои ибтидоии таҳқиқот (Materials and methods)

Айни ҳол дар шаҳри Душанбе хизматрасонии мусофиркашонӣ тавассути таксӣ аз ҷониби чор ширкати асосии таксӣ ҶДММ «Олуҷа Авто», ҶДММ «Сафо Такси», ҶСП «Эко Такси» ва ҶСП «Ковиён» амалӣ карда мешавад. Тибқи маълумоти дастрас, дар фаъолияти ин ширкатҳо 13 324 адад воситаи нақлиёти таксӣ ва 18 348 нафар ронанда ба қайд гирифта шудаанд. Таносуби шумораи ронандагон ва воситаҳои нақлиёт нишон медиҳад, ки ба як автомобил ба ҳисоби миёна 1,4 нафар ронанда рост меояд. Аз ин рӯ, метавон тахминан ҳулоса кард, ки зиёда аз 37 %-и воситаҳои нақлиёти таксӣ дорои ду ронанда буда, бо усули кори навбатӣ истифода мешаванд.

Таҳлилҳои илмӣ олими бритониёӣ Oguz Tengilimoglu нишон медиҳанд, ки самаранокии истифодаи гашт (mileage efficiency) дар фаъолияти таксӣ дар сатҳи 50 – 66% қарор дорад. Яъне, дар давоми як бастаи кории 8–9 соата, аз 150–220 км масофаи умумии тайшуда танҳо тақрибан 60–110 км ба иҷрои фармоишҳо (интиқоли мусофирон) рост меояд. Қисми боқимондаи масофа (40 - 50%) ба ҳаракати ҳолӣ барои ҷустуҷӯи фармоиши нав, ҷойгиршавӣ дар минтақаҳои серталаб ё бозгашт аз минтақаҳои камталаб сарф мегардад.

Дар шароити шаҳри Душанбе, бо дарназардошти мавҷудияти шумораи зиёди воситаҳои нақлиёти таксӣ (тақрибан 13 324 адад) ва сатҳи баланди талабот ба хизматрасонии таксӣ, таҳлилҳо нишон медиҳанд, ки воситаҳои нақлиёти таксӣ дар давоми аз 8 то 9 соати корӣ ба ҳисоби миёна аз 140 то 220 км ҳаракат менамоянд.

Бо назардошти хусусияти бозори таксии шаҳри Душанбе, сатҳи баланди талабот ва зичии фармоишҳо, барои ҳисобҳои минбаъда тахминан нишондиҳандаи 180 км ҳаракат бо мусофир дар як бастаи корӣ ҳамчун қимати максималӣ қабул карда мешавад.

Барои ҳисоб кардани рӯзҳои кории ронанда дар як сол якчанд усул вучуд дорад. Интиҳоби усул аз он вобаста аст, ки шумо барои кадом мақсад (таҳлили иқтисодӣ, ҳисоб кардани ҳароҷот, ё ҳисоб кардани даромад) ҳисоб мекунед.

Таҷрибаи байналмилалӣ низ зарурати танзими вақти кори ронандагони таксиро тасдиқ менамояд. Аз ҷумла, тибқи Қарори Ҳукумати Федератсияи Россия аз 2 июни соли 2023, №908 «Дар бораи тасдиқи меъёрҳои вақти корӣ, вақти истироҳат, меъёрҳои вақти идоракунии воситаи нақлиёт барои шахсони воқеӣ ва қоидаҳои баҳисобгирии вақти корӣ, вақти истироҳат ва вақти идоракунии воситаи нақлиёт», давомнокии муқаррарии вақти кори шахси воқеӣ набояд аз 40 соат дар як ҳафта зиёд бошад. Ҳангоми ҳафтаи кории панҷрӯза давомнокии кори ҳаррӯза набояд аз 8 соат зиёд бошад, дар ҳолати истифодаи баҳисобгирии ҷамъбасти вақти корӣ бошад, давомнокии кори ҳаррӯза набояд аз 10 соат зиёд гардад. Ҳамчунин, шахси воқеӣ уҳдадор аст вақти корӣ, вақти истироҳат ва вақти идоракунии воситаи нақлиётро тавассути журнали махсус ба ҳисоб гирад. Бо назардошти ин таҷриба, барои таъмини бехатарии ҳаракат, пешгирии ҳастагии ронандагон ва баланд бардоштани сифати хизматрасонии таксӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон низ мувофиқи мақсад мебошад, ки давомнокии вақти кори ронандагони таксӣ ба меъёрҳои муайян мутабиқ карда шавад.

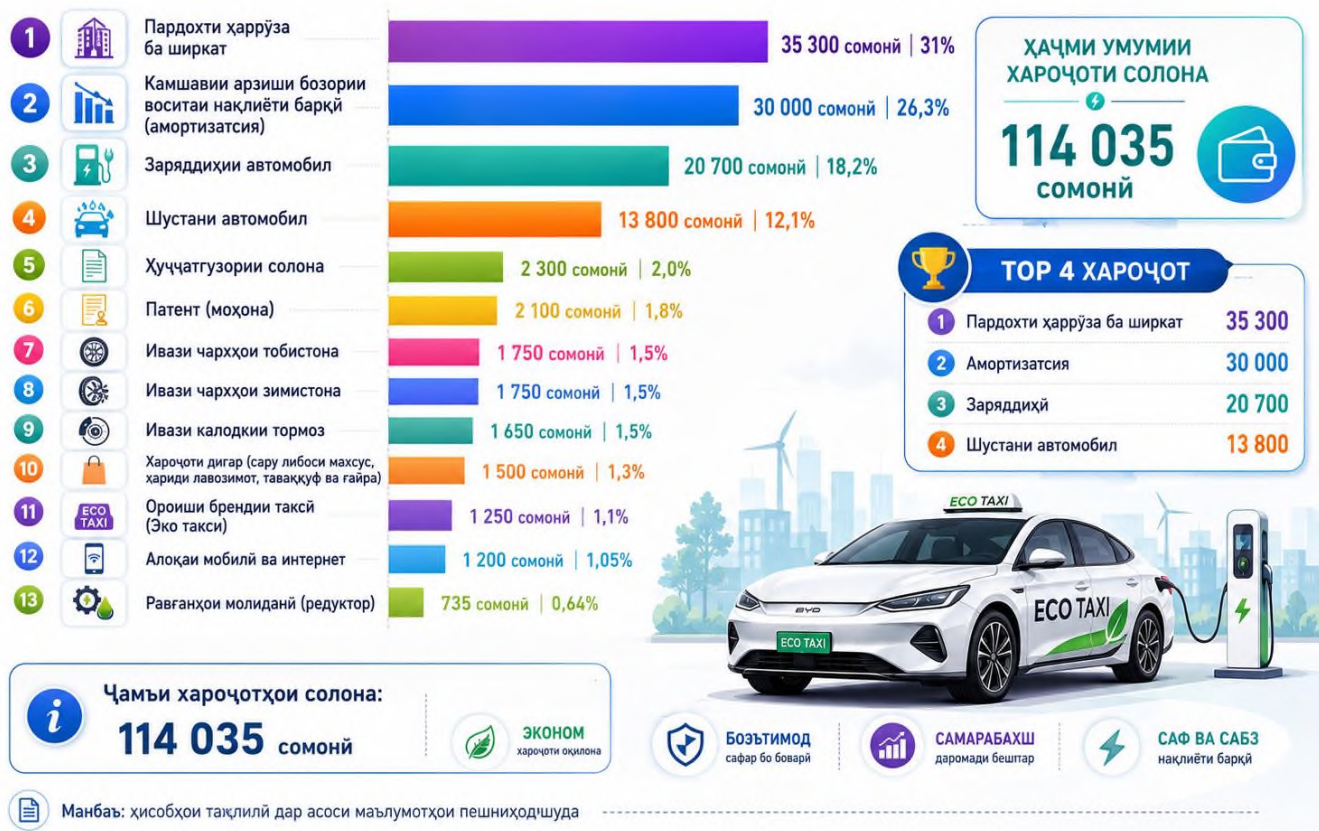
Дар ин ҳолат ронанда дар як сол тақрибан 276 рӯзи корӣ дорад. Ин нишондиҳанда барои таҳлили иқтисодии фаъолияти ронандагони таксӣ, аз ҷумла ҳангоми ҳисоб кардани хароҷот, даромад ва комиссияҳо, асоснок ва амалӣ мебошад.

Мувофиқи шартномаҳои ҳамкорӣ байни ширкатҳои таксӣ ва ронандагон дар шаҳри Душанбе, ҳар як ронанда барои истифодаи платформаи электронӣ ва хизматрасониҳои ширкат дар ҳар рӯзи фаъолият ба маблағи 100 сомонӣ ҳаққи хизматрасонӣ пардохт менамояд. Ҳамзамон, тибқи шартнома, ба ҳар як ронанда дар як моҳ як рӯзи истироҳатӣ пешбинӣ гардидааст, ки дар ин рӯз аз пардохти ҳаққи хизмат озод мебошад.

Бо назардошти ин тартиби фаъолияти меҳнатӣ, шумораи миёнаи рӯзҳои кори ронандаи таксӣ дар як сол 353 рӯз-ро ташкил медиҳад. Маҳз ҳамин нишондиҳанда ҳамчун асос барои ҳисобу таҳлили хароҷот, даромад ва арзёбии самаранокии иқтисодии фаъолияти ронандагони таксӣ дар таҳқиқоти мазкур истифода шудааст.

Самаранокии иқтисодии истифодаи воситаҳои нақлиёти барқии шахсӣ ва иҷоравӣ Ҳолати якум: воситаи нақлиёти шахсии ронанда (таксӣ)

Дар ин омӯзиш ҳамаи хароҷоти солонаи ронандае, ки соҳиби воситаи нақлиёти таксии шахсӣ мебошад, ҳисоб ва таҳлил карда шудааст.



Расми 1 – Хароҷоти солонаи истифодаи воситаи нақлиёти таксии шахсӣ
Figure 1 – Annual costs of using a private taxi vehicle

Таҳлили маълумотҳои қадвали 1 нишон медиҳад, ки хароҷоти солонаи ронандаи воситаи нақлиёти таксии шахсӣ аз 13 намуди асосӣ иборат буда, ҳаҷми умумии онҳо 114 035 сомонӣ-ро ташкил медиҳад. Аз ҳама хароҷоти калон пардохти ҳаррӯза ба ширкат буда, 35 300 сомонӣ (31 %) - ро ташкил медиҳад. Баъдан амортизатсияи воситаи нақлиёти барқӣ бо 30 000 сомонӣ (26,3 %) ва заряддиҳии автомобил бо 20 700 сомонӣ (18,2 %) ҷойгир мебошанд. Аз ҳама хароҷоти хурд равшанҳои молидани (редуктор) буда, ҳамагӣ 735 сомонӣ (0,64 %) - и хароҷоти умумии солоноро ташкил медиҳад.

Хароҷоти умумии ронандаи воситаи нақлиёти таксии шахсӣ бо формулаи зерин ҳисоб карда мешавад:

$$C_{\text{шах.умумӣ}} = \sum_{i=1}^{13} C_i, \text{ сомонӣ}; \quad (1)$$

ё ба таври кушода:

$$C_{\text{шах.умумӣ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_{13}, \quad \text{сомонӣ} \quad (2)$$

$$C_{\text{шах.умумӣ}} = C_{\text{ш}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{зар}} + C_{\text{шу}} + C_{\text{ху}} + C_{\text{пат}} + C_{\text{чт}} + C_{\text{чз}} + C_{\text{кт}} + C_{\text{д}} + C_{\text{бр}} + C_{\text{ал}} + C_{\text{рм}}, \quad (3)$$

ки дар он: $C_{\text{шах.умумӣ}}$ - хароҷоти умумии солона, сомонӣ; $C_{\text{ш}}$ - пардохти ҳаррӯза ба ширкат; $C_{\text{ам}}$ - хароҷоти амортизатсия (камшавии арзиши бозории воситаи нақлиёт); $C_{\text{зар}}$ - хароҷоти заряддиҳии автомобил; $C_{\text{шу}}$ - хароҷоти шустани автомобил; $C_{\text{ху}}$ - хароҷоти ҳуҷҷатгузории солона; $C_{\text{пат}}$ - хароҷоти патент; $C_{\text{чт}}$ - хароҷоти ивази чархҳои тобистона; $C_{\text{чз}}$ - хароҷоти ивази чархҳои зимистона; $C_{\text{кт}}$ - хароҷоти ивази калодкҳои тормоз; $C_{\text{д}}$ - дигар хароҷот (ҷаримаҳо, либоси махсус, лавозимот ва ғайра); $C_{\text{бр}}$ - хароҷоти ороиши брендии таксӣ; $C_{\text{ал}}$ - хароҷоти алоқаи мобилӣ ва интернет; $C_{\text{рм}}$ - хароҷоти рафғанҳои молиданӣ.

Барои нишон додани ҳиссаи ҳар як намуди хароҷот аз ҳаҷми умумии хароҷот, формулаи зерин истифода мешавад:

$$P_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^{13} C_i} \times 100\%, \quad (4)$$

ки дар он: P_i - ҳиссаи хароҷоти навъи i дар ҳаҷми умумӣ (%); C_i - маблағи хароҷоти навъи i (сомонӣ); $\sum_{i=1}^{13} C_i$ - маҷмӯи ҳамаи 13 намуди хароҷот.

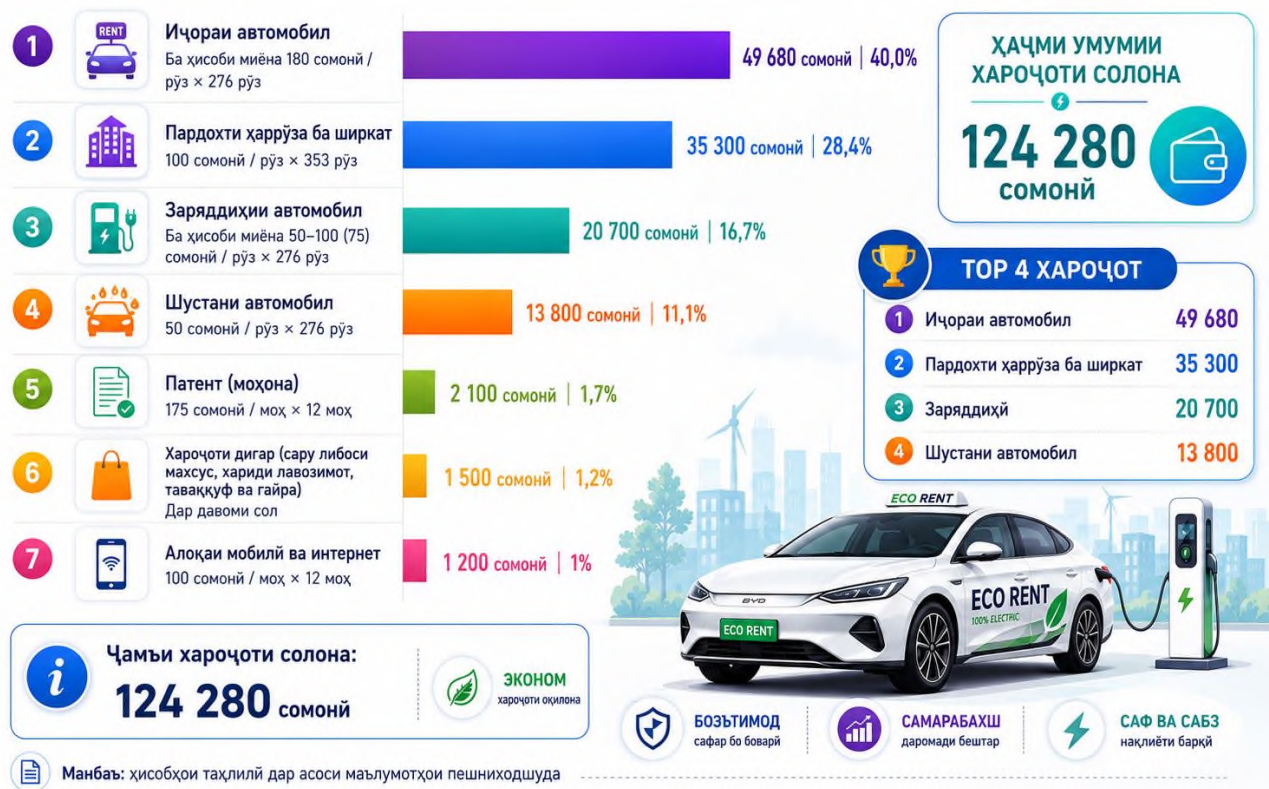
Барои воситаи нақлиёти таксии шахсӣ:

$$C_{\text{шах.умумӣ}} = 35\,300 + 30\,000 + 20\,700 + 13\,800 + 2\,300 + 2\,100 + 1\,750 + 1\,750 + 1\,650 + 1\,500 + 1\,250 + 1\,200 + 735 = 114\,035, \text{ сомонӣ};$$

$$C_{\text{шах.умумӣ}} = 114\,035, \text{ сомонӣ}.$$

Ҳолати дуюм: воситаи нақлиёти иҷора (таксӣ)

Дар ин омӯзиш хароҷоти солонаи ронандае, ки воситаи нақлиёти таксиро ба иҷора мегирад, ҳисоб ва таҳлил карда шудааст.



Расми 2 – Хароҷоти солонаи истифодаи воситаи нақлиёти иҷора
Figure 2 – Annual costs of using a rental vehicle

Таҳлили маълумотҳои қадвали 2 нишон медиҳад, ки хароҷоти солонаи ронанда ҳангоми истифодаи воситаи нақлиёти иҷора аз 7 намуди асосӣ иборат буда, ҳаҷми умумии онҳо 124 280 сомонӣ-ро ташкил медиҳад. Аз ҷама хароҷоти калон иҷораи автомобил буда, 49680 сомонӣ (40 %) - ро ташкил медиҳад. Баъдан пардохти ҳаррӯза ба ширкат бо 35 300 сомонӣ (28,4 %) ва заряддиҳии автомобил бо 20700 сомонӣ (16,7 %) ҷойгир мебошанд. Аз ҷама хароҷоти хурд алоқаи мобилӣ ва интернет буда, ҷамагӣ 1 200 сомонӣ (1 %)-и хароҷоти умумии солонро ташкил медиҳад.

Хароҷоти солонаи истифодаи воситаи нақлиёти иҷоравӣ низ метавон формулаҳоро бо номгузори равшани нишондиҳандаҳо чунин пешниҳод намуд:

$$C_{\text{иҷо.умумӣ}} = \sum_{i=1}^7 C_i, \text{ сомонӣ} \quad (5)$$

ки дар он: C_i - маблағи хароҷоти навъи i (сомонӣ); $\sum_{i=1}^7 C_i$ - маҷмӯи ҷамаи 7 намуди хароҷот.
ё ба таври кушода:

$$C_{\text{иҷо.умумӣ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_7, \text{ сомонӣ}; \quad (6)$$

$$C_{\text{иҷо.умумӣ}} = C_{\text{иҷ}} + C_{\text{ш}} + C_{\text{зар}} + C_{\text{шу}} + C_{\text{пат}} + C_{\text{д}} + C_{\text{ал}}, \text{ сомонӣ} \quad (7)$$

ки дар он: $C_{\text{иҷо.умумӣ}}$ - хароҷоти умумии солонаи истифодаи воситаи нақлиёти иҷоравӣ, сомонӣ; $C_{\text{иҷ}}$ - хароҷоти иҷораи автомобил дар давоми сол, сомонӣ; $C_{\text{ш}}$ - пардохти ҳаррӯза ба ширкати таксӣ, сомонӣ; $C_{\text{зар}}$ - хароҷоти заряддиҳии воситаи нақлиёти барқӣ, сомонӣ; $C_{\text{шу}}$ - хароҷоти шустани автомобил, сомонӣ; $C_{\text{пат}}$ - хароҷоти патент, сомонӣ; $C_{\text{д}}$ - дигар хароҷот (вайрон кардани қоидаҳои ҳаракат, либоси махсус, лавозимот ва ғайра), сомонӣ; $C_{\text{ал}}$ - хароҷоти алоқаи мобилӣ ва интернет, сомонӣ.

Барои воситаи нақлиёти таксии иҷора:

$$C_{\text{иҷо.умумӣ}} = 49680 + 35300 + 20700 + 13800 + 2100 + 1500 + 1200 = 124280, \text{ сомонӣ}.$$

Муайян намудани фонди вақти кории солонаи ронандаи таксӣ

Барои муайян намудани шумораи воқеии рӯзҳои фаъолияти ронандаи таксӣ дар як сол, рӯзҳои ғайрикорӣ, аз ҷумла истироҳати ҳафтаина, рухсатии меҳнатӣ, рӯзҳои идӣ, корҳои вобаста ба омӯзиш ва нигоҳдории воситаи нақлиёт, инчунин ҳолатҳои вобаста ба саломатӣ ба ҳисоб гирифта мешаванд.

Барои ҳисоб кардани вақти кории ронандаи таксӣ формулаҳои зерин истифода мешаванд:

1. Шумораи рӯзҳои корӣ дар як ҳафта:

$$D_{\text{ҳафта}} = 5 - 6, \text{ рӯз} \quad (8)$$

ки дар он: $D_{\text{ҳафта}}$ - шумораи рӯзҳои корӣ дар як ҳафта.

Тавсияи қабулшаванда: ронандаи таксӣ метавонад 6 рӯз кор карда, 1 рӯз истироҳат намояд.

2. Давомнокии вақти кории як рӯз (як баст):

$$T_{\text{рӯз}} = 8 - 9, \text{ соат} \quad (9)$$

ки дар он: $T_{\text{рӯз}}$ - вақти кори ҳаррӯзаи ронанда, соат.

Дар таҳқиқоти мазкур шумораи умумии рӯзҳои ғайрикорӣ бо формулаи зерин муайян карда мешавад:

$$D_{\text{ғ}} = D_{\text{иҳр}} + D_{\text{рмх}} + D_{\text{риф}} + D_{\text{мтш}} + D_{\text{бмт}}, \text{ рӯз} \quad (10)$$

ки дар он: $D_{\text{ғ}}$ - шумораи умумии рӯзҳои ғайрикорӣ дар як сол; $D_{\text{иҳр}}$ - шумораи рӯзҳои истироҳати ҳафтаинаи ронанда; $D_{\text{рмх}}$ - шумораи рӯзҳои рухсатии меҳнати ҳарсола; $D_{\text{риф}}$ - шумораи рӯзҳои иди расмӣ ғайрикорӣ; $D_{\text{мтш}}$ - шумораи рӯзҳои вобаста ба омӯзиш, санҷиши техникӣ, ҳуҷҷатгузорӣ ва масъалаҳои шахсӣ / оилавӣ; $D_{\text{бмт}}$ - шумораи рӯзҳои беморӣ ва гузаштани муоинаи тиббӣ.

Ҳисоби умумии рӯзҳои ғайрикорӣ:

$$D_{\text{ғ}} = 52 + 28 + 4 + 3 + 2 = 89, \text{ рӯз}.$$

Аз ин рӯ, шумораи рӯзҳои фаъолияти ронандаи таксӣ дар як сол бо формулаи зерин муайян карда мешавад:

$$D_{\text{корӣ}} = D_{\text{сол}} + D_{\text{ғ}}, \text{ рӯз} \quad (11)$$

ки дар он:

$D_{\text{корӣ}}$ – шумораи рӯзҳои фаъолияти ронандаи таксӣ дар як сол;

$D_{\text{сол}}$ – шумораи рӯзҳои тақвими сол (365 рӯз);

$D_{\text{ғ}}$ – шумораи умумии рӯзҳои ғайрикорӣ дар як сол (89 рӯз).

$$D_{\text{корӣ}} = 365 + 89 = 276, \text{ рӯз}$$

Ҳамин тариқ, бо дарназардошти истироҳати ҳафтаина, руҳсатии меҳнатии ҳарсола, рӯзҳои иди ғайрикорӣ, вақти зарурӣ барои омӯзиш, санҷиши техникӣ, корҳои ҳуҷҷатгузорӣ, масъалаҳои шахсӣ / оилавӣ ва беморӣ, дар таҳқиқоти мазкур барои ҳисоб намудани хароҷот, даромадноқӣ ва самаранокии иқтисодии фаъолияти ронандаи таксӣ 276 рӯзи корӣ дар як сол қабул карда мешавад.

Ҳисоби арзиши аслии 1 км ҳаракат, даромад ва фоидаи ронанда

Барои ҳисоб намудани арзиши 1 км ҳаракати воситаи нақлиёти таксӣ формулаи зерин истифода мешавад:

1. Ҳисоби масофаи солони ҳаракат:

$$L_{\text{сол}} = L_{\text{рӯз}} \times D_{\text{сол}}, \text{ км} \quad (12)$$

ки дар он: $L_{\text{сол}}$ - масофаи солони ҳаракати автомобил, км; $L_{\text{рӯз}}$ - масофаи миёнаи ҳаракати автомобил дар як рӯз, км; $D_{\text{сол}}$ - шумораи рӯзҳои кори автомобил дар як сол, рӯз.

$$L_{\text{сол}} = 180 \times 276 = 49680, \text{ км.}$$

2. Ҳисоби хароҷоти 1 км ҳаракат формулаи зерин истифода мешавад:

$$C_{1\text{км}} = \frac{C_{\text{сол}}}{L_{\text{сол}}}, \text{ сомонӣ / км} \quad (13)$$

ки дар он: $C_{1\text{км}}$ - хароҷоти истифодаи автомобил ба 1 км, сомонӣ / км; $C_{\text{сол}}$ - хароҷоти умумии солони автомобил, сомонӣ; $L_{\text{сол}}$ - масофаи солони ҳаракат, км.

Барои воситаи нақлиёти таксии шахсӣ:

$$C_{1\text{км}} = \frac{114\,035}{49680} = 2,3 \frac{\text{сомонӣ}}{\text{км}} \quad (14)$$

Барои воситаи нақлиёти таксии иҷора:

$$C_{1\text{км}} = \frac{124\,280}{49680} = 2,5 \frac{\text{сомонӣ}}{\text{км}} \quad (15)$$

Барои ҳисоб намудани даромад ва фоидаи солони ронандаи таксӣ формулаҳои зерин истифода мешаванд:

1. Ҳисоби даромади солони:

$$R_{\text{сол}} = L_{\text{сол}} \times T_{1\text{км}}, \text{ сомонӣ} \quad (16)$$

ки дар он: $R_{\text{сол}}$ - даромади умумии солони ронанда, сомонӣ; $L_{\text{сол}}$ - масофаи солони ҳаракат, км; $T_{1\text{км}}$ - тарифи хизматрасонӣ (3 сомонӣ) барои 1 км, сомонӣ / км.

$$R_{\text{сол}} = 49680 \times 3 = 149040, \text{ сомонӣ.}$$

2. Ҳисоби фоидаи солони:

$$P_{\text{сол}} = R_{\text{сол}} - C_{\text{сол}}, \text{ сомонӣ} \quad (17)$$

ки дар он: $P_{\text{сол}}$ - фоидаи солони ронанда, сомонӣ; $R_{\text{сол}}$ - даромади умумии солони, сомонӣ; $C_{\text{сол}}$ - хароҷоти умумии солони, сомонӣ.

Воситаи нақлиёти шахсӣ:

$$P_{\text{сол}} = 149040 - 114\,035 = 35005, \text{ сомонӣ.}$$

Воситаи нақлиёти иҷора:

$$P_{\text{сол}} = 149040 - 124\,280 = 24760, \text{ сомонӣ.}$$

3. Ҳисоби фоидаи миёнаи моҳона:

$$P_{\text{моҳ}} = \frac{P_{\text{сол}}}{12}, \text{ сомонӣ;} \quad (18)$$

ки дар он: $P_{\text{моҳ}}$ - фоидаи миёнаи моҳона, сомонӣ; $P_{\text{сол}}$ - фоидаи солони, сомонӣ; 12 - шумораи моҳҳо дар як сол.

Воситаи нақлиёти шахсӣ:

$$P_{\text{моҳ}} = \frac{35005}{12} = 2\,917,1, \text{ сомонӣ;}$$

Воситаи нақлиёти иҷора:

$$P_{\text{мох}} = \frac{24760}{12} = 2\,063, \text{ сомонӣ};$$

Формулаи умумии ҳисоб кардани фоидаи моҳонаи ронанда:

$$P_{\text{мох}} = \frac{(L_{\text{рӯз}} \times D_{\text{сол}} \times T_{1\text{км}}) - C_{\text{сол}}}{12}, \frac{\text{сомонӣ}}{\text{мох}}, \quad (19)$$

ки дар он: $L_{\text{рӯз}}$ - масофаи миёнаи ҳаракати автомобил дар як рӯз (180), км; $D_{\text{сол}}$ - рӯзҳои воқеии кории ронанда дар як сол (276 рӯз); $T_{1\text{км}}$ - тарифи 1 км, сомонӣ/км; $C_{\text{сол}}$ - хароҷоти солонаи истифодаи автомобил, сомонӣ.

Барои ҳолати воситаи нақлиёти шахсӣ:

$$P_{\text{мох}} = \frac{(180 \times 276 \times 3) - 114\,035}{12} = 2\,917,1, \frac{\text{сомонӣ}}{\text{мох}};$$

Воситаи нақлиёти иҷора:

$$P_{\text{мох}} = \frac{(180 \times 276 \times 3) - 124\,280}{12} = 2063, \frac{\text{сомонӣ}}{\text{мох}}.$$

Арзёбии ҳиссаи пардохти собитии ширкат аз даромади ронанда

Формулаи ҳисоби фоизи ширкат аз даромади умумии ҳаррӯза

Ин формула нишон медиҳад, ки чанд фоизи тамоми пули коркардаи ронанда дар як рӯз мустақим ба ширкат меравад:

$$P_{\text{ширкат.умумӣ}} = \frac{C_{\text{ш.рӯз}}}{R_{\text{рӯз}}} \times 100 \%, \quad (20)$$

ки дар он: $P_{\text{ширкат.умумӣ}}$ - ҳиссаи ширкат аз даромади умумии ҳаррӯза (%); $C_{\text{ш.рӯз}}$ - пардохти ҳаррӯза ба ширкат (100 сомонӣ); $R_{\text{рӯз}}$ - даромади умумии рӯзонаи ронанда, сомонӣ.

Ё агар формуларо кушода нависем, бо назардошти тариф ва масофаи ҳаракат дар як рӯз:

$$P_{\text{ширкат.умумӣ}} = \frac{C_{\text{ш.рӯз}}}{L_{\text{рӯз}} \times T_{1\text{км}}} \times 100 \%, \quad (21)$$

ки дар он: $P_{\text{ширкат.умумӣ}}$ - ҳиссаи ширкат аз даромади умумии ҳаррӯза (%); $L_{\text{рӯз}}$ - масофаи миёнаи ҳаракат дар як рӯз (180 км); $T_{1\text{км}}$ - тарифи хизматрасонӣ барои 1 км (3 сомонӣ).

$$P_{\text{ширкат.умумӣ}} = \frac{100}{180 \times 3} \times 100 \% = 18,5 \%.$$

Пардохти ширкат новобаста аз рӯзҳои кор ҳисоб мешавад (365 рӯз), вале даромади ронанда танҳо аз рӯзҳои воқеии кор (276 рӯз) ба даст меояд. Аз ин рӯ, барои ёфтани фоизи воқеии ширкат, бояд ин ду нишондиҳандаро ба ҳам муқоиса намоем.

Формулаи дуруст барои ин ҳолат:

$$P_{\text{ширкат.умумӣ}} = \frac{C_{\text{ш(сол)}}}{R_{\text{сол}}} \times 100 \%, \quad (22)$$

ки дар он: $C_{\text{ш(сол)}}$ - пардохти солона ба ширкат, сомонӣ; $R_{\text{сол}}$ - даромади умумии солонаи ронанда, сомонӣ.

ки дар он:

$$C_{\text{ш(сол)}} = 100 \times 353 = 35\,300, \text{ сомонӣ},$$

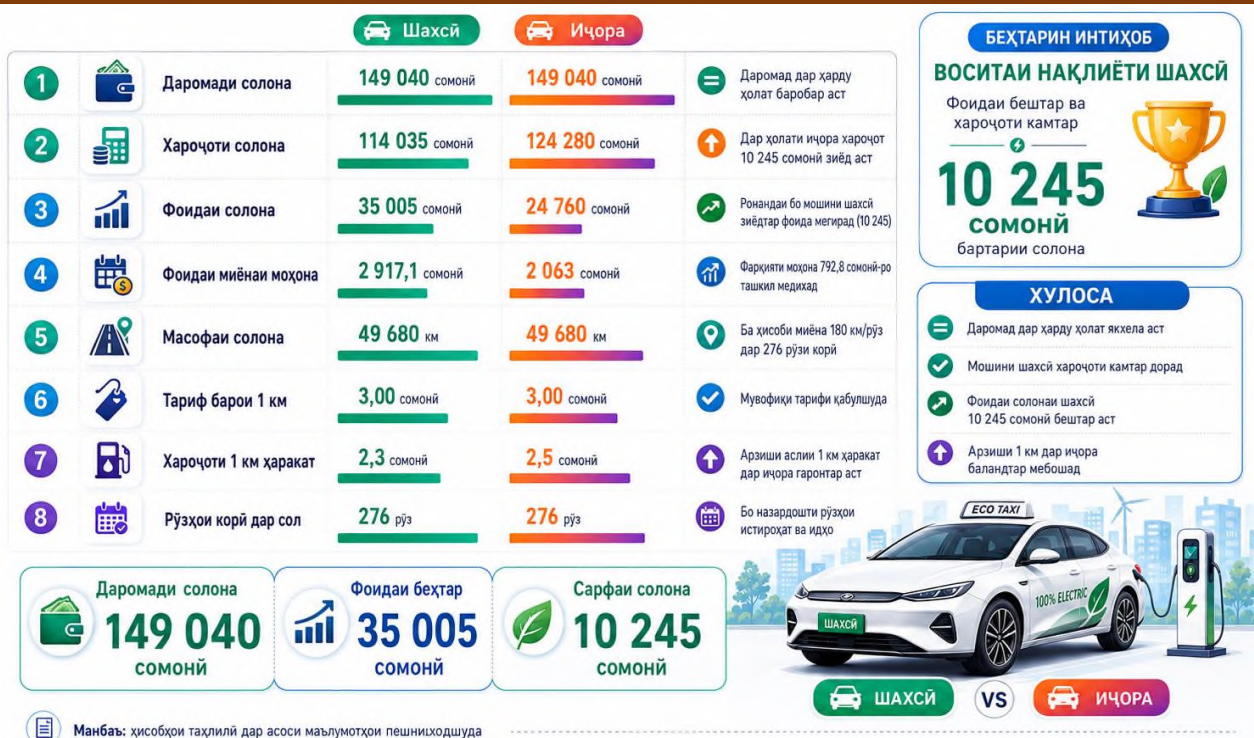
$$R_{\text{сол}} = L_{\text{рӯз}} \times D_{\text{сол}} \times T_{1\text{км}} = 180 \times 276 \times 3 = 149\,040, \text{ сомонӣ}.$$

Пас формулаи умумӣ чунин мешавад:

$$P_{\text{ширкат.воқеӣ}} = \frac{C_{\text{ш}} \times D_{\text{ширкат.сол}}}{L_{\text{рӯз}} \times D_{\text{сол}} \times T_{1\text{км}}} \times 100 \%, \quad (23)$$

ки дар он: $D_{\text{ширкат.сол}}$ - рӯзҳои кории пардохти 100 сомонӣ аз ҷониби ронанда дар як сол ба ширкат (353 рӯз);

$$P_{\text{ширкат.воқеӣ}} = \frac{100 \times 353}{180 \times 276 \times 3} \times 100 \% = 23,7 \%$$



Расми 3 - Муқоисаи даромадноқӣ ва хароҷоти ронандагонии таксӣ
 Figure 3 - Comparison of taxi drivers' profitability and expenses

Таъсири даромадноқӣ ба вақти кор, бехатарии ҳаракат ва сифати хизматрасонӣ

Натиҷаҳои таҳлил нишон медиҳанд, ки ҳангоми риояи меъёрҳои муқарраршудаи вақти кор (тақрибан 8–9 соат дар як шабонарӯз) сатҳи даромадноқии ронандагонии таксӣ нисбатан паст мебошад. Ҳангоми истифодаи воситаи нақлиёти шахсӣ ҷоидаи миёнаи моҳонаи ронанда ҳамагӣ 2917,1 сомонӣ ва ҳангоми истифодаи воситаи нақлиёти иҷоравӣ 2063 сомонино ташкил медиҳад. Бо дарназардошти хароҷоти зиндагӣ, таъмини оила, пардохти андозҳо ва дигар хароҷоти шахсӣ, чунин сатҳи даромад барои қисми зиёди ронандагон ҷиҳати таъмини зиндагии муносиб кофӣ нест.

Маҳз ҳамин омил ронандагонро маҷбур месозад, ки барои зиёд намудани даромади худ аз меъёрҳои муқарраршудаи вақти кор зиёдтар фаъолият намоянд. Дар амал бисёр ронандагон ба ҷойи 8–9 соати муқарраршуда, 14–16 соат ва баъзан аз ин ҳам бештар дар як шабонарӯз кор мекунанд. Дар натиҷа, ҳастагии ҷисмонӣ ва равонии ронанда зиёд гардида, сатҳи диққат, суръати воқуниш ва қобилияти қабули қарорҳои дуруст ҳангоми идоракунии воситаи нақлиёт паст мешавад, ки ин яке аз омилҳои асосии зиёдшавии хавфи руҳ додани ҳодисаҳои роҳу нақлиёт мебошад.

Дар шашмоҳаи аввали соли 2026 дар Ҷумҳурии Тоҷикистон бо иштироки беш аз 800 ҳазор воситаи нақлиёт 531 садамаи роҳу нақлиёт ба қайд гирифта шуд. Дар натиҷаи ин ҳодисаҳо 287 нафар ҳалок ва 508 нафар ҷароҳати ҷисмонӣ бардоштаанд, ки ба ҳар 1000 воситаи нақлиёт тақрибан 0,66 ҳодиса рост меояд. Дар шаҳри Душанбе танҳо дар шаш моҳи соли ҷорӣ бо иштироки 13 324 воситаи нақлиёти таксӣ 18 ҳодисаи роҳу нақлиёти дорои оқибатҳои вазнин ва 188 ҳодисаи роҳу нақлиёти маъмурӣ ба қайд гирифта шудааст. Дар маҷмӯъ, шумораи ҳодисаҳои роҳу нақлиёт бо иштироки воситаҳои нақлиёти таксӣ 206 ҳолатро ташкил медиҳад. Ҳангоми ба ҳисоб гирифтани ҳамаи ин 206 ҳолат, ба ҳар 1000 воситаи нақлиёти таксӣ дар шаш моҳ 15,5 ҳодиса рост меояд. Ин нишондиҳанда нисбат ба нишондиҳандаи миёнаи ҷумҳуриявӣ (0,66 ҳодиса ба 1,000 воситаи нақлиёт) тақрибан 23,3 маротиба баландтар аст.

Ҳамзамон, сатҳи пасти даромад ба сифати хизматрасонии таксӣ низ таъсири манфӣ мерасонад. Барои сарфа намудани вақт ва гирифтани шумораи бештари фармоишҳо, баъзе ронандагон пеш аз қабули мусофир самти ҳаракати ӯро мепурсанд ва агар масир аз минтақаҳои сертамбашавӣ ё кӯчаҳои, ки қорҳои таъмиру таҷдид идома доранд, гузарад, аз иҷрои чунин

фармоиш худдорӣ мекунад. Ин амал дастрасии аҳолиро ба хизматрасонии таксӣ маҳдуд намуда, ба принципҳои хизматрасонии баробар ва босифат муҳолиф мебошад.

Ғайр аз ин, қисми муайяни ронандагон бо мақсади баланд бардоштани даромад аз истифодаи ғайриқонунии трафарет (қабули мустақими мусофирон берун аз низоми агрегаторҳо) истифода мебаранд. Дар чунин ҳолат хизматрасонӣ аз низоми назорат, баҳогузорӣ ва мониторинги агрегаторҳо хориҷ гардида, шаффофияти бозор коҳиш меёбад. Ин ҳолат метавонад ба паст шудани сифати хизматрасонӣ, зиёд гардидани баҳсҳо байни мусофир ва ронанда ва коҳиш ёфтани сатҳи эътимоди истифодабарандагон оварда расонад.

Аз нуқтаи назари иқтисодӣ низ мушкилоти мазкур муҳим мебошад. Ҳангоми он ки ронанда барои ба даст овардани даромади кофӣ маҷбур аст вақти кори худро қариб ду баробар зиёд намояд, ин нишон медиҳад, ки модели мавҷудаи пардохти 100 сомонӣ дар як рӯз ба ширкати нақлиётӣ(таксӣ) на ҳамеша имконияти гирифтани фоидаи муносибро барои ронанда таъмин мекунад. Дар чунин шароит ронанда кушиш мекунад, ки талафоти вақтро кам намуда, танҳо фармоишҳои аз ҷиҳати иқтисодӣ фоидаоварро интихоб намояд.

Дар натиҷа занҷираи манфии зерин ба вучуд меояд: даромади нокифоя; зиёд шудани вақти кор; афзоиши хастагии ронанда; интихоб намудани танҳо фармоишҳои фоидаовар; паст шудани сифати хизматрасонӣ; анҷом додани ҳамлу нақли мусофирон ба таври ғайрирасмӣ (бо истифода аз трафарет); зиёд гардидани эҳтимолияти садамаҳои роҳу нақлиёт.

Ҳамин тариқ, таъмини тавозуни манфиатҳои ҳамаи иштирокчиёни бозори хизматрасонии таксӣ дар шаҳри Душанбе тавассути муайян намудани сиёсати тарифӣ ва андозаи асосноки комиссияҳо имкон медиҳад, ки ронанда дар доираи меъёрҳои қонунгузорӣ фаъолият намуда, бе зиёд намудани вақти кор (аз 8 то 9 соат) даромади муносиб ба даст орад. Ин равиш ҳамзамон ба баланд гардидани сифати хизматрасонӣ, рушди рақобати солим дар бозори таксӣ ва беҳтар шудани бехатарии ҳаракат дар роҳ мусоидат менамояд.



Расми 4 – Таъсири пастӣ даромаднокии ронандагонӣ таксӣ ба бехатарӣ ва сифати хизматрасонӣ
Figure 4 – The impact of low taxi driver income on safety and service quality

Таҳлили таҷрибаи байналмилалӣ оид ба комиссияи агрегаторҳо ва автопаркҳо

Таҳлили таҷрибаи кишварҳои минтақа нишон медиҳад, ки дар бозори муосири хизматрасони таксӣ муносибатҳои байни ронанда – агрегатор – автопарк (оператор) асосан ба комиссия аз даромади воқеии ронанда асос ёфтаанд [11, 14–18]. Дар аксари давлатҳо пардохти собити ҳаррӯза истифода намешавад ё танҳо ҳамчун шакли ихтиёрӣ аз ҷониби баъзе автопаркҳо пешниҳод мегардад.

Кишвар	Шаҳр	Агрегатор	Комиссияи агрегатор	Комиссияи автопарк	Ҳаҷми умумӣ	Системаи пардохт
Ўзбекистон	Тошканд	TAXI WB Taxi	15-17%	алҳол дар шартнома	~17%	Фоииз
Ўзбекистон	Тошканд	Yandex Go	~16%	то 4%	~20%	Фоииз
Қазоқистон	Алматы, Остона	Yandex Go	~16%	то 4%	~20%	Фоииз
Қазоқистон	Алматы, Остона	iD inDrive	10-12%	мавҷуд нест	10-12%	Фоииз
Қирғизистон	Бишкек	Yandex Go	2% ё 8,81 сомонӣ/рӯз	~2%	2% ё 8,81 сомонӣ/рӯз	Фоииз/Пардохти собит
Русия	Маскав	Yandex Go	20-25%	2-10%	22-35%	Фоииз
Русия	Маскав	Везет	15-20%	то 5%	~20%	Фоииз
Белоруссия	Минск	Yandex Go	15-20%	3-5%	~20%	Фоииз
Тоҷикистон	Душанбе	Модели амалкунанда	-	100 сомонӣ / рӯз	100 сомонӣ / рӯз	Пардохти собит



Расми 5 – Таҷрибаи кишварҳо оид ба комиссияи агрегаторҳо ва автопаркҳо

Figure 5 – Country experience with aggregator and fleet commissions

Натиҷаҳо (Results)

Модели пешниҳодшуда бо истифодаи низоми фоиизи комиссия

Дар ин ҷо модели нави иқтисодӣ-математикӣ бо истифода аз низоми фоиизи комиссия (аз 0% то 30%) таҳия ва ҳисоб карда шудааст. Дар модели мазкур комиссия на ҳамчун пардохти собити ҳаррӯза, балки ҳамчун фоииз муайян аз даромади воқеии ронанда ҳисоб карда мешавад.

Комиссия танҳо аз даромади дар 276 рӯзи воқеии корӣ ситонида мешавад. Аз ин рӯ, дар рӯзҳои истироҳат, беморӣ, таъмири воситаи нақлиёт ва дигар рӯзҳои ғайрикории комиссия ситонида намешавад.

Барои таҳлили таъсири меъёри комиссия ба фаъолияти иқтисодии ронандагон ҳисобҳо барои ҳар як сатҳи комиссия аз 0% то 30% бо қадами 1% анҷом дода шуданд (расмҳои 6, 7 ва 8).

Ҳисоби даромади солони ронанда

Даромади солони ронанда аз рӯи формулаи зерин муайян карда мешавад:

$$R_{\text{сол}} = R_{\text{рӯз}} \times D_{\text{сол}}, \text{сомонӣ}, \quad (24)$$

ки дар он: $R_{\text{сол}}$ – даромади солони ронанда, сомонӣ; $R_{\text{рӯз}}$ – даромади миёнаи якрӯза, сомонӣ; $D_{\text{сол}}$ – шумораи рӯзҳои воқеии фаъолияти ронанда дар як сол, рӯз.

$$R_{\text{сол}} = 540 \times 276 = 149040, \text{сомонӣ},$$

Ҳамин тариқ, дар модели умумии иқтисодӣ формулаи асосӣ чунин мешавад:

$$P_{\text{моҳ}} = \frac{(R_{\text{рӯз}} \times D_{\text{сол}}) - (C_{\text{асосӣ}} + (R_{\text{рӯз}} \times D_{\text{сол}}) \times \frac{k}{100})}{12}, \text{ сомонӣ}, \quad (25)$$

ки дар он: $P_{\text{моҳ}}$ – фоидаи миёнаи моҳонаи ронанда; $R_{\text{рӯз}}$ – даромади миёнаи як рӯз; $D_{\text{сол}}$ – рӯзҳои воқеии фаъолияти солона; $C_{\text{асосӣ}}$ – хароҷоти доимии солона бе комиссия; k – меъёри комиссия (%).

Формулаи ҳисоби Хароҷоти доимӣ ($C_{\text{доимӣ}}$)

Хароҷоти доимӣ ($C_{\text{асосӣ}}$) - ин ҳама алоҳидагии хароҷоти солонаи ронанда бе назардошти пардохти комиссия ё ҳаққи ширкат мебошад.

Барои воситаи нақлиёти шахсӣ:

$$C_{\text{асосӣ.шахсӣ}} = C_{\text{шах.умумӣ}} - C_{\text{ш}} = 114035 - 35300 = 78735, \text{ сомонӣ}, \quad (26)$$

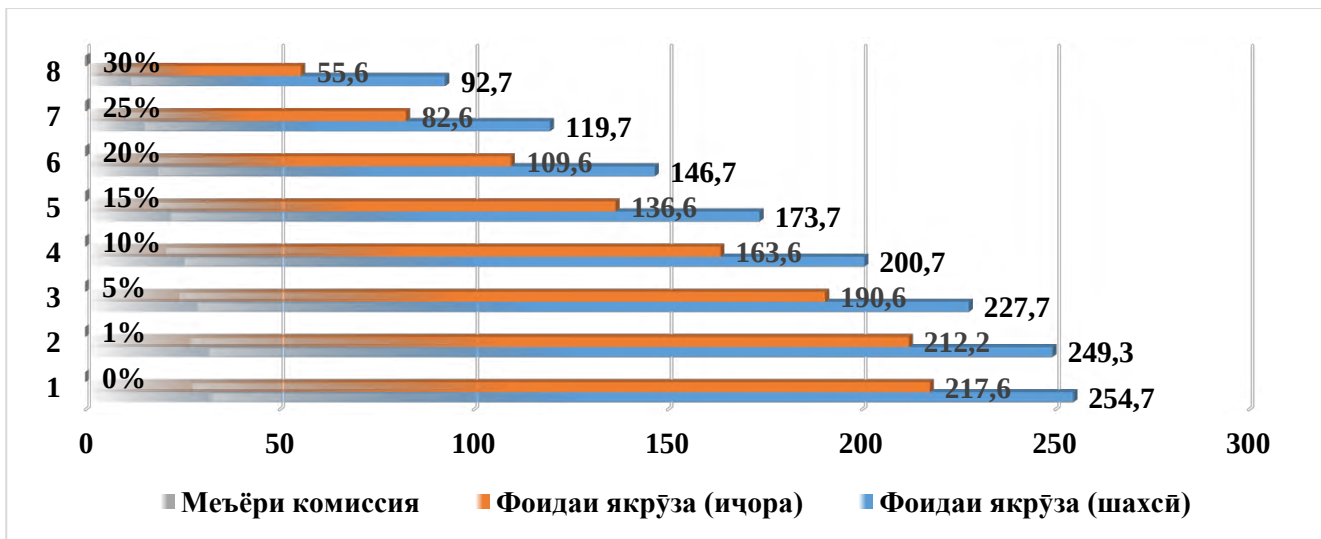
$$C_{\text{шах.умумӣ}} = 114035 \text{ сомонӣ (хароҷоти умумии солона).}$$

Барои воситаи нақлиёти иҷора:

$$C_{\text{асосӣ.иҷора}} = C_{\text{иҷо.умумӣ}} - C_{\text{ш}} = 124280 - 35300 = 88980, \text{ сомонӣ} \quad (27)$$

$$C_{\text{иҷо.умумӣ}} = 124280 \text{ сомонӣ (хароҷоти умумии солонаи иҷора);}$$

$$C_{\text{ш}} = 35300 \text{ сомонӣ (пардохти собити ҳаққи ширкат).}$$



Расми 6 – Муқоисаи фоидаи ронанда вобаста ба меъёри комиссия (0%–30%) барои воситаи нақлиёти шахсӣ ва иҷора дар як рӯз (сомонӣ)

Figure 6 – Comparison of driver profits depending on commission rates (0%–30%) for personal and rental vehicles per day (TJS)

Шарҳи матнии графики таҳлили нуқтаи безарарӣ

График вобастагии даромад ва хароҷоти фаъолияти таксӣ-ро аз масофаи тайшуда нишон медиҳад. Дар меҳвари уфуқӣ масофаи тайшуда бо километр ва дар меҳвари амудӣ ҳаҷми даромад ё хароҷот бо сомонӣ ҷойгир шудааст.

Маъноии нуқтаи безарарӣ

Нуқтаи безарарӣ ҳолатест, ки даромад ба хароҷоти умумӣ баробар гардида, фоида ба сифр баробар мешавад:

$$\Pi = R - C = 0, \text{ сомонӣ} \quad (28)$$

Аз ин бармеояд:

$$R = C$$

Формулаи умумии муайян намудани масофаи критикӣ чунин аст:

$$L_{\text{критикӣ}} = \frac{C_{\text{собит}}}{T_{1\text{км}} - C_v}, \text{ км} \quad (29)$$

дар ин ҷо: $L_{\text{критикӣ}}$ - масофаи зарурӣ барои расидан ба нуқтаи безарарӣ; $C_{\text{собит}}$ - хароҷоти собит; $T_{1\text{км}}$ - даромад аз як километр; C_v - хароҷоти тағйирёбанда барои як километр; R - даромади умумӣ аз хизматрасонии таксӣ, сомонӣ; P - фоидаи фаъолияти ронандаи таксӣ, сомонӣ; C - хароҷоти умумии фаъолияти таксӣ, сомонӣ.

Хати даромад

Дар график хати кабуд даромади таксиро нишон медиҳад. Бо назардошти тарифи миёнаи 3 сомонӣ барои як километр, функсияи даромад чунин аст:

$$R(L) = 3L \quad (30)$$

Яъне, бо зиёд шудани ҳар як километр даромад 3 сомонӣ зиёд мешавад. Азбаски дар оғози фаъолият масофа ба сифр баробар аст, хати даромад аз нуқтаи сифр оғоз мегардад.

Дар масофаи солонаи **49 680 км**: $R = 3 \times 49\,680 = 149\,040$ сомонӣ.

Хароҷоти таксии иҷора

Хати норанҷӣ хароҷоти таксии иҷораро ифода мекунад. Функсияи он чунин мебошад:

$$C_{\text{иҷора}}(L) = 24966 + 1,999L, \text{ сомонӣ} \quad (31)$$

Дар ин формула: 24 966 сомонӣ, хароҷоти собит; 1,9991 сомонӣ/км - хароҷоти тағйирёбанда барои ҳар километр.

Дар нуқтаи безарарӣ: $3L = 24\,966 + 1,999L$

$$L_{\text{критикӣ}} \approx 24\,943, \text{ км}$$

Ҳангоми тай намудани 180 км дар як рӯзи корӣ:

$$\frac{24943}{180} \approx 139, \text{ рӯз} \quad (32)$$

Пас, таксии иҷора баъди тай намудани тақрибан 24 943 км, ё пас аз 139 рӯзи корӣ, ба нуқтаи безарарӣ мерасад. То ин нуқта хароҷот аз даромад зиёдтар аст. Баъди гузаштан аз ин масофа фаъолияти таксӣ ба гирифтани фоида оғоз мекунад.

Дар масофаи солонаи 49 680 км хароҷоти таксии иҷора тақрибан:

$$C_{\text{иҷора}} \approx 124\,280, \text{ сомонӣ};$$

Фоидаи солона: $P_{\text{иҷора}} = 149\,040 - 124\,280 = 24\,760$, сомонӣ.

Хароҷоти таксии шахсӣ

Хати сабз хароҷоти таксиро ҳангоми истифодаи воситаи нақлиёти шахсӣ нишон медиҳад. Функсияи хароҷот чунин аст: $C_{\text{шахсӣ}}(L) = 56688 + 1,154L$, сомонӣ,

дар ин ҷо: 56 688 сомонӣ - хароҷоти собит, аз ҷумла арзиши вобаста ба соҳибӣ ва фарсудаҷавии воситаи нақлиёт; 1,154 сомонӣ/км - хароҷоти тағйирёбанда барои ҳар километр.

Барои муайян намудани нуқтаи безарарӣ: $3L = 56\,688 + 1,154L$

$$L_{\text{критикӣ}} = 30\,714, \text{ км}$$

Шумораи рӯзҳои зарурӣ: $30\,714/180 \approx 171$ рӯз.

Пас, таксии шахсӣ баъди тай намудани тақрибан 30 714 км, ё пас аз 171 рӯзи корӣ, ба нуқтаи безарарӣ мерасад.

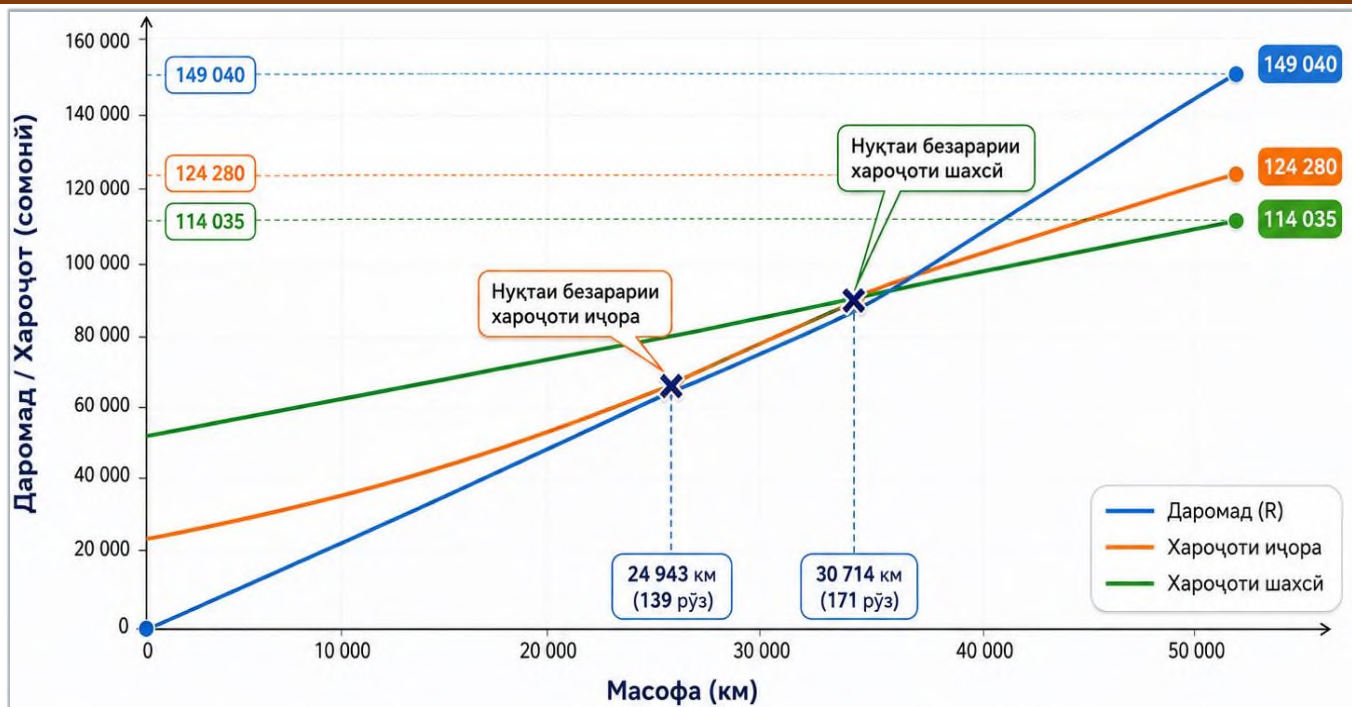
Дар масофаи солонаи 49 680 км хароҷоти таксии шахсӣ тақрибан: $C_{\text{шахсӣ}} \approx 114\,035$, сомонӣ.

Фоидаи солона: $P_{\text{шахсӣ}} = 149\,040 - 114\,035 = 35\,005$, сомонӣ.

Муқоисаи ду шакли фаъолият

Таксии иҷора ба нуқтаи безарарӣ зудтар мерасад: $24\,943 \text{ км} < 30\,714, \text{ км}$.

Сабаби асосӣ он аст, ки хароҷоти собити таксии иҷора нисбатан пасттар мебошад. Аммо хароҷоти тағйирёбандаи он барои ҳар километр баландтар аст: $1,999 > 1,154$, сомонӣ/км.



Расми 7 – Муайян намудани нуқтаи безарарии фаъолияти таксӣ ҳангоми истифодаи воситаи нақлиёти иҷоравӣ ва шахсӣ

Figure 7 – Determining the break-even point for taxi operations when using rented and personal vehicles

Аз ин рӯ, дар масофаҳои калон таксии шахсӣ аз ҷиҳати иқтисодӣ самараноктар мегардад. Дар охири давраи ҳисобӣ хароҷоти таксии шахсӣ аз хароҷоти таксии иҷора ба андозаи зерин камтар аст: $124\,280 - 114\,035 = 10\,245$ сомонӣ.

Ҳамакунин таксии шахсӣ низ нисбат ба таксии иҷора зиёдтар мебошад: $35\,005 - 24\,760 = 10\,245$ сомонӣ.

График нишон медиҳад, ки таксии иҷора зудтар ба нуқтаи безарарӣ мерасад, вале дар масофаи калони фаъолият хароҷоти он босуръаттар афзоиш меёбад. Таксии шахсӣ дертар ба нуқтаи безарарӣ мерасад, зеро хароҷоти собити он баландтар аст, аммо аз сабаби паст будани хароҷоти тағйирёбанда барои ҳар километр дар давраи дарозмуддат ғайрибаробар мебошад.

Дар қисми поёнии расм «дар 50 000 км» навишта шудааст, аммо нишондиҳандаи даромади 149 040 сомонӣ ба масофаи 49 680 км мувофиқ аст. Агар масофа воқеан 50 000 км бошад, даромад бояд чунин шавад: $R = 3 \times 50\,000 = 150\,000$ сомонӣ.

Натиҷаҳои таҳлили ҷадвали пешниҳодшуда нишон медиҳанд, ки дар тамоми диапазони тағйирёбии меъёри комиссия аз 0% то 30%, истифодаи воситаи нақлиёти шахсӣ нисбат ба воситаи нақлиёти иҷора аз ҷиҳати иқтисодӣ самараноктар мебошад. Сабаби асосии ин фарқият дар он аст, ки ронандаи воситаи нақлиёти шахсӣ танҳо хароҷоти истифода ва нигоҳдории автомобилро ба зимма гирифта, пардохти иҷораи воситаи нақлиётро анҷом намедиҳад.

Ҳангоми меъёри комиссияи 1%, ҳамакунин ронандаи воситаи нақлиёти шахсӣ дар як рӯз тақрибан 249,3 сомонӣ, дар як моҳ 5 735 сомонӣ ва дар як сол 68 815 сомонӣ-ро ташкил медиҳад. Дар ҳамаи шароит, ронандаи воситаи нақлиёти иҷоравӣ мутаносибан 212,2 сомонӣ дар як рӯз, 4 881 сомонӣ дар як моҳ ва 58 570 сомонӣ дар як сол даромад мегирад. Яъне, ҳатто дар сатҳи пастии комиссия, фарқияти солони даромади ду гурӯҳи ронандагон 10 245 сомонӣ мебошад.

Ҳангоми меъёри комиссияи 10%, ҳамакунин ронандаи воситаи нақлиёти шахсӣ дар як рӯз тақрибан 200,7 сомонӣ, дар як моҳ 4 617 сомонӣ ва дар як сол 55 401 сомонӣ-ро ташкил медиҳад. Дар ҳамаи шароит, ронандаи воситаи нақлиёти иҷоравӣ мутаносибан 163,6 сомонӣ дар як рӯз, 3 763 сомонӣ дар як моҳ ва 45 156 сомонӣ дар як сол даромад мегирад. Фарқияти байни ду модели фаъолият дар ин ҳолат 37,1 сомонӣ дар як рӯз, 854 сомонӣ дар як моҳ ва 10 245 сомонӣ дар як сол мебошад.

Бо зиёд гардидани меъёри комиссия, таъсири он ба даромади софи ронандагон бештар аён мегардад. Масалан, Ҳангоми комиссияи 20%, ки ба шароити воқеии фаъолияти агрегаторҳо наздик мебошад, ронандаи воситаи нақлиёти шахсӣ дар як рӯз тақрибан 146,7 сомонӣ, дар як моҳ 3 375 сомонӣ ва дар як сол 40 497 сомонӣ фоидаи соф мегирад. Дар ҳамин ҳол, ронандаи воситаи нақлиёти иҷоравӣ танҳо 109,6 сомонӣ дар як рӯз, 2 521 сомонӣ дар як моҳ ва 30 252 сомонӣ дар як сол даромад ба даст меорад. Фарқи байни онҳо мутаносибан 37,1 сомонӣ дар як рӯз, 854 сомонӣ дар як моҳ ва 10 245 сомонӣ дар як солро ташкил медиҳад.

Хулоса (Conclusions)

Навгониҳои илмӣ таҳқиқот аз таҳияи модели комплекси иқтисодӣ-математикии фаъолияти воситаҳои нақлиёти барқӣ дар бозори таксии шаҳри Душанбе иборат мебошад, ки дар он бори аввал дар доираи таҳқиқоти мазкур ҳароҷоти воситаи нақлиёти шахсӣ ва иҷоравӣ, арзиши 1 км ҳаракат, даромадноқӣ, фонди вақти кории ронанда, меъёри комиссия ва нуқтаи безарарӣ дар як низоми ягонаи ҳисобӣ муттаҳид карда шудаанд. Модели фоизи комиссия дар диапазони 0–30 % таҳия гардида, таъсири он ба фоидаи рӯзона, моҳона ва солонаи ронанда муайян карда шудааст. Ҳамзамон, модели математикии барои муайян намудани масофаи критикии расидан ба нуқтаи безарарӣ барои воситаҳои нақлиёти шахсӣ ва иҷоравӣ пешниҳод гардида, робитаи байни даромаднокии ронанда, давомнокии вақти корӣ, ҳастагӣ, сифати хизматрасонӣ ва бехатарии ҳаракат асоснок карда шудааст. Дар асоси натиҷаҳо гузариш аз пардохти собитӣ ҳаррӯза ба низоми комиссияи вобаста ба даромади воқеӣ ҳамчун механизми мутавозинсозии манфиатҳои ронанда, оператор ва мусофир пешниҳод мегардад.

Муҳаррир: Юнусӣ Ф.М. — н.и.т. и.в. дотсент қабедраи таълиқи интиқол ва идора дар нақлиёти ДҶТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ.

Адабиёт

1. Tengilimoglu, O. Evaluating the mileage and time efficiency of ridesourcing services: Austin, Texas case / O. Tengilimoglu, Z. Wadud // *Transport Policy*. – 2021. – Vol. 116. – P. 290–300. – DOI: 10.1080/19427867.2021.1892936.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 2 июня 2023 г. № 908 «Об утверждении норм рабочего времени, времени отдыха, норм времени управления транспортным средством для физических лиц, Правил учета рабочего времени, времени отдыха, времени управления транспортным средством физическими лицами и о внесении изменений в Правила дорожного движения Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406877306/> (дата обращения: 23.05.2026).
3. Фадеев, Д.С. Особенности организации труда водителей и оценка их влияния на эффективность работы предприятия / Д.С. Фадеев, В.В. Волковский // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2016. – № 1 (108). – С. 143–151.
4. Европейское управление по вопросам труда. Правила продолжительности вождения и отдыха [Электронный ресурс]. – URL: https://www.ela.europa.eu/sites/default/files/202310/Driving_and_Resting_Times_Russian.pdf (дата обращения: 02.06.2026).
5. BYD E2: всё о масле – когда менять, какое масло и какой объём [Электронный ресурс]. – URL: https://byd2.uz/poleznye-stati-o-byd-e2-2023/byd_e2_vse_o_masle_kogda_menyat_kakoe_maslo_kakoi_obyom_i_td/ (дата обращения: 24.06.2026).
6. Car depreciation guide [Electronic resource] // *Motorway*. – Available at: <https://motorway.co.uk/sell-my-car/guides/car-depreciation-guide> (Accessed: 27.06.2026).
7. WB Taxi и Yandex Taxi: сравнительный анализ условий работы водителей [Электронный ресурс] // *Driver Pro*. – URL: <https://driver-pro.uz/blog/wb-taxi-vs-yandex/> (дата обращения: 27.06.2026).
8. Kazakhstan monitoring taxi market: Yandex Go controls 90% share [Electronic resource] // *Orda.kz*. – Available at: <https://en.orda.kz/kazakhstan-monitoring-taxi-market-yandex-go-controls-90-share-5517/> (Accessed: 02.07.2026).
9. Pachua, L. Taxi-driving as an economic activity / L. Pachua // *International Journal of Advanced Research*. – 2020. – Vol. 8, No. 6. – P. 1228–1233. – DOI: 10.21474/IJAR01/11209.
10. Aarhaug, J. Competitive tendering in an entry regulated market – an accident waiting to happen? / J. Aarhaug // *European Transport Research Review*. – 2015. – Vol. 7. – Art. 17. – DOI: 10.1007/s12544-015-0166-4.
11. Bekken, J.T. Taxi Regulation in Europe / J.T. Bekken. – Oslo: Institute of Transport Economics, 2003.
12. Bekken, J.T. Impact of Taxi Market Regulation: An International Comparison / J.T. Bekken, F. Longva. – Oslo: Institute of Transport Economics, 2003. – TØI Report 658/2003.
13. Пиров, Ж.Т. Анализ организации дорожного движения в городе Душанбе / Ж.Т. Пиров, А.М. Умирзоков, А.А. Соибов, Х.Б. Хусейнов // *iPolytech Journal*. – 2017. – Т. 21, № 6 (125). – С. 142–148.

14. Пиров, Ж.Т. Состояние дорожно-транспортного травматизма в Республике Таджикистан / Ж.Т. Пиров, Т.А. Копылова, Р.Н. Горбунов // iPolytech Journal. – 2017. – Т. 21, № 3 (122). – С. 155–165.
15. Пиров, Ж.Т. Сегмент при оценке качества организации дорожного движения на УДС (на примере г. Душанбе) / Ж.Т. Пиров // Book of Proceedings. – 2019. – С. 241.

References

1. Tengilimoglu, O. Evaluating the mileage and time efficiency of ridesourcing services: Austin, Texas case / O. Tengilimoglu, Z. Wadud // Transport Policy. – 2021. – Vol. 116. – P. 290–300. – DOI: 10.1080/19427867.2021.1892936.
2. Decree of the Government of the Russian Federation No. 908 of June 2, 2023 “On Approval of the Standards for Working Hours, Rest Periods, Driving Time Standards for Individuals, the Rules for Recording Working Hours, Rest Periods and Driving Time by Individuals, and on Amendments to the Traffic Regulations of the Russian Federation” [Electronic resource]. – Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406877306/> (Accessed: 23.05.2026).
3. Fadeev, D.S. Specific Features of Drivers’ Work Organization and Assessment of Their Impact on the Efficiency of Enterprise Operations / D.S. Fadeev, V.V. Volkovsky // Proceedings of Irkutsk State Technical University. – 2016. – No. 1 (108). – P. 143–151. [in Russian].
4. European Labour Authority. Driving and Resting Times [Electronic resource]. – Available at: https://www.ela.europa.eu/sites/default/files/202310/Driving_and_Resting_Times_Russian.pdf (Accessed: 02.06.2026). [in Russian].
5. BYD E2: Everything About Oil – When to Change It, Which Oil to Use and What Quantity [Electronic resource]. – Available at: https://byde2.uz/poleznye-statii-o-byd-e2-2023/byd_e2_vse_o_masle_kogda_menyat_kakoe_maslo_kakoi_obyom_i_td/ (Accessed: 24.06.2026). [in Russian].
6. Car depreciation guide [Electronic resource] // Motorway. – Available at: <https://motorway.co.uk/sell-my-car/guides/car-depreciation-guide> (Accessed: 27.06.2026).
7. WB Taxi and Yandex Taxi: Comparative Analysis of Drivers’ Working Conditions [Electronic resource] // Driver Pro. – Available at: <https://driver-pro.uz/blog/wb-taxi-vs-yandex/> (Accessed: 27.06.2026). [in Russian].
8. Kazakhstan Monitoring Taxi Market: Yandex Go Controls 90% Share [Electronic resource] // Orda.kz. – Available at: <https://en.orda.kz/kazakhstan-monitoring-taxi-market-yandex-go-controls-90-share-5517/> (Accessed: 02.07.2026).
9. Pachua, L. Taxi-driving as an economic activity / L. Pachua // International Journal of Advanced Research. – 2020. – Vol. 8, No. 6. – P. 1228–1233. – DOI: 10.21474/IJAR01/11209.
10. Aarhaug, J. Competitive tendering in an entry regulated market – an accident waiting to happen? / J. Aarhaug // European Transport Research Review. – 2015. – Vol. 7. – Art. 17. – DOI: 10.1007/s12544-015-0166-4.
11. Bekken, J.T. Taxi Regulation in Europe / J.T. Bekken. – Oslo: Institute of Transport Economics, 2003.
12. Bekken, J.T. Impact of Taxi Market Regulation: An International Comparison / J.T. Bekken, F. Longva. – Oslo: Institute of Transport Economics, 2003. – TØI Report 658/2003.
13. Pirov, Zh.T. Analysis of Traffic Management Organization in the City of Dushanbe / Zh.T. Pirov, A.M. Umirokozov, A.A. Soibov, Kh.B. Khuseynov // iPolytech Journal. – 2017. – Vol. 21, No. 6 (125). – P. 142–148. [in Russian].
14. Pirov, Zh.T. Road Traffic Injury Situation in the Republic of Tajikistan / Zh.T. Pirov, T.A. Kopylova, R.N. Gorbunov // iPolytech Journal. – 2017. – Vol. 21, No. 3 (122). – P. 155–165. [in Russian].
15. Pirov, Zh.T. Segment in Assessing the Quality of Traffic Management Organization on the Road Network (Case Study of Dushanbe) / Zh.T. Pirov // Book of Proceedings. – 2019. – P. 241.

Маълумот оид ба муаллиф:

Пиров Чаҳонгир Тиллоевич, номзади илмҳои техники, муаллими калони Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ; муовини аввали директори Муассисаи давлатии «Нақлиёти автомобилӣ ва хизматрасонии логистикӣ»-и Вазорати нақлиёти Ҷумҳурии Тоҷикистон. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0553-4338>. E-mail: vilia-7@mail.ru

Сведения об авторе:

Пиров Жаҳонгир Тиллоевич, кандидат технических наук, старший преподаватель Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими; первый заместитель директора Государственного учреждения «Автомобильный транспорт и логистическое обслуживание» Министерства транспорта Республики Таджикистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0553-4338>. E-mail: vilia-7@mail.ru

Information about the author:

Pirov Jahongir Tilloevich, Ph.D. (Eng.), Senior Lecturer, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi; First Deputy Director of the State Institution “Automobile Transport and Logistics Services” of the Ministry of Transport of the Republic of Tajikistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0553-4338>. E-mail: vilia-7@mail.ru

СОПОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ И НОРМ РАСХОДА ТОПЛИВА АВТОМОБИЛЯ С ДВС В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ (НА ПРИМЕРЕ ТРАССЫ КУЛЯБ – ШОХОН)»

Абдулло Мамадамон, Саъдуллозода Шахриёр, Сайфиддинзода Одил

Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

Проведено сопоставление действующей в Республике Таджикистан методики дифференцированных норм расхода топлива для автомобилей с ДВС и предложенной физико-математической модели энергопотребления электромобиля с системой рекуперативного торможения. Оценка выполнена на горном маршруте Куляб – Шамсиддин Шохин – Шохон (64 км, перевал 1980 м). Для бензинового автомобиля массой 2100 кг (базовый расход 10 л/100 км) высотная надбавка дает прирост расхода на 9,8% (с 6,40 до 7,03 л). Для электромобиля аналогичной массы при базовом горизонтальном расходе 7,41 кВт·ч подъем увеличивает энергопотребление до 9,09 кВт·ч (+22,7%), а обратный спуск за счет рекуперации снижает его до 5,93 кВт·ч (–20,0%). Разница между направлениями достигает 3,2 кВт·ч, а средний расход за круговой рейс (7,51 кВт·ч) превышает базовый лишь на 1,4%. Установлено, что существующие нормативные методики, применяющие одинаковые высотные надбавки в обоих направлениях, не учитывают возврат гравитационной работы через рекуперацию. Это обосновывает необходимость пересмотра принципов нормирования эксплуатационных характеристик электрифицированного транспорта. При действующих в Таджикистане тарифах удельные эксплуатационные затраты на маршруте различаются в 22–26 раз в пользу электромобиля.

Ключевые слова: электромобиль; дифференцированные нормы расхода топлива; горная эксплуатация; рекуперативное торможение; коэффициент высотной корректировки; сравнительный анализ; Республика Таджикистан.

КИЁСИ МОДЕЛҲОИ ИСТЕЪМОЛИ ЭНЕРГИЯИ ЭЛЕКТРОМОБИЛ ВА МЕЪЁРҲОИ САРФИ СӢЗИШВОРИИ АВТОМОБИЛИ ДОРОИ МДС ДАР ШАРОИТИ КӢҲИСТОН (ДАР МИСОЛИ ҚИТӢАИ РОҲИ КӢЛОБ – ШОҲОН)

Абдулло Мамадамон, Саъдуллозода Шахриёр, Сайфиддинзода Одил

Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола киёси усули амалкунандаи меъёрҳои тафриқавии сарфи сӯзишворӣ барои автомобилҳои дорои муҳаррики сӯзиши дохилӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон ва модели пешниҳодшудаи физикию математикии истеъмоли энергияи электромобил бо системаи тормоздиҳии рекуперативӣ гузаронида шудааст. Арзёбӣ дар ҳатсайри кӯҳии Кӯлоб – Шамсиддин Шохин – Шохон (64 км, ағба дар баландии 1980 м) иҷро гардид. Барои автомобили бензинии дорои массаи 2100 кг (меъёри заминавӣ 10 л/100 км) иловапулии баландӣ афзоиши сарфро 9,8% (аз 6,40 то 7,03 л) ташкил медиҳад. Барои электромобили дорои ҳамон тавсифоти массивию андозавӣ ҳангоми сарфи заминавии уфуқии 7,41 кВт·соат, баромад ба баландӣ истеъмоли энергияро то 9,09 кВт·соат (+22,7%) зиёд мекунад, вале фаромадани бозгашт аз ҳисоби рекуператсия онро то 5,93 кВт·соат (–20,0%) коҳиш медиҳад. Фарқияти байни самтҳо ба 3,2 кВт·соат мерасад ва сарфи миёна дар сафари даврагӣ (7,51 кВт·соат) аз нишондиҳандаи заминавӣ ҳамагӣ 1,4% зиёд аст. Муайян карда шуд, ки усулҳои меъёрии амалкунанда, ки дар ду самти ҳаракат иловапулиҳои якхелаи баландиро татбиқ мекунад, бозгашти қори гравитатсиониро тавассути тормоздиҳии рекуперативӣ ба назар намегиранд. Ин зарурати азнавирии принципҳои меъёрбандии тавсифоти истифодабарии нақлиёти барқиро асос мебахшад. Ҳангоми тарифҳои амалкунанда дар Тоҷикистон фарқияти ҳарочоти мушаххаси истифодабарӣ дар ин ҳатсайр 22–26 маротиба ба фоидаи электромобилро ташкил медиҳад.

Калидвожаҳо: автомобили барқӣ; меъёрҳои дифференсалии харҷи сӯзишворӣ; истифода дар кӯҳистон; боздории рекуперативӣ; коэффициентҳои танзими баландӣ; таҳлили муқоисавӣ; Ҷумҳурии Тоҷикистон.

COMPARISON OF ELECTRIC VEHICLE ENERGY CONSUMPTION MODELS AND INTERNAL COMBUSTION ENGINE VEHICLE FUEL CONSUMPTION STANDARDS IN MOUNTAINOUS CONDITIONS (CASE STUDY: KULOB – SHOHON ROUTE)

Abdullo Mamadamon, Sadullozoda Shahriyor, Sayfiddinzoda Odil

Tajik Technical University named after academician M. S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

This paper presents a comparative analysis between the fuel consumption standards for internal combustion engine vehicles currently effective in the Republic of Tajikistan and a previously proposed physical-mathematical model for electric vehicle energy consumption with regenerative braking. The evaluation was conducted on a challenging mountainous route, Kulyab – Shamsiddin Shohin – Shohon (64 km, mountain pass at 1980 m). For a gasoline vehicle weighing 2100 kg (base rate of 10 L/100 km), the elevation surcharge increases consumption by 9.8% (from 6.40 to 7.03 L). For an electric vehicle of equivalent mass, given a baseline flat-terrain consumption of 7.41 kWh, uphill driving increases energy consumption to 9.09 kWh (+22.7%), whereas downhill driving with regenerative braking reduces it to 5.93 kWh (–20.0%). The directional disparity reaches 3.2 kWh, while the average round-trip consumption (7.51 kWh) exceeds the baseline horizontal value by only 1.4%. It

is shown that existing standardized methodologies applying equal elevation surcharges in both directions fail to account for the recovery of gravitational potential energy via regenerative braking. These findings justify the necessity of revising operational performance assessment methodologies for electrified transport. Under current electricity and fuel tariffs in Tajikistan, the difference in specific operating costs along this route reaches 22–26 times in favor of the electric vehicle.

Keywords: *electric vehicle; differentiated fuel consumption standards; mountain operation; regenerative braking; altitude adjustment coefficient; comparative analysis; Republic of Tajikistan.*

1. Введение (Introduction)

Автомобильный транспорт в Республике Таджикистан эксплуатируется в условиях, существенно отличающихся от нормальных: значительная часть территории страны горная местность с перевалами выше 2000 м [3]. Для учёта повышенного расхода топлива автомобилями с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) при работе в горных условиях действует методика дифференцированных норм расхода, разработанная ранее одним из авторов настоящей работы совместно с коллегами [3]. Методика основана на корректировке линейной нормы расхода топлива через ступенчатую надбавку, зависящую от высоты работы автомобиля над уровнем моря, а также предлагает непрерывную форму поправки на основе барометрической зависимости атмосферного давления от высоты.

Рост парка электрифицированного транспорта во всём мире ставит перед транспортной наукой Республики Таджикистан вполне конкретную задачу: нужны рабочие методики оценки энергопотребления электромобилей именно в горных условиях [13, 21].

Электромобиль отличается от машины с двигателем внутреннего сгорания в двух принципиальных моментах. Во-первых, его силовая установка не зависит от плотности атмосферного воздуха — энергия уже запасена в электрохимическом виде в батарее. Во-вторых, он оснащён системой рекуперативного торможения, которая возвращает в батарею часть энергии, потраченной на подъём, когда автомобиль идёт под уклон [15, 16]. Именно эти две особенности невозможно корректно учесть в методике дифференцированных норм, разработанной когда-то для транспорта с ДВС.

Ранее была предложена численно устойчивая физико-математическая модель энергопотребления электромобиля с системой круиз-контроля при движении по маршруту с произвольным профилем высот [4]. Модель записана в виде системы из пяти обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка и интегрируется явным методом Рунге–Кутты четвёртого порядка. Гладкая аппроксимация переключения между режимами тяги и рекуперации на основе гиперболического тангенса обеспечивает устойчивость расчёта на всём диапазоне рабочих режимов.

Цель настоящей работы сопоставить количественные оценки расхода энергии, которые дают две разные методики, применительно к реальному горному маршруту. И уже на этом сравнении обсудить методологические различия, от которых напрямую зависит выбор инструмента для оценки эксплуатационных характеристик электрифицированного транспорта в условиях Республики Таджикистан.

2. Материалы и методы (Materials and methods)

2.1. Методика дифференцированных норм расхода топлива для автомобиля с ДВС

Согласно методике [3] и действующим методическим рекомендациям, индивидуальная линейная норма расхода топлива автомобиля с ДВС при работе в горных условиях определяется по формуле:

$$Q = \frac{H_s \cdot S + H_w \cdot W}{100} \cdot K_h,$$

где Q — линейная норма расхода топлива, л/100 км; S — пробег автомобиля, км; H_w — удельная норма расхода на транспортную работу, л/100 т·км; W — транспортная работа автомобиля, т·км; K_h — коэффициент высотной корректировки нормы.

Ступенчатая форма коэффициента K_h принимает фиксированные значения в зависимости от высотного диапазона.

$$K_h(h) = \begin{cases} 1,00, & h < 500 \text{ м}, \\ 1,05, & 500 \leq h < 1500 \text{ м}, \\ 1,10, & 1500 \leq h < 2000 \text{ м}, \\ 1,15, & 2000 \leq h < 3000 \text{ м}, \\ 1,20, & h \geq 3000 \text{ м}. \end{cases}$$

В работе [3] предложена и непрерывная форма этого коэффициента. Она строится на барометрической зависимости атмосферного давления от высоты:

$$K_h = \sqrt{\frac{P_0}{P_H}},$$

где P_0 — атмосферное давление на уровне моря, P_H — атмосферное давление на рабочей высоте. Для практических расчётов используется зависимость $P_H/P_0 = (1 - h/44330)^{5,255}$, следующая из стандартной атмосферной модели [9].

Физический смысл такой поправки понятен: с ростом высоты падает плотность воздуха и, как следствие, массовый заряд цилиндра. Экспериментальные исследования работы двигателей внутреннего сгорания на больших высотах это подтверждают — эффективная мощность снижается, а удельный расход топлива растёт [20].

Сравнение обеих форм коэффициента $K_h(h)$ с указанием высотного диапазона рассматриваемого маршрута приведено на рис. 1. Зелёной штриховкой отмечен участок высот маршрута Куляб – Шохон (600–1980 м). В этом диапазоне обе формулы дают близкие значения. Наибольшее расхождение наблюдается вблизи перевала: непрерывная форма превышает ступенчатое значение примерно на несколько процентных пунктов.

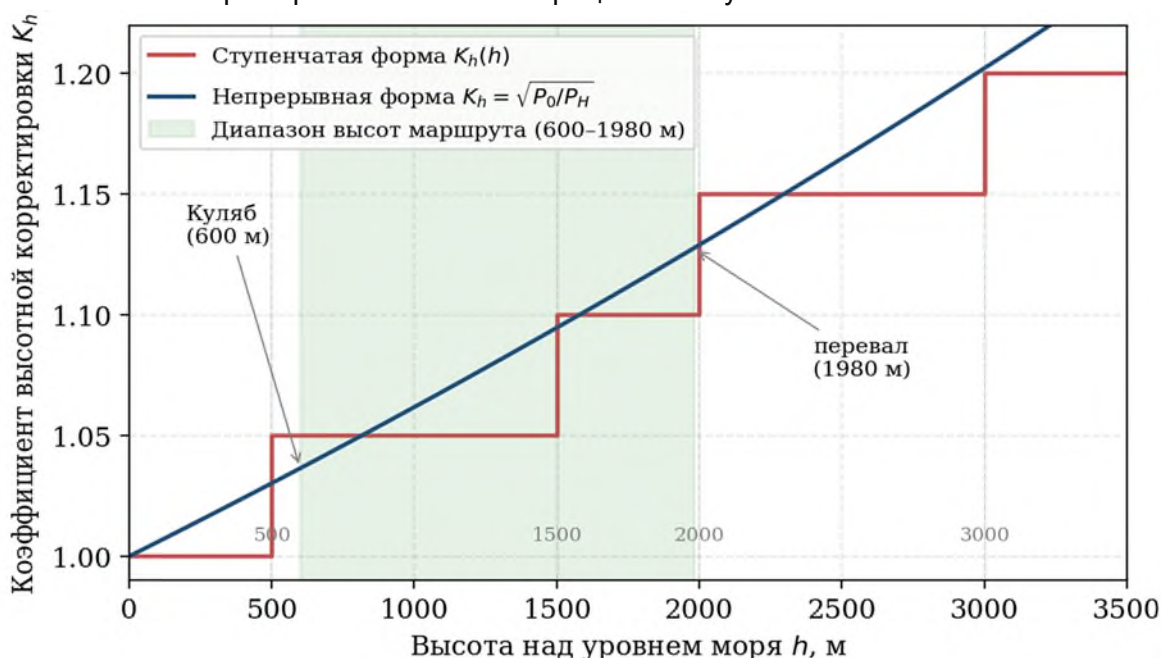


Рисунок 1 – Сравнение ступенчатой и непрерывной форм коэффициента высотной коррективы $K_h(h)$ по методике [3].

Figure 1 – Comparison of the step and continuous forms of the altitude correction coefficient $K_h(h)$ according to the method [4].

2.2. Физико-математическая модель энергопотребления электромобиля

Полное описание модели, обоснование её численной устойчивости и результаты верификации приведены в работе [2]. Здесь лишь краткое изложение методической основы.

Структура модели выстроена в русле подходов, уже принятых в мировой практике: расчёт энергопотребления электромобиля через мгновенную механическую мощность на колесе [7], построение тягового электропривода [6] и управление энергопотоками силовой установки [11].

Модель формулируется как система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка относительно пятимерного вектора состояния.

$$\mathbf{Y} = [s, v, \text{err}, \text{SOC}, E_{\text{net}}]^T$$

Его компоненты: положение автомобиля s на маршруте (м), скорость v (м/с), накопленная ошибка слежения регулятора err (м), степень заряда батареи SOC и накопленное потребление электрической энергии E_{net} (Дж). Пропорционально-интегральный круиз-контроль формирует силу тяги F_{trac} по отклонению текущей скорости от целевой v_{target} .

Полная сила сопротивления движению включает три составляющие: гравитационную, сопротивление качению и аэродинамическую [8, 14].

$$F_{\text{res}}(v, s) = m \cdot g \sin(\theta(s)) + m \cdot g \cdot C_r \cos(\theta(s)) + 1/2 \rho_{\text{air}} C_d A v^2.$$

Профиль высоты дороги $H(s)$ восстанавливается кубическим сплайном по опорным точкам геодезических измерений; угол наклона вычисляется непосредственно из этого сплайна ($\theta(s) = \arctan(dH/ds)$).

Электрическая часть модели описывает батарею простейшей эквивалентной схемой Тевенина [12]. Ток батареи определяется в замкнутой форме через дискриминант квадратного уравнения мощности.

$$I_{\text{bat}}(P_{\text{bat}}) = \frac{V_{\text{oc}} - \sqrt{V_{\text{oc}}^2 - 4R_{\text{int}}P_{\text{bat}}}}{2R_{\text{int}}}.$$

И вот здесь появляется ключевой методологический ход. Чтобы избежать разрыва производной в точке переключения между тягой и рекуперативным торможением, используется гладкая аналитическая аппроксимация на основе гиперболического тангенса. Этот приём устраняет разрыв и полностью восстанавливает четвёртый порядок точности численного интегрирования [4].

3. Результаты (Results)

3.1. Объект сопоставления

Для сопоставления двух методик выбран реальный участок автомобильной дороги, соединяющий Куляб с населённым пунктом Шохон через перевал Шамсиддин Шохин в Хатлонской области. Общая протяжённость маршрута 64 км.

По результатам натурных измерений высоты опорных точек составляют: 600 м в начальной точке в Кулябе, 1980 м на перевале Шамсиддин Шохин (20-й километр от Куляба) и 860 м в конечной точке в Шохоне. Чистый набор высоты в направлении от Куляба к Шохону равен +260 м. При этом промежуточный подъём достигает 1380 м (средний градиент 6,9 % на участке 0–20 км), а последующий спуск 1120 м (средний градиент 2,5 % на участке 20–64 км). В рамках модели [4] профиль высоты восстанавливается кубическим сплайном через эти три опорные точки.

Массово-габаритные и энергетические характеристики условного автомобиля-аналога, принятые в обеих методиках, соответствуют современному среднему транспортному средству D-сегмента: масса 2100 кг, лобовая площадь 2,45 м², аэродинамический коэффициент 0,28. Выбор параметров опирается на методологию энергетического анализа подсистем транспортного средства [5, 18]. Техническое состояние автомобиля-аналога принято соответствующим требованиям эксплуатационной безопасности [1, 2]. Плотность воздуха задана для нормальных условий [19], её изменение с высотой по стандартной атмосферной модели [9].

Для физической модели дополнительно введены: коэффициент сопротивления качению 0,012, номинальная энергоёмкость батареи 75 кВт·ч, коэффициенты полезного действия трансмиссии, двигателя и рекуперации 0,97, 0,95 и 0,90 соответственно. Целевая скорость поддерживается постоянной на уровне 60 км/ч. Такой выбор базового режима согласуется с практикой энергооптимального управления скоростью электромобиля [23].

Для методики дифференцированных норм принята базовая линейная норма расхода топлива, характерная для бензинового двигателя массового автомобиля D-сегмента без транспортной работы.

3.2. Результаты сопоставления

Расчёт по методике дифференцированных норм для автомобиля с ДВС даёт следующие результаты. Базовый расход топлива без учёта горных условий составляет определённое значение.

Ступенчатая форма коэффициента корректировки, усреднённая вдоль профиля маршрута с шагом 10 м, приводит к эффективному значению, соответствующему расходу 7,03 л, что на 9,8 % выше базового. Непрерывная форма коэффициента даёт расход 7,07 л (+10,5 %).

Расхождение между ступенчатой и непрерывной формами на рассматриваемом маршруте не превышает 0,7 процентных пункта. Такой результат хорошо согласуется с выводами работы работы [3] о сопоставимости обоих подходов на маршрутах, которые не выходят за границы отдельных высотных зон.

Теперь расчёт по физико-математической модели [4] для электромобиля с идентичными массово-габаритными характеристиками. Базовое значение чистого потребления электроэнергии на горизонтальном маршруте составляет определённую величину. При движении по реальному профилю в направлении Куляб → Шохон чистое потребление вырастает до 9,09 кВт·ч, а это уже +22,7 % к базе. В обратном направлении оно падает до 5,93 кВт·ч (–20,0 %).

Если усреднить по круговому рейсу, получается 7,51 кВт·ч. Превышение над базовым значением составляет всего 1,4 %. Все полученные результаты сведены в таблицу 1.

4. Обсуждение (Discussions)

Полученное сопоставление выявляет три методологически значимых наблюдения.

Во-первых, обе формы коэффициента высотной корректировки в методике дифференцированных норм [3] ступенчатая и непрерывная, дают близкие численные значения для рассматриваемого маршрута. Это ожидаемо: основная часть пути лежит в едином высотном диапазоне 1500–2000 м, где ступенчатая функция близка к соответствующему значению непрерывной формулы. Расхождение может заметно вырасти на маршрутах, которые пересекают границы высотных зон. Там ступенчатая функция терпит разрыв, а непрерывная обеспечивает монотонный переход.

Таблица 1 – Сравнение оценок расхода энергии/топлива на маршруте Куляб – Шохон по различным методикам
Table 1 – Comparison of energy/fuel consumption estimates on the Kulyab – Shohon route using various methods

Методика	Расход	Отклонение от базового ($\chi \equiv 0$)
Автомобиль с ДВС, базовый ($\chi \equiv 0$, $K_h = 1$)	6,40 л	—
Автомобиль с ДВС, ступенчатые надбавки [3]	7,03 л	+9,8%
Автомобиль с ДВС, непрерывная формула $K_h = \sqrt{P_0/P_H}$ [3]	7,07 л	+10,5%
Электромобиль, базовый ($\chi \equiv 0$, плоский маршрут) [2]	7,41 кВт·ч	—
Электромобиль, Куляб → Шохон [4]	9,09 кВт·ч	+22,7%
Электромобиль, Шохон → Куляб [4]	5,93 кВт·ч	–20,0%
Электромобиль, Куляб → Шохон → Куляб, среднее [4]	7,51 кВт·ч	+1,4%

Во-вторых, обе формы норм [3] дают одну и ту же величину надбавки в оба направления движения. Они зависят исключительно от высоты работы автомобиля. Такая инвариантность физически оправдана для ДВС. Потери на подъём безвозвратны: гравитационная работа рассеивается в тормозной системе на спуске в виде тепла. Кроме того, коэффициент отражает не только затраты энергии на подъём, но и снижение эффективности рабочего цикла двигателя при пониженном атмосферном давлении. Этот эффект тоже не зависит от направления.

В-третьих, физико-математическая модель [4] для электромобиля обнаруживает существенную асимметрию энергопотребления. В направлении с чистым подъёмом расход растёт на 22,7 %, в обратном падает на 20,0 % относительно базового горизонтального значения. Качественно это согласуется с результатами натурных исследований влияния продольного уклона [10, 21]. Однако при усреднении по круговому рейсу превышение составляет всего 1,4 % и практически совпадает с базовым значением плоского маршрута.

Именно здесь проявляется эффект рекуперативного торможения. Значительная часть гравитационной работы, затраченной на подъём, возвращается в батарею на последующем спуске [15, 16]. С точностью до потерь в трансмиссии, двигателе и электрохимической части батареи круговой маршрут в горах для электромобиля оказывается энергетически близок к движению по равнине.

Это свойство электрифицированного транспорта невозможно отразить в методике дифференцированных норм. Структура норм [3] исключает и отрицательные надбавки, и зависимость от направления движения. Более того, физические основания для введения барометрической зависимости, справедливые для ДВС (снижение массового расхода кислорода и связанное с ним падение эффективности цикла [20]), для электромобиля просто не работают. Батарея и тяговый двигатель сохраняют одинаковую эффективность независимо от высоты. Единственный высотно-зависимый эффект — снижение аэродинамического сопротивления из-за меньшей плотности воздуха действует в противоположную сторону: он уменьшает, а не увеличивает расход энергии.

Полученные наблюдения обосновывают целесообразность разработки специализированной методики оценки эксплуатационных характеристик электрифицированного транспорта в горных условиях. Такая методика должна опираться на физико-математическое моделирование с учётом характеристик конкретной силовой установки, реального профиля маршрута и направления движения, а также возможности возврата гравитационной работы через рекуперацию. Сопоставимая логика учёта рельефа уже реализуется в современных алгоритмах управления энергопотоками транспортных средств, работающих в горной местности [22]. Модель, представленная в работе [4], вполне пригодна в качестве базовой формулировки для такой методики.

Полученные значения расхода допускают прямой экономический перевод в условиях Республики Таджикистан. Для приблизительной оценки на момент подготовки работы приняты характерные тарифы: стоимость бензина АИ-92, 10 сомони за литр (по данным розничной торговли Хатлонской и других областей 2025 года), стоимость электроэнергии для бытовых потребителей — 0,3536 сомони за 1 кВт·ч (базовый тариф ОАО «Барки Точик» для населения без учёта повышенных ступеней потребления).

При этих исходных данных стоимость проезда автомобиля-аналога по маршруту Куляб – Шохон составляет:

- для автомобиля с ДВС: $7,03 \text{ л} \times 10 \text{ сомони/л} = 70,3 \text{ сомони}$ в одном направлении;
- для электромобиля в направлении Куляб → Шохон: $9,09 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \times 0,3536 \text{ сомони/(кВт} \cdot \text{ч)} = 3,21 \text{ сомони}$;
- для электромобиля с усреднением по круговому рейсу: $7,51 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \times 0,3536 \text{ сомони/(кВт} \cdot \text{ч)} = 2,66 \text{ сомони}$.

Соотношение стоимости проезда в пользу электромобиля достигает от 21,9 раз в одну сторону до 26,4 раза при усреднении по круговому рейсу. Даже если фактическая стоимость электроэнергии для владельцев электромобилей окажется выше базового бытового тарифа (например, при зарядке на коммерческих станциях или с учётом повышенных ступеней), различие в удельных эксплуатационных затратах остаётся значительным.

Приведённые оценки следует рассматривать как ориентировочные и подлежащие уточнению применительно к конкретной ценовой ситуации. Тем не менее порядок различия наглядно демонстрирует потенциальную экономическую привлекательность электрифицированного транспорта именно в условиях горной эксплуатации там, где эффект рекуперативного торможения максимален. Оценки совокупной стоимости владения, выполненные для развитых рынков, показывают, что соотношение эксплуатационных затрат электромобиля и автомобиля с ДВС определяется прежде всего локальным соотношением цен на топливо и электроэнергию [17]. Для Республики Таджикистан к чисто экономическому эффекту добавляются ещё климатические и экологические соображения.

Отдельно стоит отметить важный практический момент. Применение методики дифференцированных норм [3] и физико-математического моделирования существенно различается не только по абсолютной величине оцениваемого расхода, но и по возможности учесть направление движения. Для операторов автотранспорта, которые эксплуатируют регулярные маршруты в обоих направлениях (например, пассажирские перевозки Куляб – Шохон), корректная оценка эксплуатационных затрат требует именно направленно-зависимой методики. Такая возможность есть у физико-математического моделирования и принципиально отсутствует у действующих норм.

5. Заключение (Conclusions)

Проведено количественное сопоставление двух подходов к оценке расхода энергии автомобильного транспорта на горном маршруте. С одной стороны, действующая в Республике Таджикистан методика дифференцированных норм расхода топлива для автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. С другой, предложенная ранее одним из авторов физико-математическая модель энергопотребления электромобиля с системой рекуперативного торможения. В качестве объекта выбран реальный горный участок автомобильной дороги Куляб – Шохон в Хатлонской области.

Методика дифференцированных норм даёт близкие результаты в обеих формах: ступенчатой и непрерывной. Она оценивает повышенный расход в горных условиях на +9,8...10,5 % относительно базового значения и делает это одинаково в любом направлении движения.

Физико-математическая модель для электромобиля ведёт себя иначе. Она даёт существенно различающиеся значения по направлениям: +22,7 % при движении с чистым набором высоты и –20,0 % в обратную сторону. При усреднении по круговому рейсу превышение над базовым значением составляет всего +1,4 %.

Основное методологическое различие двух подходов лежит именно здесь. Модель способна учесть эффект рекуперативного торможения электрифицированного транспорта. Значительная часть энергии, затраченной на подъём, возвращается в батарею на последующем спуске. Действующие нормы такой возможности не имеют.

При принятых характерных тарифах на топливо и электроэнергию в Республике Таджикистан различие в стоимости проезда одного и того же маршрута для автомобиля с ДВС и электромобиля превышает 25-кратное соотношение в пользу последнего. Этот результат наглядно подчёркивает потенциальную экономическую эффективность электрифицированного транспорта именно в условиях горной эксплуатации.

Полученные данные указывают на необходимость разработки специализированной методики оценки эксплуатационных характеристик электрифицированного транспорта в горных условиях. Такая методика должна учитывать направление движения и характеристики системы рекуперации.

Рецензент: Давлатшоев Р.А. — к.т.н., доцент кафедры ЭАП, ТИПУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. СТ РТ 1087–2009. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию. — Введ. 2010–01–01. — Душанбе : Таджикстандарт, 2009. — Текст : непосредственный.
2. СТ РТ 1088–2009. Автотранспортные средства. Периодический осмотр. Методы контроля. — Введ. 2010–01–01. — Душанбе : Таджикстандарт, 2009. — Текст : непосредственный.
3. Турсунов, А. А. Эффективность применения дифференцированных норм расхода топлива с учётом климатического зонирования территории Республики Таджикистан по условиям эксплуатации автомобильного транспорта / А. А. Турсунов, М. А. Абдуллоев, Ф. Джобиров, Ф. Мирзоахмедов // Проблемы функционирования систем транспорта. — 2012. — С. 365–371. — Текст : непосредственный. — DOI: 10.5281/zenodo.21603751.
4. Abdullo, M. A numerically stable cruise control model for an electric vehicle on a mountain route based on a smooth approximation of traction–regeneration mode switching / M. Abdullo // Furughi Ilm. Series: Natural and Mathematical Sciences. — 2026. — Т. 10, № 2. — С. 145–157. — Текст : непосредственный. — ISSN 3107-2348. — DOI: 10.24412/3078-395X-2026-2-10-145-457.
5. Ehsani, M. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design / M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, K. Ebrahimi. — Boca Raton : CRC Press, 2018. — 580 с. — Текст : непосредственный.
6. Ehsani, M. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design / M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi. — 2004. — 1 с. — ISBN 978-0-429-12819-6. — Текст : непосредственный. — DOI: 10.1201/9781420037739.
7. Fiori, C. Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation / C. Fiori, K. Ahn, H. A. Rakha // Applied Energy. — 2016. — Т. 168. — С. 257–268. — Текст : непосредственный. — ISSN 0306-2619. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.097.
8. Guzzella, L. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization / L. Guzzella, A. Sciarretta. — Berlin, Heidelberg : Springer, 2013. — 393 с. — ISBN 978-3-642-35912-5. — Текст : электронный. — DOI: 10.1007/978-3-642-35913-2.

9. ISO 2533:1975 Standard Atmosphere // ISO. – 1975. – Текст : электронный. URL: <https://www.iso.org/standard/7472.html> (дата обращения: 14.08.2026).
10. Micu, D. A. The Influence of Road Gradient Resistance on the Driving Range of Electric Vehicles / D. A. Micu, M. V. Bătașu, C. A. Rențea, A. A. Ancuța, R. Mancaș // *Vehicles*. – 2026. – Т. 8, № 3. – С. 44. – Текст : непосредственный. – ISSN 2624-8921. – DOI: 10.3390/vehicles8030044.
11. Onori, S. Hybrid Electric Vehicles: Energy Management Strategies / S. Onori, L. Serrao, G. Rizzoni. – London : Springer, 2016. – 113 с. – Текст : непосредственный. – DOI: 10.1007/978-1-4471-6781-5.
12. Plett, G. L. Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling / G. L. Plett. – Artech House, 2015. – 343 с. – ISBN 978-1-63081-024-5. – Текст : непосредственный.
13. Puma-Benavides, D. S. Low-Cost Instrumentation for Energy-Based Assessment of Electric Vehicles Under High-Altitude and High-Gradient Real-World Driving Conditions / D. S. Puma-Benavides, B. A. Cuaical-Angulo, A. S. Cevallos-Carvajal, G. M. Cruz-Arcos, E. A. Llanes-Cedeño, P. J. Guagalango-Gómez // *World Electric Vehicle Journal*. – 2026. – Т. 17, № 6. – С. 314. – Текст : непосредственный. – ISSN 2032-6653. – DOI: 10.3390/wevj17060314.
14. Rajamani, R. Vehicle Dynamics and Control / R. Rajamani. – Boston, MA : Springer US, 2012. – 498 с. – ISBN 978-1-4614-1432-2. – Текст : электронный. – DOI: 10.1007/978-1-4614-1433-9.
15. Szumska, E. M. Regenerative Braking Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review of Design, Control Strategies, and Efficiency Challenges / E. M. Szumska // *Energies*. – 2025. – Т. 18, № 10. – С. 2422. – Текст : непосредственный. – ISSN 1996-1073. – DOI: 10.3390/en18102422.
16. Szumska, E. M. The Analysis of Energy Recovered during the Braking of an Electric Vehicle in Different Driving Conditions / E. M. Szumska, R. Jurecki // *Energies*. – 2022. – Т. 15, № 24. – С. 9369. – Текст : непосредственный. – ISSN 1996-1073. – DOI: 10.3390/en15249369.
17. Woody, M. Electric and gasoline vehicle total cost of ownership across US cities / M. Woody, S. A. Adderly, R. Bohra, G. A. Keoleian // *Journal of Industrial Ecology*. – 2024. – Т. 28, № 2. – С. 194–215. – Текст : непосредственный. – ISSN 1530-9290. – DOI: 10.1111/jiec.13463.
18. Baglione, M. Vehicle System Energy Analysis Methodology and Tool for Determining Vehicle Subsystem Energy Supply and Demand / M. Baglione, M. Duty, G. Pannone. – SAE International, 2007. – Текст : электронный. – DOI: 10.4271/2007-01-0398.
19. ГОСТ 2939-63 Газы. Условия для определения объема. – 1964. – Текст : электронный.
20. Bermúdez, V. Influence of Environmental Changes Due to Altitude on Performance, Fuel Consumption and Emissions of a Naturally Aspirated Diesel Engine / V. Bermúdez, J. R. Serrano, P. Piqueras, O. García-Afonso // *Energies*. – 2021. – Т. 14, № 17. – С. 5346. – Текст : непосредственный. – ISSN 1996-1073. – DOI: 10.3390/en14175346.
21. Liu, K. Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles / K. Liu, T. Yamamoto, T. Morikawa // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2017. – Т. 54. – С. 74–81. – Текст : непосредственный. – ISSN 1361-9209. – DOI: 10.1016/j.trd.2017.05.005.
22. Tang, T. Energy management of fuel cell hybrid electric bus in mountainous regions: A deep reinforcement learning approach considering terrain characteristics / T. Tang, Q. Peng, Q. Shi, Q. Peng, J. Zhao, C. Chen, G. Wang // *Energy*. – 2024. – Т. 311. – С. 133313. – Текст : непосредственный. – ISSN 0360-5442. – DOI: 10.1016/j.energy.2024.133313.
23. Wu, X. Energy-Optimal Speed Control for Electric Vehicles on Signalized Arterials / X. Wu, X. He, G. Yu, A. Harmandayan, Y. Wang // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2015. – Т. 16, № 5. – С. 2786–2796. – Текст : непосредственный. – ISSN 1558-0016. – DOI: 10.1109/TITS.2015.2422778.

References

1. Agency for Standardization, Metrology, Certification and Trade Inspection under the Government of the Republic of Tajikistan (Tajikstandard). (2009). *ST RT 1087–2009. Avtotransportnyye sredstva. Trebovaniya bezopasnosti k tekhnicheskomu sostoyaniyu* [State Standard of the Republic of Tajikistan 1087–2009. Motor vehicles. Safety requirements for technical condition].
2. Agency for Standardization, Metrology, Certification and Trade Inspection under the Government of the Republic of Tajikistan (Tajikstandard). (2009). *ST RT 1088–2009. Avtotransportnyye sredstva. Periodicheskiy osmotr. Metody kontrolya* [State Standard of the Republic of Tajikistan 1088–2009. Motor vehicles. Periodic inspection. Control methods].
3. Tursunov, A. A., Abdulloyev, M. A., Jobirov, F., & Mirzoakhmedov, F. (2012). Effektivnost' primeneniya differentsirovannykh norm rashkoda topliva s uchotom klimaticheskogo zonirovaniya territorii Respubliki Tadzhikistan po usloviyam ekspluatatsii avtomobil'nogo transporta [Efficiency of applying differentiated fuel consumption rates taking into account the climate zoning of the territory of the Republic of Tajikistan according to motor transport operating conditions]. *Problemy funktsionirovaniya sistem transporta* [Problems of Transport System Functioning], 365–371. <https://doi.org/10.5281/zenodo.21603751>
4. Abdullo, M. (2026). A numerically stable cruise control model for an electric vehicle on a mountain route based on a smooth approximation of traction–regeneration mode switching. *Furughi Ilm. Series: Natural and Mathematical Sciences*, 10(2), 145–157. <https://doi.org/10.24412/3078-395X-2026-2-10-145-457>

5. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design* (3rd ed.). CRC Press.
6. Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S., & Emadi, A. (2004). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420037739>
7. Fiori, C., Ahn, K., & Rakha, H. A. (2016). Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Applied Energy*, 168, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.097>
8. Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2013). *Vehicle propulsion systems: Introduction to modeling and optimization* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-2>
9. International Organization for Standardization. (1975). *Standard atmosphere* (ISO Standard No. 2533:1975). <https://www.iso.org/standard/7472.html>
10. Micu, D. A., Băţăuș, M. V., Renţea, C. A., Ancuța, A. A., & Mancaș, R. (2026). The influence of road gradient resistance on the driving range of electric vehicles. *Vehicles*, 8(3), 44. <https://doi.org/10.3390/vehicles8030044>
11. Onori, S., Serrao, L., & Rizzoni, G. (2016). *Hybrid electric vehicles: Energy management strategies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6781-5>
12. Plett, G. L. (2015). *Battery management systems, volume I: Battery modeling*. Artech House.
13. Puma-Benavides, D. S., Cuaical-Angulo, B. A., Cevallos-Carvajal, A. S., Cruz-Arcos, G. M., Llanes-Cedeño, E. A., & Guagalango-Gómez, P. J. (2026). Low-cost instrumentation for energy-based assessment of electric vehicles under high-altitude and high-gradient real-world driving conditions. *World Electric Vehicle Journal*, 17(6), 314. <https://doi.org/10.3390/wevj17060314>
14. Rajamani, R. (2012). *Vehicle dynamics and control* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9>
15. Szumska, E. M. (2025). Regenerative braking systems in electric vehicles: A comprehensive review of design, control strategies, and efficiency challenges. *Energies*, 18(10), 2422. <https://doi.org/10.3390/en18102422>
16. Szumska, E. M., & Jurecki, R. (2022). The analysis of energy recovered during the braking of an electric vehicle in different driving conditions. *Energies*, 15(24), 9369. <https://doi.org/10.3390/en15249369>
17. Woody, M., Adderly, S. A., Bohra, R., & Keoleian, G. A. (2024). Electric and gasoline vehicle total cost of ownership across US cities. *Journal of Industrial Ecology*, 28(2), 194–215. <https://doi.org/10.1111/jiec.13463>
18. Baglione, M., Duty, M., & Pannone, G. (2007). *Vehicle system energy analysis methodology and tool for determining vehicle subsystem energy supply and demand* (SAE Technical Paper No. 2007-01-0398). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2007-01-0398>
19. Euro-Asian Council for Standardization, Metrology and Certification. (1964). *GOST 2939-63 Gazy. Usloviya dlya opredeleniya ob'yema* [Interstate Standard GOST 2939-63 Gases. Conditions for determining volume].
20. Bermúdez, V., Serrano, J. R., Piqueras, P., & García-Afonso, O. (2021). Influence of environmental changes due to altitude on performance, fuel consumption and emissions of a naturally aspirated diesel engine. *Energies*, 14(17), 5346. <https://doi.org/10.3390/en14175346>
21. Liu, K., Yamamoto, T., & Morikawa, T. (2017). Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.05.005>
22. Tang, T., Peng, Q., Shi, Q., Peng, Q., Zhao, J., Chen, C., & Wang, G. (2024). Energy management of fuel cell hybrid electric bus in mountainous regions: A deep reinforcement learning approach considering terrain characteristics. *Energy*, 311, 133313. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133313>
23. Wu, X., He, X., Yu, G., Harmandayan, A., & Wang, Y. (2015). Energy-optimal speed control for electric vehicles on signalized arterials. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(5), 2786–2796. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2422778>

Сведения об авторах:

Абдулло Мамадамон Абдурахмонбек, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Таджикского технического университета по им. акад. М.С. Осими. <https://farzonagon.tj/tg/profile/2108-4205>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-5946>. E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com.

Саъдуллозода Шахриёр Саъдулло, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Естественно-математических наук Университета инноваций и цифровых технологий Таджикистана, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5801-9140>. E-mail: srsaidaliev@gmail.com

Сайфиддинзода Одил, PhD, ассистент кафедры «Релейная защита и автоматизация энергетических систем» Таджикского технического университета по им. акад. М.С. Осими. ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-0894-4319>. E-mail: odil0210@gmail.com

Маълумот оид ба муаллифон:

Абдулло Мамадамон Абдурахмонбек, номзади илмҳои техникӣ, дотсенти кафедраи истифодабарии нақлиёти автомобилӣ, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. <https://farzonagon.tj/tg/profile/2108-4205>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-5946>. E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com.

Саъдуллозода Шахриёр Саъдулло, номзади илмҳои техникӣ, дотсент, дотсенти кафедраи илмҳои табиӣ ва математикаи Донишгоҳи инноватсия ва технологияҳои рақамии Тоҷикистон, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5801-9140>. E-mail: srsaidaliev@gmail.com

Сайфиддинзода Одил, PhD, ассистенти кафедраи “Ҳимояи релей ва автоматикаи системаҳои энергетикӣ” Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-0894-4319>. E-mail: odil0210@gmail.com

Information about the authors:

Abdullo Mamadamon Abdurahmonbek, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Operation of road transport» Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi. <https://farzonagon.tj/tg/profile/2108-4205>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-5946>. E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com.

Sadullozoda Shahriyor Sadullo, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Natural and Mathematical Sciences of the University of Innovations and Digital Technologies of Tajikistan, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5801-9140>. E-mail: srsaidaliev@gmail.com

Sayfiddinzoda Odil, PhD, assistant at the Department of Relay protection and automation of power systems Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi. ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-0894-4319>. E-mail: odil0210@gmail.com

THE MAIN CRITERIA FOR THE PLACEMENT OF TRANSPORT AND LOGISTICS CENTERS IN THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN

F.N. Nizomzoda

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

The article examines the main criteria for the placement of transport and logistics centers in the Republic of Tajikistan. Taking into account the geographical, economic, demographic, and transport characteristics of the country, the factors influencing the selection of locations for transport and logistics centers are analyzed. The main criteria include the geographical position of the region, the level of transport infrastructure development, freight flow volumes, industrial and agricultural potential, production and consumption volumes, export and import potential, population size, and opportunities for integration into international transport corridors. It is established that the application of a comprehensive set of these criteria makes it possible to objectively assess the suitability of individual territories for the placement of transport and logistics centers. The proposed criteria can be used as a scientific and methodological basis for selecting optimal locations for transport and logistics centers and developing the transport infrastructure of the Republic of Tajikistan.

Keywords: transport and logistics centers, placement, placement criteria, transport infrastructure, freight flows, industrial and agricultural potential, logistics potential, international transport corridors, Republic of Tajikistan.

КРИТЕРИЯҲОИ АСОСИИ ҶОЙГИРНАМОИИ МАРКАЗҲОИ НАҚЛИЁТИЮ ЛОГИСТИКӢ ДАР ШАРОИТИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

Ф.Н. Низомзода

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола масъалаи муайян намудани меъёрҳои асосии ҷойгирнамоии марказҳои нақлиётию логистикӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон баррасӣ гардидааст. Бо дарназардошти хусусиятҳои ҷуғрофӣ, иқтисодӣ, демографӣ ва нақлиётӣ кишвар, омилҳои таъсиррасон ба интиҳоби макони ҷойгиршавии марказҳои нақлиётию логистикӣ таҳлил карда шудаанд. Меъёрҳои асосӣ, аз ҷумла мавқеи ҷуғрофӣ минтақа, сатҳи рушди инфрасохтори нақлиётӣ, ҳаҷми ҷараёнҳои боркашонӣ, иқтидори саноатию аграрӣ, ҳаҷми истеҳсолот ва истеъмоли молу маҳсулот, иқтидори содиротию воридотӣ, шумораи аҳоли ва имконияти пайвастшавӣ ба долонҳои байналмилалӣ нақлиётӣ муайян карда шудаанд. Муайян гардид, ки истифодаи маҷмӯи меъёрҳои мазкур имкон медиҳад, ки мутобиқати ҳудудҳои алоҳида ба талаботи ҷойгирнамоии марказҳои нақлиётию логистикӣ объективона баҳогузорӣ карда шавад. Меъёрҳои пешниҳодшуда метавонанд ҳамчун заминаи илмӣ-методӣ барои интиҳоби макони оптималии ҷойгирнамоии марказҳои нақлиётию логистикӣ ва рушди инфрасохтори нақлиётӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон истифода шаванд.

Калидвожаҳо: марказҳои нақлиётию логистикӣ, ҷойгирнамоӣ, меъёрҳои ҷойгирнамоӣ, инфрасохтори нақлиётӣ, ҷараёнҳои боркашонӣ, иқтидори саноатию аграрӣ, иқтидори логистикӣ, долонҳои байналмилалӣ нақлиётӣ, Ҷумҳурии Тоҷикистон.

ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Ф.Н. Низомзода

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье рассматривается вопрос определения основных критериев размещения транспортно-логистических центров в Республике Таджикистан. С учетом географических, экономических, демографических и транспортных особенностей страны проанализированы факторы, влияющие на выбор мест размещения транспортно-логистических центров. Определены основные критерии, включая географическое положение региона, уровень развития транспортной инфраструктуры, объемы грузопотоков, промышленно-аграрный потенциал, объемы производства и потребления товаров, экспортно-импортный потенциал, численность населения и возможности интеграции в международные транспортные коридоры. Установлено, что применение совокупности указанных критериев позволяет объективно оценить соответствие отдельных территорий требованиям размещения транспортно-логистических центров. Предложенные критерии могут быть использованы в качестве научно-методической основы для выбора оптимальных мест размещения транспортно-логистических центров и развития транспортной инфраструктуры Республики Таджикистан.

Ключевые слова: транспортно-логистические центры, размещение, критерии размещения, транспортная инфраструктура, грузопотоки, промышленно-аграрный потенциал, логистический потенциал, международные транспортные коридоры, Республика Таджикистан.

Introduction

In the context of the development of the national economy and its connection with production, transport and logistics centers are considered one of the most important tasks of the leading sector of the state economy. As a result of changes in the international transport system and the development of transport and logistics services, the country's production sectors are growing, and the demand for modern

transport infrastructure is increasing. As a result, there is a need to organize infrastructure in the regions that connects the production process with transport products [1-6]. One of these facilities is transport and logistics centers, which are considered as a node for connecting and guiding the production process to services. It should be noted that the organization of such infrastructure depends on the capabilities and capacities of the regions. Each region differs from other regions in terms of its relief and requires its own type of transport and logistics centers.

Methods

The study employs methods of comparative and systematic analysis, statistical analysis, grouping and classification, as well as an assessment of economic, geographical, transport, and infrastructural factors. The proposed criteria are analyzed in terms of their influence on the selection of optimal locations for transport and logistics centers.

Research objectives:

- ✓ To analyze the geographic, economic, transport, and infrastructural characteristics of the Republic of Tajikistan that influence the placement of transport and logistics centers.
- ✓ To identify the key factors and criteria determining the suitability of territories for the placement of transport and logistics centers.
- ✓ To evaluate the importance of transport accessibility, freight traffic, industrial and agricultural potential, and regional economic activity when selecting the location of transport and logistics centers.
- ✓ To systematize the identified criteria and determine their role in selecting optimal locations for transport and logistics centers.
- ✓ To develop methodological recommendations for the application of the proposed criteria to justify the placement of transport and logistics centers in the regions of the Republic of Tajikistan.

Results

The study identified and systematized the main criteria for the location of transport and logistics centers in the Republic of Tajikistan. These are geographical location, transport accessibility, level of development of transport infrastructure, volume of cargo flows, industrial and agricultural capacity, volume of production and consumption, export-import activity, population size, and opportunities for integration with international transport corridors. The results show that a comprehensive review of these criteria provides a more objective basis for determining the most suitable areas for the location of transport and logistics centers.

It is worth noting that norms as influential tools can determine the possibilities for the formation of TLC in the region. In this case, the issue of the location of transport and logistics centers acquires significant scientific importance, since the appropriate or optimal location of these centers can have a positive impact on increasing the efficiency of transportation and economic development. It is through these centers that the connection of production with consumption, the integration and interaction of transport modes, and the timeliness of the supply chain can be established. The formation of such centers is carried out by determining the main location criteria. Criteria are, first of all, a set of factors that determine the requirements and assessment of the areas for the location of transport and logistics centers. In terms of optimal location, integration of transport modes, and the connection of logistics systems, criteria play a key role and make a significant contribution to the development of production and transport processes. In this regard, based on the analysis of scientific papers and publications, the main criteria for the location of transport and logistics centers have been determined. They are divided into the following groups depending on their characteristics and functions:

Table 1-Criteria for selecting locations for transport and logistics centers (TLC)

№	Criteria content	Criteria	Evaluation indicators
1	Transport accessibility	The level of provision of the territory with roads, railway lines and border crossings	- Length of paved roads; - Proximity to international transport corridors; - Availability of transport hubs
2	Intensity of freight traffic	Volumes and directions of cargo movement generated in the region	- Freight turnover (thousand tons/year); - Volumes of produced and consumed freight; - Share of transit traffic

3	Industrial and agricultural potential of the region	The level of development of industry and agriculture as sources of cargo generation	- Number of enterprises; - Volume of industrial and agricultural output; - Region's share of gross output
4	Infrastructure provision	Availability of logistics and warehouse infrastructure suitable for servicing the TLC	- Warehouse space; - Availability of refrigeration and terminal facilities; - Multimodal transportation capabilities
5	Territorial and geographical position	The strategic position of the territory in relation to national and international markets	- Distance to borders and major cities; - Location at the intersection of transport corridors; - Geographic advantages
6	Availability of land resources	Possibility of allocating a land plot for the construction of a transport and logistics center	- Land cost; - Area of available land; - Site readiness
7	Economic efficiency of placement	Financial feasibility of construction and operation of the TLC	- Reduced logistics costs; - Reduced delivery time; - Reduced project payback period
8	Investment potential	Opportunities to attract investment and availability of support mechanisms	- Availability of free economic zones; - Public-private partnership (PPP) opportunities; - Tax and financial incentives
9	Socioeconomic impact	Potential impact of the TLC on regional development	- Number of jobs created; - Growth in regional GRP; - Improved accessibility to commodity markets
10	Environmental sustainability	Compliance with environmental requirements and reduction of negative impacts	- Emissions level; - Potential for implementing "green technologies"; - Environmental assessment of the site

The Republic of Tajikistan is a mountainous region with a rugged terrain and limited access to sea transport. It is this limitation that leads to increased transport costs, imperfect services and a decrease in the efficiency of transportation. In this case, in order to connect the production market with consumers, reduce the number of participants in the logistics chain and integrate transport infrastructure services, the transport accessibility criterion is key and will lead to a solution to this problem. Transport accessibility is assessed based on the following factors: order execution time; availability of transport modes in the region; existing infrastructure; cargo volume, etc. It should be noted that the specified criterion reduces freight transportation costs and increases the speed of cargo turnover, and this is one of the key criteria in the process of determining the location of transport and logistics centers [2-4]. In conclusion, it should be noted that the role of this criterion is to connect transport and logistics facilities to production centers and plays an important role in increasing the efficiency of transport operations. The main indicators of the specified criterion are the presence of roads, proximity to international corridors and the presence of transport hubs. The Republic of Tajikistan is located at the junction of international highways and has access to international corridors. The following transit corridors pass through the Republic of Tajikistan within the framework of international programs, connecting the country with other countries of the near and far abroad and providing access to all types of transport for Tajikistan.

Table 2-International Transport Corridors and Their Routes within the Territory of the Republic of Tajikistan

International programs	Name of transit corridor	Route within the territory of the Republic of Tajikistan	Distance (km)
Central Asia Regional Economic Cooperation (CAREC)	CAREC-2	It enters the Republic of Uzbekistan through the Spitamen checkpoint (Spitamen village), passes through the Khujand - Gafurov - Konibodom route, and exits into the Kyrgyz Republic through the Gulistan checkpoint (Isfara village).	143

	CAREC-3	It enters the Republic of Kyrgyzstan through the Karamik checkpoint (Lakhsh town), passes through the Lakhsh - Vahdat - Dushanbe - Tursunzoda route, and exits through the Dusti checkpoint (Tursunzoda town) into the Republic of Uzbekistan.	453
	CAREC-5	It enters the Islamic Republic of Afghanistan through the Panji Poyon checkpoint (Jeyhun), passes through the Jeyhun - Bactria - Dushanbe - Vahdat - Lakhsh route, and exits through the Karamik checkpoint (Lakhsh) into the Kyrgyz Republic.	513
	CAREC-6	It enters the Republic of Uzbekistan through the Bekabad checkpoint, passes through the Khujand - Dushanbe - Bokhtar - Panji Poyon route, and exits through the Panji Poyon checkpoint (Jayhun) into the Islamic Republic of Afghanistan.	402
TPACEKA	–	Termez (border with the Republic of Uzbekistan) – Tursunzoda – Dushanbe – Vahdat – Lakhsh – Karamik (border with the Republic of Kyrgyzstan)	402
	–	Termez (border of the Republic of Uzbekistan) – Tursunzoda – Dushanbe – Vahdat – Kulob – Kalaikhumb – Khorog – Kulma (border of the People's Republic of China)	1075
(Asian Highway Network — AH)	AH-7	Khatlon (border of the Republic of Uzbekistan) – Khujand – Dushanbe – Bactria – Panji Poyon (border of the Islamic Republic of Afghanistan)	512
	AH-65	Karamik (Kyrgyz border) – Dushanbe – Tursunzoda (Uzbek border)	402
	AH-66	Karasu (border with the People's Republic of China) – Kulma – Khorog – Kulob – Vahdat – Dushanbe – Tursunzoda – Dusti (border with the Republic of Uzbekistan)	1075
European Agreement on Main International Traffic Arteries (AGR)	–	Termez (border with the Republic of Uzbekistan) – Dushanbe – Vahdat – Lakhsh – Karamik (border with the Republic of Kyrgyzstan)	402

Discussion

As we have noted, due to the relief of the Republic of Tajikistan, which is more than 93% mountainous, transportation is carried out mainly by road. More than 90% of transportation is carried out by this type of transport, and access to the entire region is provided by road transport [3-5]. Therefore, the volume of transportation is another criterion for determining the location of transport and logistics centers. The current state of this indicator by type of transport in the Republic of Tajikistan has a tendency to increase and over the past five years has been as follows:

Table 3 – Volume of Freight Transportation by Mode of Transport

Years	Total volume of freight transportation by all modes of transport	Including:	Road transport	Rail transport	Air transport
2018	89,607.2		84,257.6	5,348.1	1.5
2019	85,394.6		79,594.7	5,798.8	1.1
2020	85,381.9		79,075.8	6,305.3	0.7
2021	94,611.8		88,900.9	5,709.9	0.9
2022	113,941.4		107,836.3	6,104.2	0.8
2023	120,576.1		114,124.1	6,451.0	0.8
2024	127,693.8		6,712.9	6,712.9	1.4

As can be seen from the table below, the majority of freight traffic in the Republic of Tajikistan is similar to road transport and depends on a number of important factors, including: accessibility to this type of transport, timely preparation; high speed over short distances, easy adaptation to the current situation, etc [7-10].

Each region of the Republic of Tajikistan is different from each other with its own characteristics, and the development of industries in these regions is different. In this regard, another important criterion for the location of transport and logistics centers is the development of regional industries, including industrial, agricultural, construction, trade and transport services. This criterion determines not only the location region, but also the type of transport and logistics centers. The state of development of the listed industries in the regions of the Republic of Tajikistan varies greatly. Depending on the relief and location, the agricultural and industrial sectors are concentrated in the Khatlon region. A large part of the capital's consumer market is provided by agricultural products from this region. The development of the industrial sector is similar to that in the Sughd region and the city of Dushanbe, but is less noticeable in the districts subordinate to the center.

One of the important means of ensuring timely delivery in the supply chain and as a logistics principle is delivery according to the “Just in time” system. The appropriate location of transport and logistics centers connects production with consumption, reduces additional costs and ensures timely delivery, which is another criterion for the location of transport and logistics centers, which is called proximity to consumer markets. Through this criterion, not only timely delivery of goods is ensured, but also the efficiency of transport operations is improved and the quality of service is improved.

Another criterion that is important for the location of transport and logistics centers is the level of development of the industrial and agricultural potential of the region. The Republic of Tajikistan is a mountainous country, and the industrial and agricultural sectors in the regions of the republic are developed differently depending on the natural and climatic features, production resources, availability of raw materials and the level of development of transport infrastructure. Therefore, it is necessary to take into account the volume of industrial and agricultural production of the region in order to determine the location of transport and logistics centers. The volume and structure of industrial production of an administrative region largely depend on its economic potential, expressed as GVA, which forms the nature of transport and logistics flows and determines the demand for transport infrastructure and distribution centers. Industry is a key component of the country's economy, indicating the scale and intensity of production activities in various sectors.

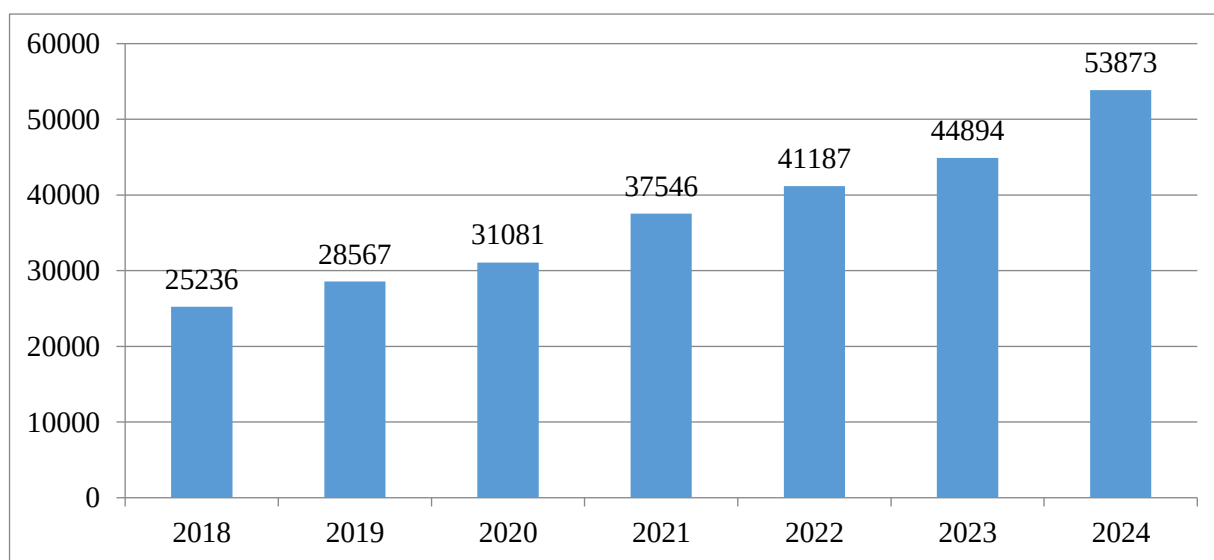


Figure 1 – Product production volume in 2018-2024

An analysis of Tajikistan's industrial production dynamics for 2018–2024 reflects steady growth in economic activity. In 2018, industrial output amounted to 25,236 million somoni, and by 2024, it had grown to 53,873 million somoni, demonstrating growing production potential, requiring transportation and logistics support.

Conclusions

Thus, the standards determine the conditions for the location of transport and logistics centers, through which it is possible to determine the most appropriate ways to choose the location of such centers,

which will ensure the efficiency of their activities, the level of transport and logistics services, and the rational use of the transport and logistics potential of the regions. The specified criteria are of particular importance in the conditions of the Republic of Tajikistan for the formation and placement of transport and logistics centers and provide a methodological basis for determining priority areas for the development of transport and logistics infrastructure.

In areas with large volumes of agricultural production, logistics is the foundation for ensuring economic sustainability, reducing freight transportation costs, and increasing the efficiency of the region's transport and logistics system [4-6].

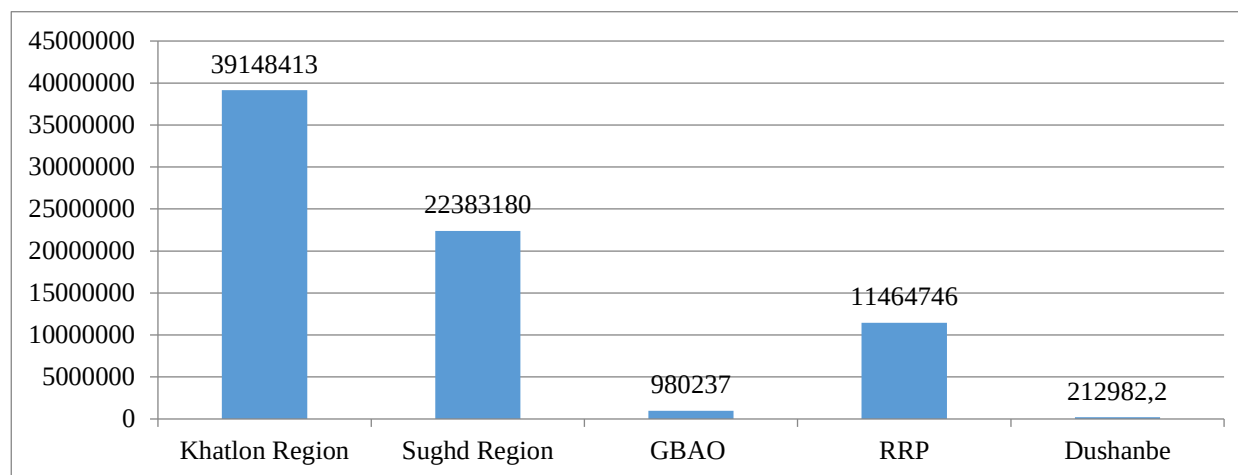


Figure 2 - Volume of agricultural production

The regional share of agricultural production in total agricultural output, an important structural indicator of the agricultural sector, allows one to identify regions that generate the main seasonal and perishable cargo flows. The share is calculated as the ratio of a particular region's output to the country's total output, expressed as a percentage.

Reviewer: Pirov J. T. — Candidate of Technical Sciences, First Deputy Director of the State Institution "Automobile Transport and Logistics Services".

References

1. Nizomzoda, F.N. The Role and Importance of Transport Logistics in the Development of the National Economy // Bulletin of the Tajik Technical University. Series: Engineering Research. – 2024. – No. 1 (65). – P. 155–157.
2. Nadjmudinov, F.N. Forecasting Freight Flows Along the International Transport Corridors of the Republic of Tajikistan / F.N. Nadjmudinov, F.J. Gafurov, T.U. Samadov // Bulletin of the Technological University of Tajikistan. Series: Economic Research. – 2018. – No. 2 (33). – P. 66–72. – ISBN: 978-99947-0-022.
3. Davlatshoev, R.A. Analysis of Environmental Safety and the Impact of Road Transport on the Environment of the Republic of Tajikistan / R.A. Davlatshoev, M.K. Butaev, B.Zh. Majidov, F. Djobirov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering and Society. – 2025. – No. 4 (12). – P. 21–25.
4. Karolina, A.S. Development of a Regional Transport and Logistics System for Freight Delivery (Based on the Example of Samara Region).
5. Azimov, P.Kh. Development of Transport and Logistics Infrastructure in the Republic of Tajikistan / P.Kh. Azimov // Economics and Management. – 2017. – Vol. 11, No. 2. – P. 14–20.
6. Sharipov, S.Kh. Analysis of the Current State and Prospects for the Development of Road Transport Infrastructure in the Republic of Tajikistan / S.Kh. Sharipov // Public Administration. – 2022. – No. 4/2 (59). – P. 143–151.
7. Government of the Republic of Tajikistan. State Target Program for the Development of the Transport Complex of the Republic of Tajikistan until 2025: Approved by Resolution No. 165 of the Government of the Republic of Tajikistan dated April 1, 2011 (as amended by Resolution No. 518 dated October 25, 2022). – Dushanbe, 2011.
8. Statistical Yearbook of the Republic of Tajikistan. – Dushanbe: Agency on Statistics under the President of the Republic of Tajikistan, 2025.
9. Asadov, Sh. Tajikistan's Transit Corridors and Their Potential for Developing Regional Trade. – Institute of Public Policy and Administration Working Paper, No. 6. – University of Central Asia. – 40 p.

10. Nizomzoda, F.N. Environmental Problems in Logistics and Transport Centers: Analysis and Solutions / F.N. Nizomzoda // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2025. – No. 1 (69). – P. 106–109.

Information about the author:

Nizomzoda Fakhridin Nizom, candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transportation Organization and Transport Management, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2336-9228>. E-mail: fakhridin670@gmail.com

Сведения об авторе:

Низомзода Фахриддин Низом, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры организации перевозок и управления на транспорте Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2336-9228>. E-mail: fakhridin670@gmail.com

Маълумот дар бораи муаллиф:

Низомзода Фахриддин Низом, номзади илмҳои техникӣ, дотсент, дотсенти кафедраи ташкили ҳамлу нақл ва идоракунии дар нақлиёти Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осими. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2336-9228>. E-mail: fakhridin670@gmail.com

СОХТМОН ВА МЕЪМОРИЙ - СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА - CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

УДК: 624.012.45:004.942

DOI: 10.65599/ENG7842

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ ПЛИТЫ С КОЛОННОЙ В БЕЗРИГЕЛЬНОМ КАРКАСЕ

И.С. Муминов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье рассмотрено напряжённо-деформированное состояние узла сопряжения плиты с колонной в безригельном железобетонном каркасе при возрастающей нагрузке. Расчётная 3D-модель узла выполнена в масштабе 1:1 с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР. Расчёт проведён с учётом физической нелинейности бетона и арматуры. В качестве материала принят тяжёлый бетон класса В25, а продольная арматура класса А500, поперечная арматура А240 задана с учётом физической и геометрической нелинейности. Нагрузка равномерно распределялась по площади плиты и поэтапно увеличивалась с шагом 1 кН/м² до максимального значения 30 кН/м². В процессе расчёта проанализированы нормальные и касательные напряжения, характер развития локального трещинообразования в бетоне, а также нормальные усилия в арматуре. Установлено, что наиболее напряжённой является приопорная зона у грани колонны, где наблюдается концентрация напряжений. При дальнейшем увеличении нагрузки зона повреждений постепенно расширяется вдоль направлений скрытых балок. Полученные результаты показывают, что скрытые балки участвуют в перераспределении усилий и влияют на характер работы узла, что позволяет оценить особенности его напряжённо-деформированного состояния при возрастающей нагрузке.

Ключевые слова: безригельный каркас, узел сопряжения плиты с колонной, напряжённо-деформированное состояние, ЛИРА-САПР, физическая нелинейность, скрытая балка, трещинообразования, нормальные напряжения.

ТАҶҶИҚОТИ АДАДИИ ҲОЛАТИ ШИДДАТНОКИЮ-ШАКЛТАҒИРИИ ГИРЕҶИ ПАЙВАСТШАВИИ ПЛИТА БО СУТУН ДАР СИНЧИ БЕБОЛОР

И.С. Муминов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола ҳолати шиддатнокию шаклтағирии гиреҷи пайвастшавии плита бо сутун дар синчи беболори оханубетонӣ ҳангоми афзоиши боргузори баррасӣ шудааст. Модели ҳисобии ҳаҷмии 3D-и гиреҷ бо миқёси 1:1 бо истифода аз маҷмааи барномавии ЛИРА-САПР таҳия гардидааст. Ҳисоб бо дарназардошти ғайриҳаттии физикии бетон ва арматура иҷро карда шудааст. Ба сифати мавод бетони вазнини синфи В25, арматураи тӯлӣ аз синфи А500 ва арматураи арзӣ аз синфи А240 қабул гардида, ғайриҳаттии физикӣ ва геометрӣ ба назар гирифта шудааст. Боргузори ба таври баробар дар тамоми масоҳати плита тақсим гардида, марҳила ба марҳила бо қадами 1 кН/м² то қимати максималии 30 кН/м² зиёд карда шудааст. Дар раванди ҳисоб шиддатҳои нормалӣ ва расанда, хусусияти инкишофи тарқишҳои маҳаллӣ дар бетон, инчунин қувваҳои нормалӣ N дар арматура таҳлил карда шуданд. Муайян гардид, ки минтақаи аз ҳама бештар шиддатнок қисми таъағуҳӣ дар наздикии канори сутун буда, дар он ҷо консентратсияи шиддатҳо мушоҳида мешавад. Ҳангоми минбаъд зиёд намудани боргузори минтақаи осебдида тадриҷан дар самти болорҳои пинҳонӣ васеъ мегардад. Натиҷаҳои бадастомада нишон медиҳанд, ки болорҳои пинҳонӣ дар тақсим намудани қувваҳои дохилӣ иштирок намуда, ба хусусияти кори гиреҷ таъсир мерасонанд. Ин имкон медиҳад, ки хусусиятҳои ҳолати шиддатнокию шаклтағирии гиреҷ ҳангоми афзоиши боргузори арзёбӣ карда шаванд.

Калидвожаҳо: синчи беболор, гиреҷи пайвастшавии плита бо сутун, ҳолати шиддатнокию-шаклтағирии, ЛИРА-САПР, ғайриҳаттии физикӣ, болори пинҳонӣ, тарқишпайдошавӣ, шиддатҳои нормалӣ, шиддатҳои расанда.

NUMERICAL STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SLAB-COLUMN JOINT IN A BEAMLESS FRAME

I.S. Muminov

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

The article considers the stress-strain state of the slab-column connection in a flat-slab reinforced concrete frame under increasing load. A 3D computational model of the connection was developed at a 1:1 scale using the LIRA-SAPR software package. The analysis was performed taking into account the physical nonlinearity of concrete and reinforcement. Heavy concrete of class B25, longitudinal reinforcement of class A500, and transverse reinforcement of class A240 were adopted as materials, with physical and geometric nonlinearities taken into account. The load was uniformly distributed over the entire slab area and increased stepwise by 1 kN/m² up to a maximum value of 30 kN/m². During the analysis, normal and shear stresses in concrete, the development of local cracking, as well as normal forces N in the reinforcement were analyzed. It was established that the most highly stressed zone is the support region near the column face, where stress concentration is observed. With a further increase in load, the damaged zone gradually expands along the directions of the hidden beams. The obtained results show that

the hidden beams participate in the redistribution of internal forces and affect the behavior of the connection. This makes it possible to assess the specific features of the stress-strain state of the connection under increasing load.

Keywords: beamless frame, slab-column joint, stress-strain state, LIRA-SAPR, physical nonlinearity, hidden beam, crack formation, normal stresses.

Введение (Introduction)

Одним из эффективных методов оценки достоверности результатов экспериментальных исследований является численное моделирование, выполняемое с применением современных программных комплексов. При расчёте строительных конструкций и решении инженерных задач данный подход получил широкое распространение благодаря развитию и внедрению специализированных расчётных программных комплексов, в числе которых ANSYS, ABAQUS, SCAD Office, SAP2000, ETABS, ЛИРА–САПР и др. [2–3, 5–7]. Численное моделирование позволяет получить более полную информацию о характере работы конструктивных элементов, распределении напряжений и деформаций, перемещениях, внутренних усилиях и последовательности развития повреждений при увеличении внешней нагрузки.

Особый интерес представляет исследование узлов сопряжения плиты с колонной в безригельных железобетонных каркасах. В таких конструктивных системах отсутствуют традиционные ригели, вследствие чего значительная часть усилий передаётся непосредственно от плиты к колонне через ограниченную по площади приопорную зону. Это приводит к концентрации напряжений в области сопряжения и требует детального изучения напряжённо-деформированного состояния узла. Одним из наиболее существенных факторов, определяющих надёжность такого соединения, является характер распределения нормальных и касательных напряжений, а также развитие деформаций и повреждений при возрастающей нагрузке.

В настоящем исследовании рассматривается напряжённо-деформированное состояние узла сопряжения плиты с колонной с использованием программного комплекса ЛИРА–САПР. Расчётная модель узла выполнена в масштабе 1:1, что позволяет более детально исследовать характер распределения напряжений, деформаций и внутренних усилий в элементах конструкции. Применение объёмных конечных элементов обеспечивает возможность более точного моделирования взаимодействия плиты, колонны и скрытых балок в зоне их сопряжения.

Размеры расчётного фрагмента плиты приняты 3000х3000 мм, толщина плиты составляет 160 мм, сечение колонны – 400х400 мм. Для дискретизации конструкции использованы объёмные конечные элементы: для колонны размером 40х40х40 мм, для плиты – 40х40х20 мм. Такая дискретизация позволяет получить достаточно подробную картину изменения напряжённо-деформированного состояния в приопорной зоне и выявить участки концентрации усилий.

Расчёт выполняется с учётом нелинейной работы железобетонной конструкции. При моделировании учитываются физические свойства бетона и арматуры, а также изменение жёсткости элементов конструкции по мере увеличения нагрузки. Полученные результаты позволяют оценить особенности работы узла сопряжения, определить наиболее напряжённые зоны и проследить последовательность развития повреждений при постепенном увеличении внешней нагрузки.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве материала для бетона был выбран тяжелый бетон класса В25, смоделированный физическими нелинейными пространственными 8-узловыми изопараметрическими конечными элементами типа КЭ 236, для арматуры классов А500С и А240, заданными физически и геометрически нелинейными универсальными стержневыми элементами типа КЭ 410 [11].

В бетоне использован экспоненциальный закон деформирования, позволяющий учитывать различную работу бетона при сжатии и растяжении [1, 4, 11]. Для арматуры принят кусочно-линейный закон деформирования с учетом перехода материала в пластическую стадию [10]. Нагрузка прикладывалась равномерно по всей площади плиты с поэтапным увеличением на 1 кН/м² до максимального значения 30 кН/м². Общий вид расчетной модели представлен на рис. 1.

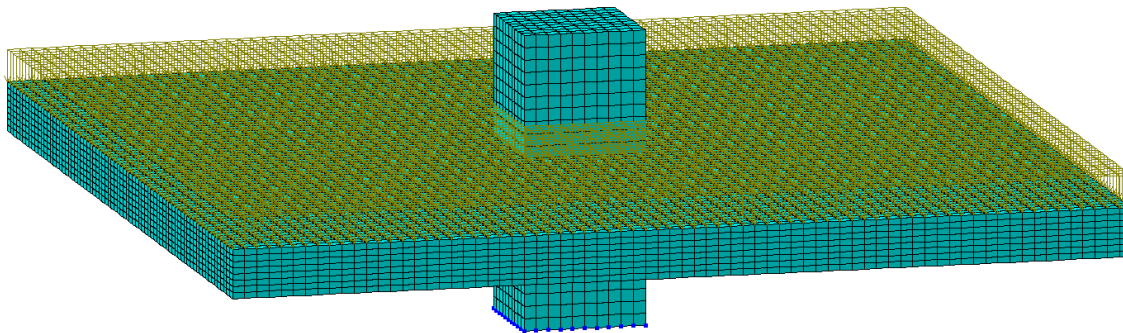


Рисунок 1 – Расчетная модель узла сопряжения плиты с колонной
Figure 1 – Computational model of the slab-to-column connection

Арматурный каркас узла, включающий продольную и поперечную арматуру скрытых балок, арматурные сетки плиты и армирование колонны, показан на рис. 2. Скрытые балки имеют продольную арматуру $4\varnothing 22$ в верхней зоне и $2\varnothing 22$ в нижней зоне, поперечное армирование выполнено хомутами $\varnothing 6$ с шагом 100мм. Плита армировалась верхней и нижней сеткой из стержней $\varnothing 10$ с шагом 200мм. Колонна армирована продольными стержнями $\varnothing 25$ и хомутами $\varnothing 6$ с шагом 100мм. Принятая конструктивная схема узла представлена в работах [8–9].

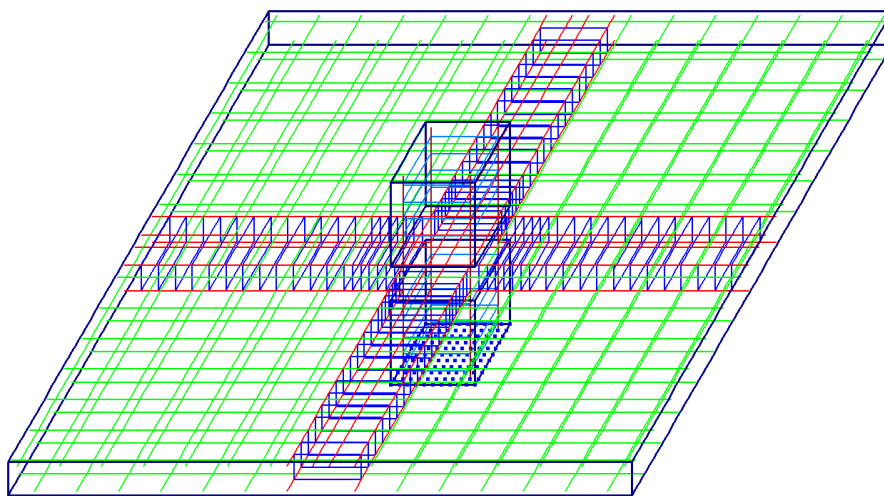


Рисунок 2 – Арматурный каркас узла
Figure 2 – Reinforcement cage of the joint

Для анализа напряжённо-деформированного состояния было выбрано 6 характерных точек в плите. Точки 1 и 4 расположены у грани колонны и отражают работу приопорной зоны, точка 2 и 5 находятся в средней части плиты, а точка 3 и 6 в угловых зонах. Такое расположение позволяет анализировать изменения напряжений и перемещений от грани колонны до края плиты.

Результаты (Results)

Анализ нормальных напряжений в узле сопряжения плиты с колонной.

Для изучения напряжённого состояния узла сопряжения плиты с колонной в безригельном каркасе рассмотрены нормальные напряжения N_x , N_y и N_z в характерных точках при шаговом нагружении. Из графика (рис. 3) видно, что наиболее интенсивный рост нормальных напряжений N_x наблюдается в точке 4. На четвертый ступени нагружения 4 кН/м^2 напряжения в точке 4 составляет $954,02 \text{ кН/м}^2$. При нагрузке 10 кН/м^2 оно заметно увеличивается и достигает $1717,06 \text{ кН/м}^2$ далее при 11 кН/м^2 напряжение возрастает до $1761,64 \text{ кН/м}^2$ после этой отметки кривая почти не меняется до окончания нагружения. В точках 2 и 3 рост значения также увеличивается постепенно и при

нагрузении 10 кН/м² выходит на уровень 1182,05 кН/м², что указывает на перераспределение усилий в плите после развития напряжённого состояния в наиболее напряжённой зоне. В точке 5 напряжение возрастает почти линейно и при максимальной нагрузке составляет 1047,95 кН/м², тогда как точка 6 практически не включается в работу по направлению Nx, так как значения в ней остаются близкими к нулю.

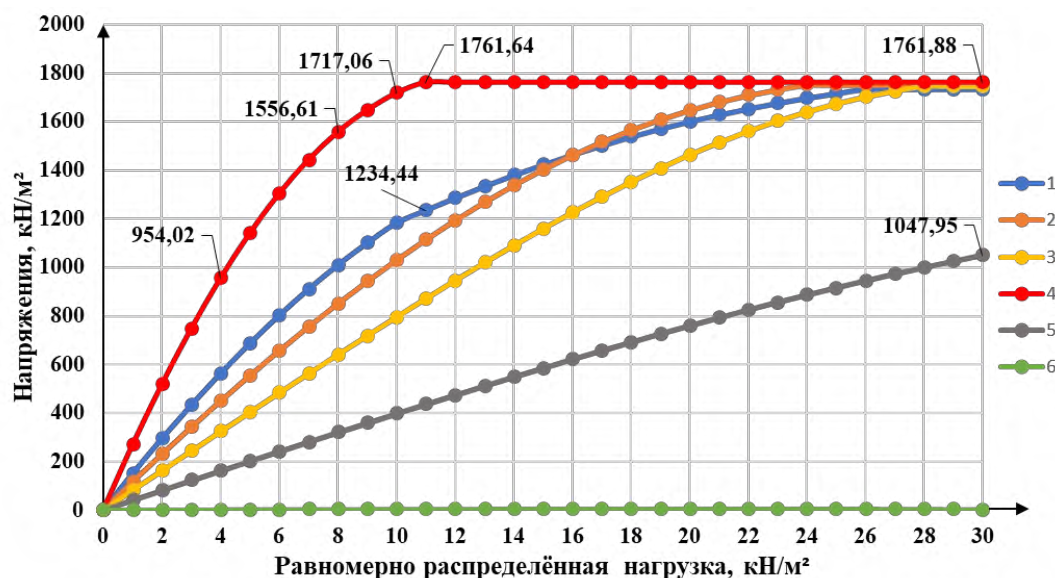


Рисунок 3 – Нормальные напряжения Nx в характерных точках
Figure 3 – Normal stresses Nx at characteristic points

По направлению Ny наибольшие значения напряжений наблюдаются в точках 1 и 4. В точке 1 максимальное значение напряжения достигает 1743,92 кН/м² при нагрузке 10 кН/м², тогда как в точке 4 максимум достигает 1761,62 кН/м² при нагрузке 11 кН/м². После этого значения практически не изменяются и до конца напряжения остаются в этом уровне. В точках 5 и 2 наблюдается постепенное увеличение напряжений, максимальное значение которых при полном нагружении составляет соответственно 1047,72 кН/м² для точки 5 и 866,58 кН/м² для точки 2.

Анализ напряжения Nz показывает иной характер распределения напряжений по сравнению с направлениями Nx и Ny, основное увеличение напряжений наблюдается тоже в точке 1 при нагрузке 11 кН/м², значение составляет 480,68 кН/м², а к концу расчета при 30 кН/м² достигает 1101,24 кН/м². Такая зависимость указывает на постоянное развитие напряжённого состояния по направлению Nz. В точке 4 после начального роста напряжения до при 11 кН/м² напряжении 480,68 кН/м² идёт снижение и при максимальном нагружении составляет 391,3 кН/м². В остальных точках значения остаются небольшими и к концу нагружения в этих точках фиксируется отрицательное значение равное -32,19 кН/м², что говорит о слабом участии этой зоны в работе по направлению Nz.

Сравнение значений нормальных напряжений в характерных точках приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная таблица нормальных напряжений в характерных точках при нагрузках 11 и 30 кН/м²

Table 1 – Comparison table of normal stresses at characteristic points under loads of 11 and 30 кН/м²

Характерные точки	При q = 11 кН/м ²			При q = 30 кН/м ²		
	Nx	Ny	Nz	Nx	Ny	Nz
1	1234,44	1744	480,68	1732,89	1745,66	1101,24
2	1113,22	421,51	-11,08	1750,92	866,58	-28,14
3	869,92	41,23	-8,57	1744,2	69,78	-27,35
4	1761,64	1761,62	494,82	1761,88	1761,86	391,3
5	434,24	434,21	-11,09	1047,95	1047,72	-31,12
6	1,72	1,72	-11,58	0,85	0,86	-32,19

Анализ касательных напряжений

Характер работы узла на сдвиг рассмотрен по распределению касательных напряжений τ_{xy} , τ_{xz} и τ_{yz} в характерных точках плиты.

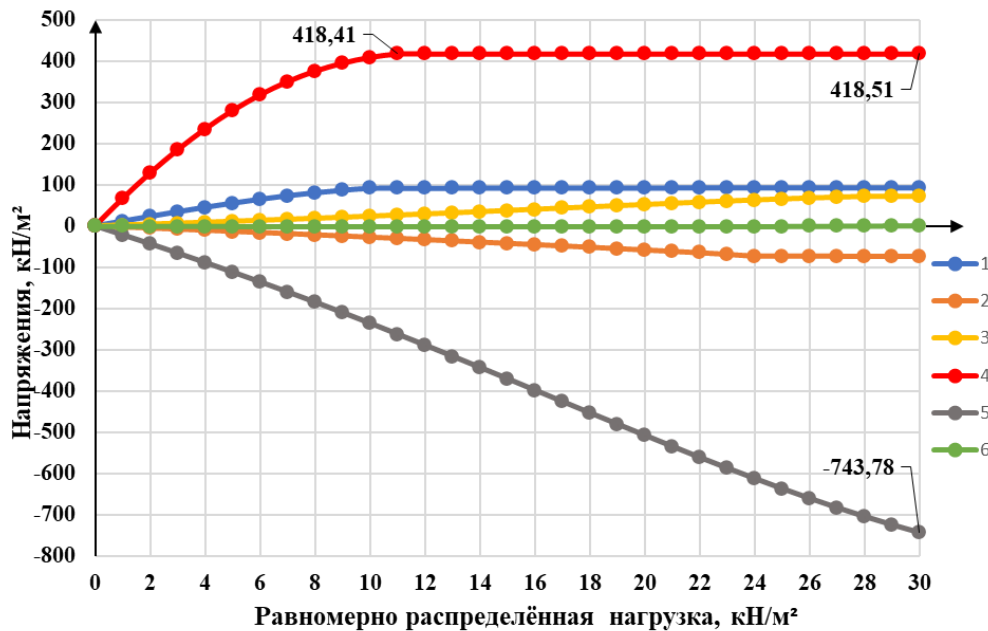


Рисунок 4 – Касательные напряжения τ_{xy} в характерных точках
Figure 4 – Shear stresses τ_{xy} at characteristic points

Из графика τ_{xy} , показанного на рис. 4, следует, что наиболее заметные изменения наблюдаются в точках 4 и 5, а в точке 4 значения быстро возрастают и при нагрузке 11 кН/м² достигают 418,41 кН/м² после чего не меняются, а в 5-й точке, наоборот, кривая уходит в отрицательную область и достигает -743,87 кН/м².

Для τ_{xz} определяющей остаётся 4-я точка до одиннадцатого шага нагружения, значения увеличиваются и достигают 341,34 кН/м², дальше график проходит в горизонтальную плоскость. В остальных характерных точках величины малы, в которых максимальное значение равно 49,48 кН/м², поэтому их влияние по данному направлению можно считать незначительным.

Характер распределения напряжения по направлению τ_{yz} показывает, что максимальными остаются точки 1 и 4, в которых значения напряжений в разы превышают показатели в остальных точках. Так, в точке 1 максимальное значение при 30 кН/м² составляет 365,09 кН/м², а в точке 4 – 343,56 кН/м². Другие точки малы, едва достигают 50 кН/м².

Максимальные значения касательных напряжений в рассматриваемых точках представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Максимальные значения касательных напряжений в рассматриваемых точках
Table 2 – Maximum shear stress values at the points under consideration.

Характерные точки	При $q = 11 \text{ кН/м}^2$			При $q = 30 \text{ кН/м}^2$		
	τ_{xy}	τ_{xz}	τ_{yz}	τ_{xy}	τ_{xz}	τ_{yz}
1	92,36	92,36	357,26	93,72	49,48	365,09
2	-29,75	-29,75	22,00	-73,13	1,05	49,46
3	26,50	26,50	12,20	72,31	0,14	20,79
4	418,41	418,41	341,35	418,51	343,56	343,56
5	-262,10	-262,10	9,77	-743,78	18,37	18,38
6	-0,78	-0,78	-0,13	1,29	-1,54	-1,54

Анализ продольных усилий в арматуре скрытой балки

С целью оценки участия скрытой балки в работе узла рассмотрены продольные усилия N в её арматурных стержнях при поэтапном увеличении нагрузки.

На рис.5 показаны продольные усилия N в стержнях арматуры скрытой балки узла сопряжения плиты с колонной, в котором наибольшие значения наблюдаются также в точках 1 и 4, расположенных у грани колонны.

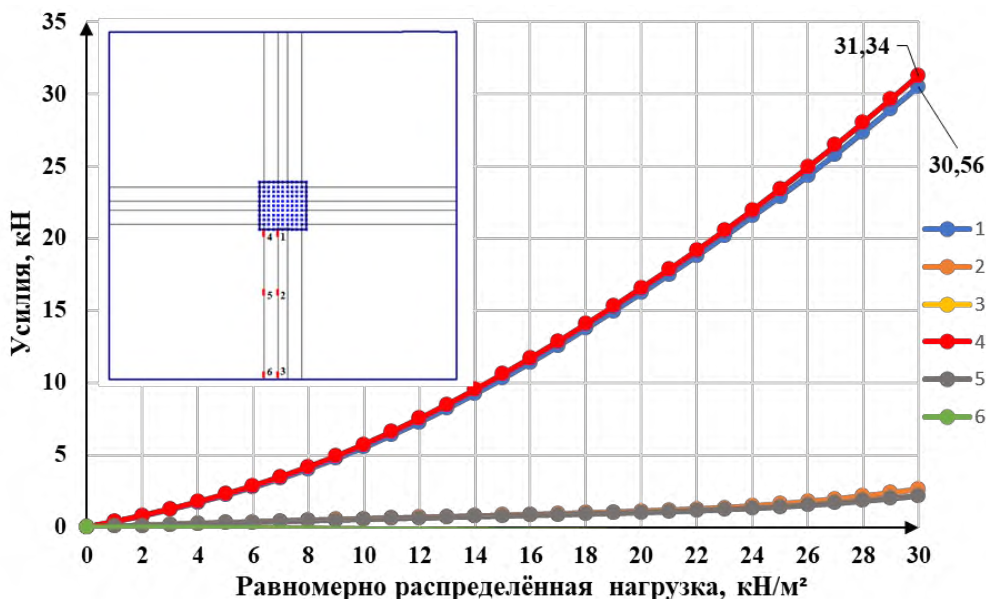


Рисунок 5 – Продольные усилия N в арматуре скрытой балки
Figure 5 – Longitudinal forces N in the reinforcement of the hidden beam

При максимальном нагружении 30 кН/м^2 усилие в точке 1 составляет $30,56 \text{ кН}$, а в точке 4 достигает $31,34 \text{ кН}$. Это показывает, что основная работа арматуры скрытой балки сосредоточена в приопорной зоне узла. Для арматуры скрытой балки это небольшие значения, поэтому можно отметить, что стержни включаются в работу, но с большим запасом.

Оценка узла по вторым предельным состояниям.**Анализ перемещения**

Рассмотрим перемещения характерных узлов сопряжения плиты с колонной по осям X , Y , и Z , представленные в табл. 3. Для анализа приняты узлы 1-6, расположенные последовательно от приопорной зоны у края колонны до края плиты. Такой подход позволит проследить изменения деформативности плиты по мере удаления от колонны.

По оси X перемещения имеют небольшое значение и направлены в отрицательную сторону, наибольшие значения наблюдаются в узлах 5 и 6, где при нагружении 30 кН/м^2 они достигают $0,108 \text{ мм}$. В остальных точках перемещения незначительны и это показывает, что горизонтальная деформация узла по направлению X выражена слабо и не является определяющей для общей работы плиты.

Перемещения по оси Y возрастают плавно по мере увеличения нагрузки, где наибольшее значение наблюдается в точке 2, в которой перемещение составляет $0,138 \text{ мм}$. Близкие значения фиксируются в узлах 3, 5 и 6, тогда как в узлах 1 и 4 имеют наименьшее смещение. Это показывает, что по направлению Y деформация развивается более равномерно, однако её значение, как и по оси X , остается небольшой.

Из анализа перемещений видно, что основные перемещения развиваются по оси Z , т.е. в вертикальном направлении. Максимальный прогиб наблюдается в узле 6 и при нагрузке 30 кН/м^2 составляет $4,335 \text{ мм}$, а в узлах 3 и 5 перемещения достигают соответственно $2,509 \text{ мм}$ и $2,106 \text{ мм}$ и в узле 2 составляет $1,162 \text{ мм}$. Это говорит о том, что вертикальная деформация наиболее

выражена в участках, отдалённых от колонны, тогда как приопорная зона сохраняет большую жёсткость.

Как видно из табл. 3, перемещения по осям X и Y остаются незначительными, а определяющим является перемещение по направлению оси Z.

Таблица 3 – Максимальные перемещения в характерных точках осей X, Y и Z
Table 3 – Maximum displacements at characteristic points along the X, Y, and Z axes

Характерные точки	Перемещения, мм при $q = 30 \text{ кН/м}^2$		
	по оси X	по оси Y	по оси Z
1	0,000	0,049	-0,051
2	0,000	0,138	-1,162
3	0,000	0,128	-2,509
4	-0,060	0,060	-0,152
5	-0,108	0,108	-2,106
6	-0,108	0,108	-4,335

Анализ развития трещинообразования

На рис. 6 представлен характер развития трещинообразования в узле сопряжения плиты с колонной на 30-ом шаге. До 9-го шага нагружения разрушение элементов, а значит образование трещин в расчетной модели не наблюдается, первые поврежденные элементы появляются только на 10-ом шаге, что соответствует нагрузке 10 кН/м^2 . На этом этапе трещинообразование имеет локальный характер и сосредоточено в приопорной зоне вокруг колонны, где происходит концентрация растягивающих и касательных напряжений.

При дальнейшем увеличении нагрузки зона повреждений постепенно расширяется от грани колонны, а трещины развиваются преимущественно вдоль основных направлений армирования скрытой балки.

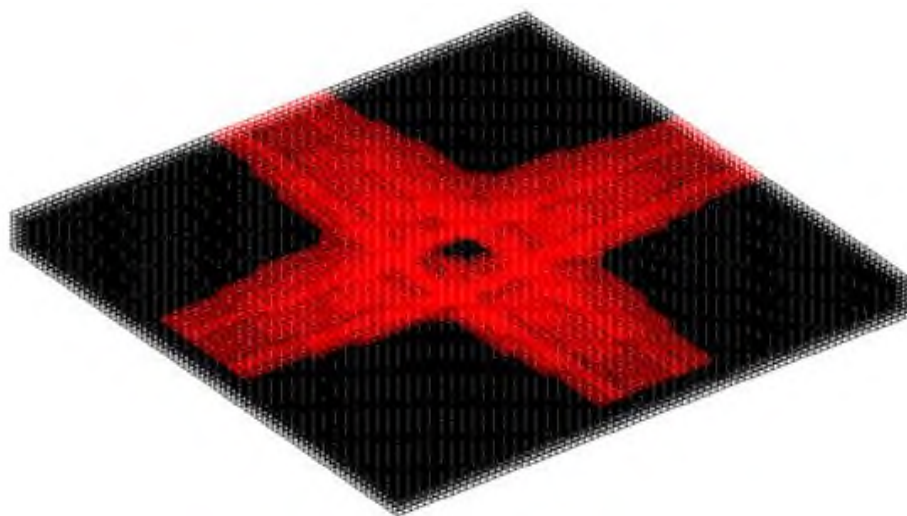


Рисунок 6 – Развитие трещинообразования в узле на 30-ом шаге
Figure 6 – Crack formation in the joint at the 30th step

К 30-му шагу нагружения при полной нагрузке трещинообразование становится развитым, что видно на рис. 6. Поврежденная область приобретает выраженный крестообразный характер и распространенная вдоль скрытых балок такая картина соответствует работе узла на продавливание.

Обсуждение (Discussions)

Результаты расчёта показывают, что наиболее напряжёнными зонами узла сопряжения плиты с колонной являются точки 1 и 4. По направлениям N_x и N_y максимальные значения напряжений достигают около 1762 кН/м^2 и при дальнейшем увеличении нагрузки практически

стабилизируются, что свидетельствует о перераспределении внутренних усилий. По направлению N_z наиболее интенсивный рост наблюдается в точке 1 – до 1101,24 кН/м² при нагрузке 30 кН/м². В остальных точках напряжения значительно ниже.

Касательные напряжения концентрируются преимущественно в точках 4 и 5. По направлению t_{xy} наибольшее значение в точке 5 достигает –743,78 кН/м², а в точке 4 – 418,51 кН/м². По t_{xz} максимальные напряжения наблюдаются в точке 4 и составляют 343,56 кН/м² при нагрузке 30 кН/м². По t_{yz} наиболее напряжёнными являются точки 1 и 4, где значения достигают соответственно 365,09 и 343,56 кН/м². В остальных точках касательные напряжения значительно ниже.

Продольные усилия в арматуре скрытой балки сосредоточены преимущественно в приопорной зоне в точках 1 и 4. При нагрузке 30 кН/м² их значения составляют соответственно 30,56 и 31,34 кН, что свидетельствует о включении скрытой балки в совместную работу с плитой и наличии значительного запаса по усилиям.

По результатам перемещений видно, что определяющими являются вертикальные перемещения по оси Z . Максимальный прогиб наблюдается в точке 6 и составляет 4,335 мм, тогда как в приопорной зоне перемещения значительно меньше. Это подтверждает более высокую жёсткость плиты в зоне сопряжения с колонной и увеличение деформативности по мере удаления от неё.

Развитие трещинообразования показывает, что до 9-го шага нагружения повреждений в расчётной модели не наблюдается. Первые повреждённые элементы появляются при нагрузке 10 кН/м² с дальнейшим увеличением нагрузки зона повреждений постепенно расширяется от грани колонны, а трещины развиваются преимущественно вдоль скрытых балок. При максимальной нагрузке на 30-м шаге формируется развитая крестообразная зона трещинообразования, характерная для работы узла на продавливание.

Заключение (Conclusions)

1.Выполненный шагово-нелинейный расчет по программе ЛИРА-САПР показал, что сопряжение плиты с колонной работает в сложном пространственном напряженно-деформированном состоянии. Наиболее ответственная зона формируется у грани колонны, где происходит концентрация нормальных и касательных напряжений.

2.По результатам анализа нормальных напряжений установлено, что максимальное значение N_x , N_y и N_z проявляется в характерных точках 1 и 4, расположенных в приопорной зоне колонны.

3.Касательные напряжения показывают, что в узле развиваются сдвигающие силы, наиболее существенные в точках 4 и 5, что указывает на возможное формирование наклонных трещин и необходимости учета продавливания при дальнейшем анализе несущей способности узла.

4.Перемещения в горизонтальных направлениях X и Y остаются небольшими и не являются главными, тогда как основная деформация развивается по оси Z , при этом максимальный прогиб фиксируется в узле 6.

5.Видимое трещинообразование начинается на 10-ом шаге нагружения, а к 30-му шагу зона повреждений расширяется вдоль скрытых балок и приобретает крестообразный характер, что соответствует работе узла на продавливание.

Рецензент: Низомов Дж. Н. — доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАНУП. Заведующий лабораторией «Сейсмостойкость зданий и сооружений» Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНУП

Литература

1. Блохина, Н.С. Проблема учета физической нелинейности при расчете строительных конструкций / Н.С. Блохина // Вестник МГСУ. – 2011. – № 6. – С. 384–387.
2. Варвак, П.М. Метод конечных элементов / П.М. Варвак, И.М. Бузун, А.С. Городецкий, В.Г. Пискунов, Ю.Н. Толокнов; под ред. П.М. Варвака. – Киев: Вища школа, 1981. – 176 с.
3. Городецкий А. С. Вопросы расчета конструкций в упругопластической стадии на ЭЦВМ // ЭЦВМ в строительной механике. – М.: Издательство литературы по строительству, 1966. – С. 169–174.
4. Диаграммы для физической нелинейности [Электронный ресурс] // RFLIRA: база знаний ЛИРА-САПР. – URL: <https://rflira.ru/kb/106/657/> (дата обращения: 25.05.2026)
5. Карпунин, В.Г. Компьютерное моделирование строительных конструкций в программном комплексе ЛИРА-САПР: учебное пособие / В.Г. Карпунин. – Екатеринбург: Архитектон, 2018. – 323 с.

6. Круглов, В.М. Нелинейные соотношения и критерий прочности бетона с трехосным напряженным состоянием / В.М. Круглов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1987. – № 1. – С. 40–44.
7. Махмадиев, У.М. Применение нелинейного закона деформирования бетона в ПК ЛИРА-САПР 2022 на основе результатов экспериментальных исследований / У.М. Махмадиев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2026. – № 1 (73). – С. 239–246. – DOI: 10.65599/ENG7748. – EDN: CCBAVD.
8. Нахустпатент № 903 Республика Таджикистан, МПК E04B 1/00, E04B 1/04, E04B 1/16, E04B 1/20, E04B 1/30. Безригельный каркас из монолитного железобетона с обычным армированием для сейсмических районов: № 1701165: заявл. 05.12.2017: опубл. 22.06.2018 / Л. Шарипов, Дж. Дж. Ахмадзода, А. Дж. Рахмонов, И. С. Муминов, К. А. Хамидов.
9. Патент № 037678 B1 Евразийская патентная организация, МПК E04B 1/21, E04B 5/43. Безригельный каркас из монолитного железобетона для сейсмических районов с комбинированным армированием: № 201900021: заявл. 04.12.2018: опубл. 30.12.2019 / Л. Шарипов, Д. Дж. Ахмадзода, А. Дж. Рахмонов, И. С. Муминов, К. А. Хамидов.
10. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Минстрой России, 2018. – 150 с.
11. Стрелец-Стрелецкий, Е.Б. ЛИРА-САПР. Книга I. Основы [Электронный ресурс] / Е.Б. Стрелец-Стрелецкий, А.В. Журавлев, Р.Ю. Водопьянов; под ред. А.С. Городецкого. – Киев: LIRALAND, 2019. – 154 с. – Режим доступа: https://rflira.ru/files/lira-sapr/Book_lirasapr_the_basics_2019.pdf (дата обращения: 25.05.2026).

Reference

1. Blokhina, N.S. The Problem of Accounting for Physical Nonlinearity in the Analysis of Structural Systems / N.S. Blokhina // Vestnik MGSU. – 2011. – No. 6. – P. 384–387.
2. Varvak, P.M. The Finite Element Method / P.M. Varvak, I.M. Buzun, A.S. Gorodetsky, V.G. Piskunov, Yu.N. Toloknov; edited by P.M. Varvak. – Kyiv: Vyshcha Shkola, 1981. – 176 p.
3. Gorodetsky, A.S. Problems of Structural Analysis in the Elastic-Plastic Stage Using Electronic Computing Machines // Electronic Computing Machines in Structural Mechanics. – Moscow: Izdatelstvo Literatury po Stroitelstvu, 1966. – P. 169–174.
4. Diagrams for Physical Nonlinearity [Electronic resource] // RFLIRA: LIRA-SAPR Knowledge Base. – URL: <https://rflira.ru/kb/106/657/> (accessed: 25.05.2026).
5. Karpunin, V.G. Computer Modeling of Building Structures in the LIRA-SAPR Software Package: Textbook / V.G. Karpunin. – Yekaterinburg: Arkhitekton, 2018. – 323 p.
6. Kruglov, V.M. Nonlinear Relationships and the Strength Criterion of Concrete under a Triaxial Stress State / V.M. Kruglov // Structural Mechanics and Analysis of Structures. – 1987. – No. 1. – P. 40–44.
7. Makhmadiev, U.M. Application of a Nonlinear Concrete Deformation Law in the LIRA-SAPR 2022 Software Package Based on the Results of Experimental Studies / U.M. Makhmadiev // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2026. – No. 1 (73). – P. 239–246. – DOI: 10.65599/ENG7748. – EDN: CCBAVD.
8. Nakhustpatent No. 903, Republic of Tajikistan, IPC E04B 1/00, E04B 1/04, E04B 1/16, E04B 1/20, E04B 1/30. Beamless Frame Made of Monolithic Reinforced Concrete with Conventional Reinforcement for Seismic Regions: No. 1701165: filed 05.12.2017: published 22.06.2018 / L. Sharipov, D.J. Ahmadzoda, A.D. Rakhmonov, I.S. Muminov, K.A. Khamidov.
9. Patent No. 037678 B1, Eurasian Patent Organization, IPC E04B 1/21, E04B 5/43. Beamless Frame Made of Monolithic Reinforced Concrete for Seismic Regions with Combined Reinforcement: No. 201900021: filed 04.12.2018: published 30.12.2019 / L. Sharipov, D.J. Ahmadzoda, A.D. Rakhmonov, I.S. Muminov, K.A. Khamidov.
10. SP 63.13330.2018. Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions. Updated Version of SNiP 52-01-2003. – Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2018. – 150 p.
11. Strelets-Streletskiy, E.B. LIRA-SAPR. Book I. Fundamentals [Electronic resource] / E.B. Strelets-Streletskiy, A.V. Zhuravlev, R.Yu. Vodopyanov; edited by A.S. Gorodetsky. – Kyiv: LIRALAND, 2019. – 154 p. – Available at: https://rflira.ru/files/lira-sapr/Book_lirasapr_the_basics_2019.pdf (accessed: 25.05.2026).

Сведения об авторе:

Муминов Ихтиёр Субхонкулович, старший преподаватель кафедры “Промышленное и гражданское строительство”, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3515-3456>. E-mail: imuminov86@gmail.com

Маълумот оид ба муаллиф:

Муминов Ихтиёр Субхонкулович, муаллими калони кафедраи сохтмони саноатӣ ва шаҳрвандӣ, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3515-3456>. E-mail: imuminov86@gmail.com

Information about the author:

Muminov Ikhtiyor Subkhonkulovich, Senior Lecturer at the Department of Industrial and Civil Engineering, Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3515-3456>. E-mail: imuminov86@gmail.com

КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА БЕТОНА КЛАССА В30 В ПРОЦЕССЕ ТВЕРДЕНИЯ

¹О.Б. Бердиев, ²Б.Ф. Ботиров

¹Джизакский политехнический институт, г. Джизак, Республика Узбекистан

²Ташкентский архитектурно-строительный университет, Ташкент, Республика Узбекистан

В данной статье экспериментально исследованы изменение прочности при сжатии традиционного бетона класса В30 в зависимости от продолжительности твердения, а также процессы формирования минералогического состава цементного камня. Прочность бетонных образцов при сжатии определялась в возрасте 3, 7 и 28 суток, а минералогические изменения, протекающие в цементном камне, оценивались методом рентгеновской дифракции (XRD). По результатам испытаний установлено, что прочность бетона при сжатии составила 25,11 МПа в возрасте 3 суток, 28,07 МПа — в возрасте 7 суток и 40,02 МПа — в возрасте 28 суток. Указанные значения составили соответственно 62,7; 70,1 и 100 % от 28-суточной прочности. Результаты XRD-анализа показали, что с увеличением продолжительности твердения происходят существенные изменения минералогического состава цементного камня. В образце в возрасте 3 суток в области $2\theta \approx 29,4^\circ$ зарегистрирован дифракционный максимум высокой интенсивности, а также выявлены дифракционные максимумы, связанные с фазами C_3S , C_2S , C_4AF и C_3A . В возрасте 7 суток наблюдалось увеличение выраженности и интенсивности дифракционных максимумов, а также была зарегистрирована фаза портландита $Ca(OH)_2$. В 28-суточном образце отмечены формирование стабильной кристаллической структуры и уплотнение микроструктуры цементного камня. Полученные результаты свидетельствуют о тесной взаимосвязи между кинетикой набора прочности бетона, процессами гидратации цемента и изменением минералогического состава цементного камня во времени.

Ключевые слова: бетон, класс В30, прочность при сжатии, кинетика набора прочности, гидратация цемента, рентгенодифракционный анализ, XRD, минералогический состав, алит, белит, портландит.

КИНЕТИКАИ АФЗОИШИ МУСТАҲКАМӢ ВА ҚОНУНИЯТҲОИ ТАШАККУЛӢИ ТАРКИБИ МИНЕРАЛОГИИ БЕТОНИ СИНФИ В30 ДАР РАВАНДИ САХТШАВӢ

¹О.Б. Бердиев, ²Б.Ф. Ботиров

¹Донишқадаи политехникии Қиззах, ш. Қиззах, Ҷумҳурии Ўзбекистон

²Донишгоҳи меъморӣ ва сохтмони Тошканд, Тошканд, Ҷумҳурии Ўзбекистон

Дар мақолаи мазкур тағйирёбии мустаҳкамӣи фишории бетони анъанавии синфи В30 вобаста ба давомнокии сахтшавӣ, инчунин равандҳои ташаккули таркиби минералогии санги сементӣ ба таври таҷрибавӣ таҳқиқ карда шудаанд. Мустаҳкамӣи фишории намунаҳои бетон дар синни 3, 7 ва 28 шабонарӯз муайян гардида, тағйироти минералогии дар санги сементӣ баамаломата бо усули дифраксияи рентгенӣ (XRD) арзёбӣ карда шуданд. Аз рӯи натиҷаҳои озмоиш муайян гардид, ки мустаҳкамӣи фишории бетон дар синни 3 шабонарӯз 25,11 МПа, дар синни 7 шабонарӯз 28,07 МПа ва дар синни 28 шабонарӯз 40,02 МПа-ро ташкил дод. Қиматҳои мазкур нисбат ба мустаҳкамӣи 28-шабонарӯза мутаносибан 62,7; 70,1 ва 100 %-ро ташкил намуданд. Натиҷаҳои таҳлили XRD нишон доданд, ки бо зиёд шудани давомнокии сахтшавӣ дар таркиби минералогии санги сементӣ тағйироти назаррас ба амал меоянд. Дар намунаи 3-шабонарӯза дар минтақаи $2\theta \approx 29,4^\circ$ максимуми дифраксионии дорои шиддатнокии баланд ба қайд гирифта шуда, инчунин максимумҳои дифраксионии марбут ба фазаҳои C_3S , C_2S , C_4AF ва C_3A муайян карда шуданд. Дар синни 7 шабонарӯз афзоиши возеҳият ва шиддатнокии максимумҳои дифраксионӣ мушоҳида гардида, инчунин фазаи портландит $Ca(OH)_2$ ба қайд гирифта шуд. Дар намунаи 28-шабонарӯза ташаккули сохтори устувори кристаллӣ ва зичшавии микросохтори санги сементӣ мушоҳида гардид. Натиҷаҳои бадастомада аз мавҷудияти робитаи зич байни кинетикаи афзоиши мустаҳкамӣи бетон, равандҳои гидрататсияи семент ва тағйирёбии таркиби минералогии санги сементӣ бо мурури вақт шаҳодат медиҳанд.

Калидвожаҳо: Бетон, синфи В30, мустаҳкамӣ ҳангоми фишурдашавӣ, кинетикаи афзоиши мустаҳкамӣ, гидрататсияи семент, таҳлили рентгенодифраксионӣ, XRD, таркиби минералогӣ, алит, белит, портландит.

STRENGTH DEVELOPMENT KINETICS AND PATTERNS OF MINERALOGICAL COMPOSITION FORMATION IN B30 CONCRETE DURING HARDENING

¹O.B. Berdiyev, ²B.F. Botirov

¹Jizzakh Polytechnic Institute, Jizzakh, Republic of Uzbekistan

²Tashkent University of Architecture and Civil Engineering, Tashkent, Republic of Uzbekistan

This article experimentally investigates the changes in the compressive strength of conventional B30 concrete depending on the curing age, as well as the processes involved in the formation of the mineralogical composition of the cement stone. The compressive strength of the concrete specimens was determined at 3, 7, and 28 days, while the mineralogical changes occurring in the cement stone were evaluated using X-ray diffraction (XRD) analysis. The test results showed that the compressive strength of concrete was 25.11 MPa at 3 days, 28.07 MPa at 7 days, and 40.02 MPa at 28 days. These values corresponded to 62.7%,

70.1%, and 100%, respectively, of the 28-day compressive strength. The XRD analysis showed that significant changes occurred in the mineralogical composition of the cement stone with increasing curing age. In the 3-day specimen, a high-intensity diffraction peak was recorded at $2\theta \approx 29.4^\circ$, along with diffraction peaks associated with the C_3S , C_2S , C_4AF , and C_3A phases. At 7 days, an increase in the prominence and intensity of the diffraction peaks was observed, and the portlandite $Ca(OH)_2$ phase was also detected. In the 28-day specimen, the formation of a stable crystalline structure and densification of the cement stone microstructure were observed. The obtained results indicate a close relationship between the kinetics of concrete strength development, cement hydration processes, and changes in the mineralogical composition of the cement stone over time.

Keywords: concrete, B30 class, compressive strength, strength development kinetics, cement hydration, X-ray diffraction analysis, XRD, mineralogical composition, alite, belite, portlandite.

Введение (Introduction)

Бетон является одним из наиболее широко применяемых композиционных материалов в современном строительстве. Его прочность и эксплуатационная надежность определяются минералогическим составом цемента, водоцементным отношением, технологией приготовления и уплотнения бетонной смеси, а также условиями твердения [6, 7]. Среди указанных факторов важную роль в формировании структуры бетона и повышении его прочности во времени играет процесс гидратации цемента [7, 12].

После взаимодействия цемента с водой начинается процесс гидратации клинкерных минералов. В результате данного процесса образуются продукты гидратации, формирующие структуру цементного камня, в том числе фаза $C-S-H$ и портландит $Ca(OH)_2$ [10]. Процессы гидратации, протекающие на начальных стадиях твердения, обеспечивают формирование ранней прочности бетона, тогда как дальнейшее развитие гидратации сопровождается совершенствованием структуры цементного камня и последующим повышением прочности бетона [7, 8].

Оценка только конечной 28-суточной прочности бетона не позволяет в полной мере охарактеризовать процессы структурообразования, протекающие в материале. В связи с этим важное значение имеет оценка кинетики набора прочности бетона путем сопоставления его прочностных показателей на различных сроках твердения [7].

При исследовании процессов гидратации материалов на цементной основе рентгенодифракционный анализ (XRD) является одним из эффективных инструментальных методов [8–10]. Метод XRD позволяет идентифицировать кристаллические фазы в составе цементного камня и проследить их изменения в зависимости от продолжительности твердения [8, 9]. В современных исследованиях комплексный анализ результатов XRD и механических испытаний широко применяется для оценки механизмов структурообразования материалов на цементной основе [11–14].

Исходя из вышеизложенного целью исследования являются экспериментальная оценка кинетики набора прочности при сжатии традиционного бетона класса В30 в возрасте 3, 7 и 28 суток, а также сравнительный анализ полученных механических показателей с результатами рентгенодифракционного анализа цементного камня.

Материалы и методы (Materials and methods)

Экспериментальные исследования проводились на образцах традиционного тяжелого бетона класса В30. Приготовление бетонной смеси и контроль её технологических свойств осуществлялись в соответствии с требованиями ГОСТ 10181–2014 и ГОСТ 7473–2010 [3, 4].

Для определения прочности при сжатии были изготовлены контрольные образцы кубической формы размером 100×100×100 мм. Подготовка образцов к испытаниям осуществлялась в соответствии с требованиями ГОСТ 10180–2012 [1].

Образцы хранились в лабораторных условиях при температуре $(20 \pm 5)^\circ C$ и относительной влажности воздуха не менее 55 %. Перед проведением испытаний образцы подвергались визуальному осмотру, в ходе которого проверялось наличие трещин, пор, повреждений граней, расслоений и других дефектов.

Средняя плотность бетонных образцов определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.1 [5].

Прочность бетонных образцов при сжатии определялась на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4 в соответствии с требованиями [1]. Образец устанавливали по центру плит пресса, после чего нагрузку непрерывно увеличивали со скоростью $(0,6 \pm 0,2)$ МПа/с. Максимальное значение нагрузки, зафиксированное в момент разрушения образца, принималось за разрушающую нагрузку.

Основная расчетная формула прочности бетона при сжатии имеет следующий вид:

$$R = \frac{F}{A} \quad (1)$$

где: R-прочность бетона при сжатии, МПа; F- максимальная разрушающая нагрузка, А-площадь поперечного сечения образца, воспринимающая нагрузку, мм² [1].

Для каждого срока твердения испытания проводились на трёх образцах. Обработка полученных результатов и статистическая оценка прочности бетона выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 10180–2012 и ГОСТ 18105–2018 [1, 2]. Обработка результатов испытаний также осуществлялась в соответствии с положениями ГОСТ 10180–2012.

Результаты (Results)

С целью оценки формирования прочности бетона во времени в процессе твердения образцы традиционного бетона класса В30 подвергались испытаниям на сжатие в возрасте 3, 7 и 28 суток. Для каждого срока твердения определялись средняя плотность образцов, величина разрушающей нагрузки и прочность бетона при сжатии.

Согласно результатам экспериментальных исследований, средняя прочность бетона при сжатии в возрасте 3 суток составила 25,11 МПа, в возрасте 7 суток — 28,07 МПа, а в возрасте 28 суток — 40,02 МПа. По отношению к 28-суточной прочности данные показатели составили соответственно 62,7; 70,1 и 100 %.

Полученные результаты показали закономерное увеличение прочности бетона с увеличением продолжительности твердения. Данная закономерность связана с формированием продуктов гидратации и развитием структуры цементного камня в процессе гидратации цемента, что также отмечается в других исследованиях [7, 11, 12].

Таблица 1 – Показатели прочности бетона класса В30 в зависимости от продолжительности твердения
Table 1 – Strength Characteristics of B30 Concrete Depending on Curing Age

Продолжительность твердения, сут	Средняя разрушающая нагрузка, кН	Прочность при сжатии, МПа	Относительно 28-суточной прочности, %
3	251,09	25,11	62,7
7	280,74	28,07	70,1
28	400,25	40,02	100

Результаты, представленные в таблице, показывают закономерное увеличение прочности бетона с увеличением продолжительности твердения. В частности, уже в возрасте 3 суток бетон достиг 62,7 % от своей 28-суточной прочности. К 7 суткам данный показатель увеличился до 70,1 %. В период от 7 до 28 суток наблюдался дальнейший рост прочности, и к возрасту 28 суток её значение достигло 40,02 МПа.

Если рассчитать относительное изменение прочности по отдельным периодам, то в интервале от 3 до 7 суток:

$$\Delta R_{3-7} = 28,07 - 25,11 = 2,96$$

что по отношению к прочности бетона в возрасте 3 суток составляет:

$$\frac{2,96}{25,11} \cdot 100\% = 11,79\%$$

В период от 7 до 28 суток:

$$\Delta R_{7-28} = 40,02 - 28,07 = 11,95$$

что по отношению к прочности бетона в возрасте 7 суток составляет:

$$\frac{11,95}{28,07} \cdot 100\% = 42,57\%$$

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показывают, что формирование прочности бетона класса В30 на различных этапах твердения протекает с неодинаковой интенсивностью.

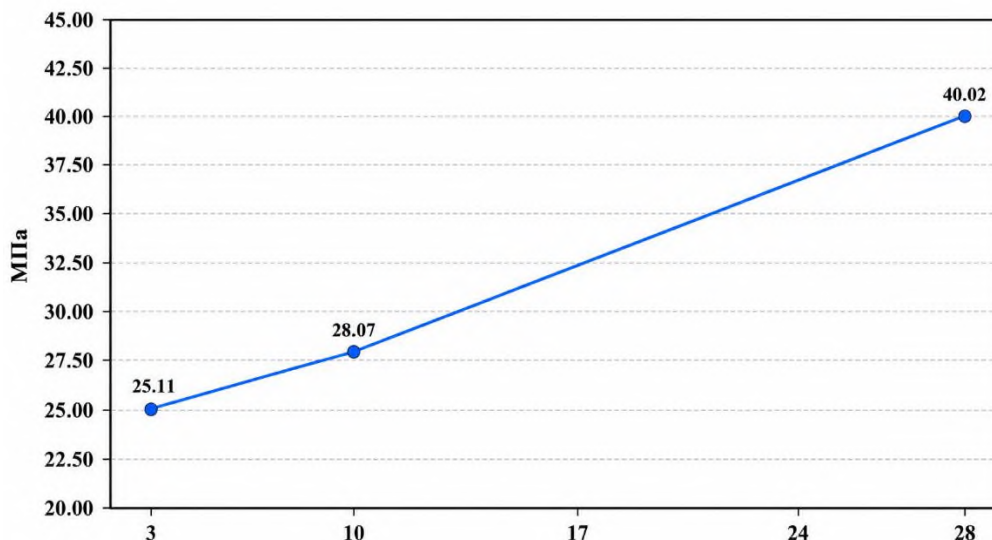


Рисунок 1 – Кинетика прочности бетона класса В30 при сжатии в зависимости от продолжительности твердения
Figure 1 – Compressive Strength Development Kinetics of B30 Concrete Depending on Curing Age

Для более детальной оценки кинетики набора прочности бетона целесообразно рассматривать не только абсолютные значения прочности, но и среднесуточную интенсивность её прироста в определённые интервалы времени.

Интенсивность набора прочности рассчитывалась по следующему выражению:

$$I_R = \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

где: I_R – средняя интенсивность прироста прочности, МПа/сут; R_1, R_2 – прочность бетона соответственно в начале и конце рассматриваемого временного интервала, МПа; t_1, t_2 – соответствующие сроки твердения бетона, сут.

Период 3–7 суток

$$I_{3-7} = \frac{28,07 - 25,11}{7 - 3} = 0,74 \text{ МПа/сутка}$$

Период 7–28 суток

$$I_{7-28} = \frac{40,02 - 28,07}{28 - 7} = 0,569 \text{ МПа/сутка}$$

Таблица 2 – Интенсивность набора прочности бетона класса В30

Table 2 – Strength Development Rate of B30 Concrete

Период твердения, сут	Начальная прочность, МПа	Конечная прочность, МПа	Прирост прочности, МПа	Средняя интенсивность прироста, МПа/сут
3–7	25,11	28,07	2,96	0,740
7–28	28,07	40,02	11,95	0,569

По результатам расчётов средняя интенсивность набора прочности в период 3–7 суток составила 0,740 МПа/сут, а в период 7–28 суток — 0,569 МПа/сут.

Следовательно, среднесуточная интенсивность прироста прочности снизилась на:

$$\frac{0,740 - 0,569}{0,740} \cdot 100\% = 23,1\%$$

Таким образом, в период 7–28 суток среднесуточная интенсивность набора прочности снизилась примерно на 23,1 % по сравнению с периодом 3–7 суток. Это может быть объяснено тем,

что процесс гидратации цемента протекает с неодинаковой скоростью во времени, а кинетика гидратации зависит от продолжительности твердения [7, 8, 12].

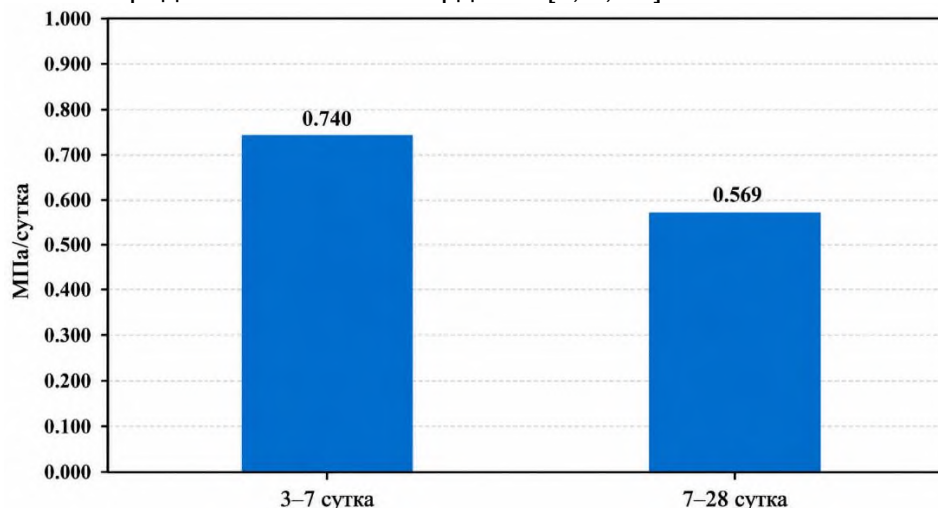


Рисунок 2 – Средняя интенсивность набора прочности бетона класса В30

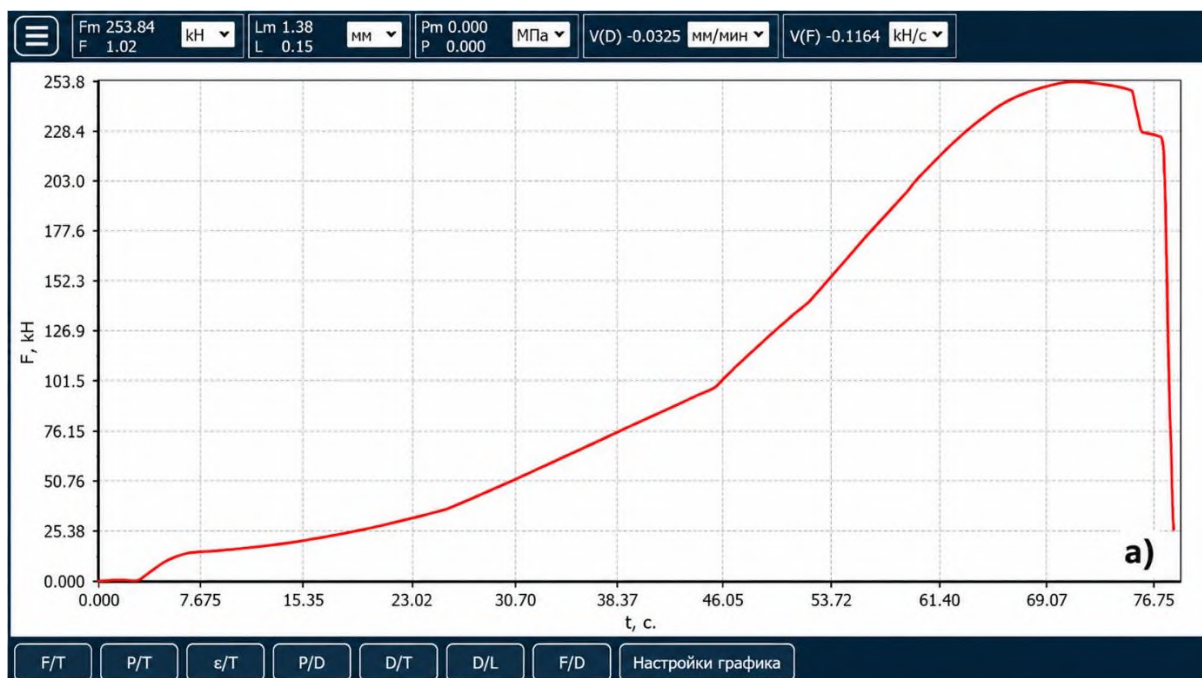
Figure 2 – Average Strength Development Rate of B30 Concrete

С целью оценки процесса набора прочности бетона класса В30 во взаимосвязи с минералогическими изменениями, происходящими в цементном камне, были рассмотрены результаты рентгенодифракционного анализа образцов в возрасте 3, 7 и 28 суток.

В исходном материале на дифрактограмме образца бетона после 3 суток твердения наиболее интенсивный пик наблюдался в области $2\theta = 29,4^\circ$ и был связан с фазой алита (C_3S). Кроме того, пики в областях $2\theta = 32,2^\circ$; $33,0^\circ$; $41,2^\circ$; $50,2^\circ$ и $59,8^\circ$ были интерпретированы как свидетельствующие о наличии фаз белита (C_2S), ферроалюмината (C_4AF) и алюмината (C_3A).

В данный период прочность бетона при сжатии составила 25,11 МПа, что соответствует 62,7 % от его 28-суточной прочности.

Согласно результатам XRD-анализа, на 3-и сутки процесс гидратации цемента протекал активно, при этом формировалась минералогическая основа для последующего повышения прочности и плотности бетона [8–10].



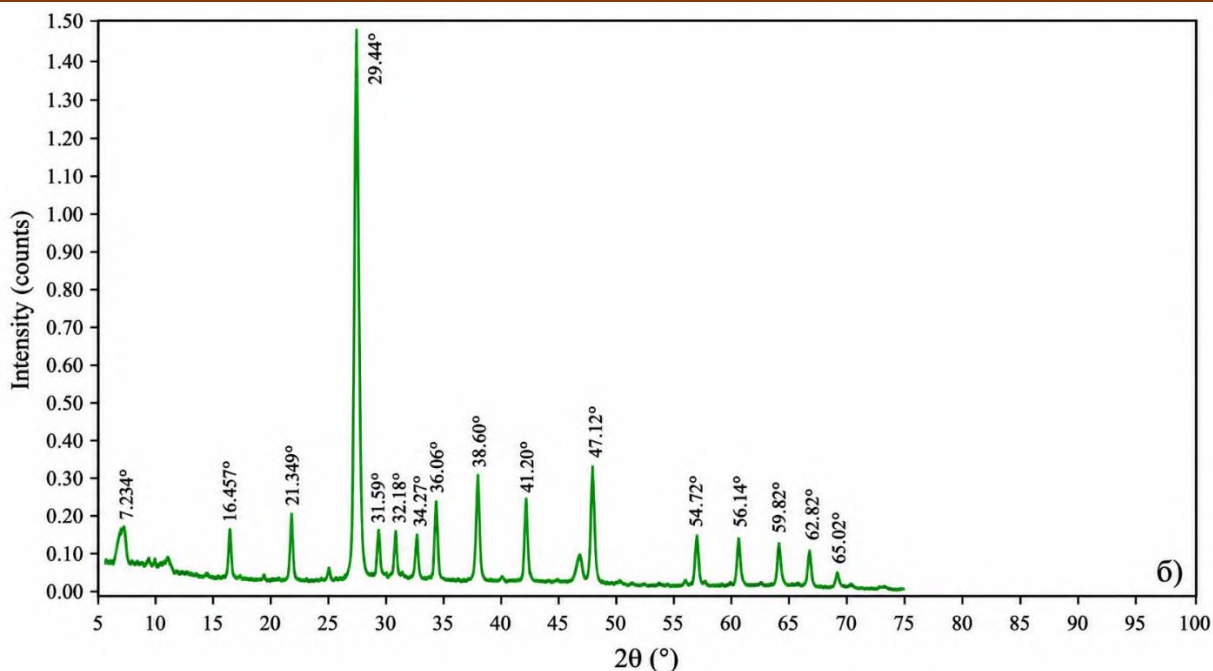


Рисунок 3 – Образец бетона класса В30 в возрасте 3 суток. а) прочность при сжатии в возрасте 3 суток; б) рентгенодифракционная картина (XRD) в возрасте 3 суток.

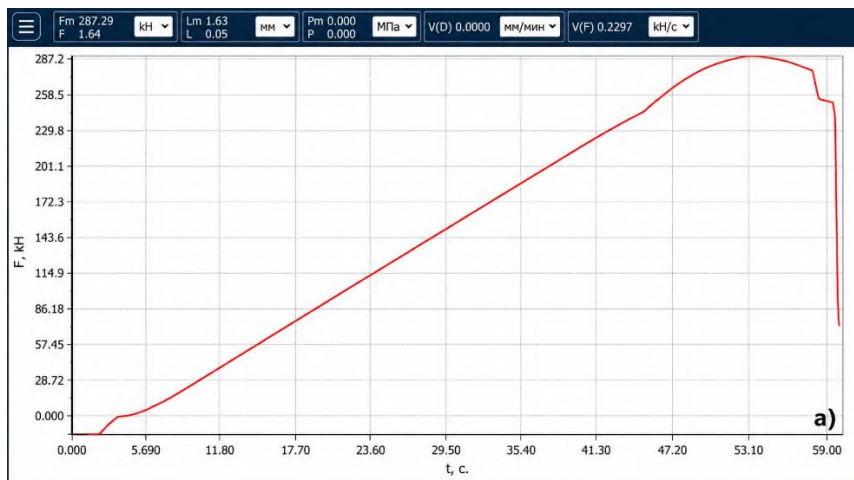
Figure 3 – B30 Concrete Specimen at 3 Days: (a) Compressive Strength at 3 Days; (b) X-ray Diffraction (XRD) Pattern at 3 Days

Результаты XRD-анализа образца бетона после 7 суток твердения показали дальнейшие изменения минералогического состава цементного камня. На дифрактограмме сохранился пик высокой интенсивности в области $2\theta \approx 29,4^\circ$. Кроме того, в областях $2\theta \approx 32-33^\circ$, 41° , 50° , 59° и 62° были зарегистрированы дифракционные пики, связанные с фазами белита (C_2S), ферроалюмината (C_4AF), алюмината (C_3A), а также портландита $Ca(OH)_2$.

В исходном материале увеличение выраженности и интенсивности дифракционных пиков по сравнению с образцом в возрасте 3 суток объясняется дальнейшим развитием процесса гидратации, увеличением количества кристаллических фаз и уплотнением микроструктуры бетона.

В этот период прочность бетона при сжатии достигла 28,07 МПа, что составляет 70,1 % от значения прочности в возрасте 28 суток.

Таким образом, увеличение прочности бетона в период от 3 до 7 суток с 25,11 МПа до 28,07 МПа происходило одновременно с минералогическими изменениями и процессами структурообразования, зафиксированными результатами XRD-анализа [8–10].



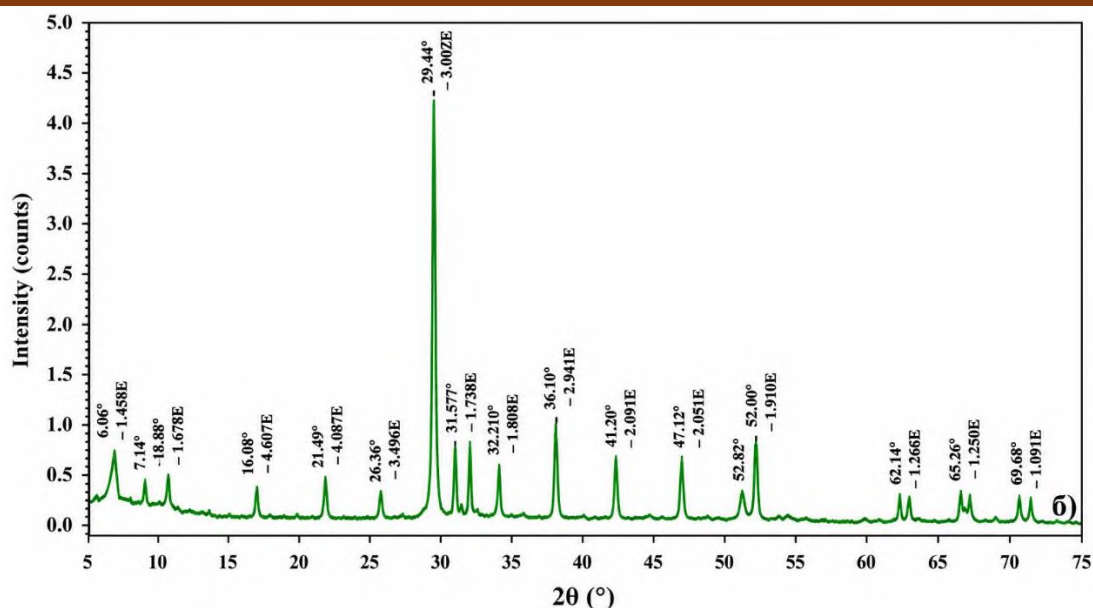


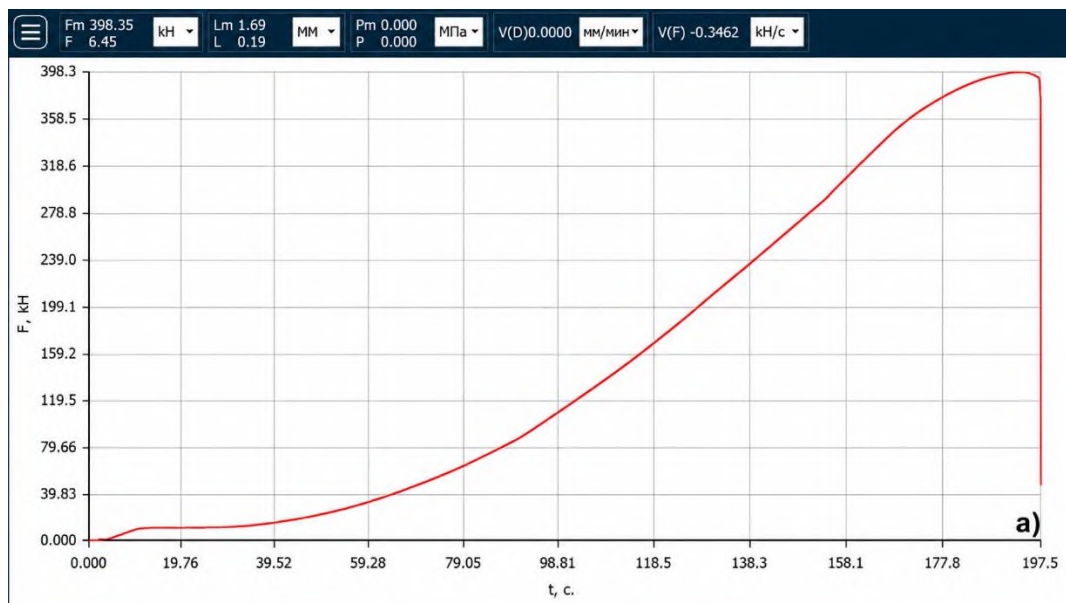
Рисунок 4 – Образец бетона класса В30 в возрасте 7 суток. а) прочность при сжатии в возрасте 7 суток; б) рентгенодифракционная картина (XRD) в возрасте 7 суток.
Figure 4 – B30 Concrete Specimen at 7 Days: (a) Compressive Strength at 7 Days; (b) X-ray Diffraction (XRD) Pattern at 7 Days

В возрасте 28 суток прочность бетона при сжатии достигла 40,02 МПа. В рамках данного исследования это значение было принято за 100 % контрольной прочности бетона в возрасте 28 суток.

При XRD-анализе образца в возрасте 28 суток был зарегистрирован пик высокой интенсивности в области $2\theta \approx 29,4^\circ$. В исходном материале также отмечено, что в областях $2\theta \approx 32-34^\circ$, $47-50^\circ$, 62° и 66° были выявлены дифракционные пики, связанные с фазами белита (C_2S), портландита $Ca(OH)_2$, ферроалюмината (C_4AF) и алюмината (C_3A) [8–10].

В образце в возрасте 28 суток высокая интенсивность и выраженность дифракционных пиков объясняются практически завершившимся процессом гидратации, устойчивым формированием кристаллических фаз и уплотнением микроструктуры бетона.

По сравнению с образцами в возрасте 3 и 7 суток, к 28 суткам отмечено существенное уплотнение микроструктуры цементного камня и формирование стабильных кристаллических фаз.



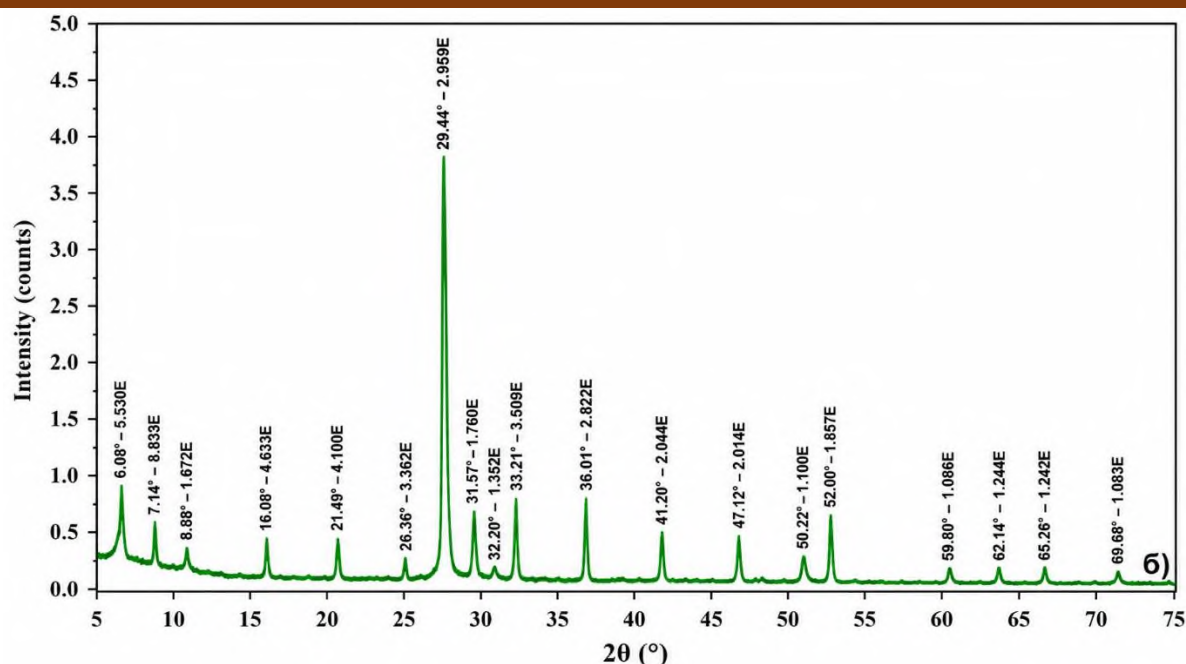


Рисунок 5 – Образец бетона класса В30 в возрасте 28 суток. а) прочность при сжатии в возрасте 28 суток; б) рентгенодифракционная картина (XRD) в возрасте 28 суток.

Figure 5 – B30 Concrete Specimen at 28 Days: (a) Compressive Strength at 28 Days; (b) X-ray Diffraction (XRD) Pattern at 28 Days

Совместный анализ полученных механических и рентгенодифракционных результатов показывает, что с увеличением продолжительности твердения бетона изменения прочностных показателей и рентгенодифракционной картины развивались параллельно.

Таблица 3 – Сравнительный анализ прочностных показателей и результатов XRD-анализа бетона класса В30
Table 3 – Comparative Analysis of Strength Characteristics and XRD Results of B30 Concrete

Срок твердения	Прочность, МПа	Относительно 28-суточной прочности, %	Основная характеристика XRD-анализа
3 суток	25,11	62,7 %	Пики, связанные с фазами C_3S , C_2S , C_4AF и C_3A ; активная стадия гидратации
7 суток	28,07	70,1 %	Зафиксирована также фаза $Ca(OH)_2$; повышение выраженности и интенсивности дифракционных пиков
28 суток	40,02	100 %	Формирование стабильной кристаллической структуры и уплотнение микроструктуры

Механические показатели, представленные в таблице, получены на основе экспериментальных результатов. Характеристики XRD, в свою очередь, основаны на результатах анализа образцов в возрасте 3, 7 и 28 суток, приведённых в исходном материале.

Обобщение полученных результатов показывает, что уже на 3-и сутки твердения бетон достиг значительной части своей 28-суточной прочности — 62,7 %. В последующие периоды абсолютная прочность продолжала возрастать и составила 28,07 МПа в возрасте 7 суток, достигнув 40,02 МПа к 28 суткам.

Вместе с тем результаты XRD-анализа также свидетельствуют об изменениях, происходящих в зависимости от продолжительности твердения. В возрасте 3 суток наблюдались дифракционные максимумы, связанные с исходными минералогическими фазами. К 7 суткам были также зарегистрированы пики, связанные с портландитом, при этом отмечалось повышение выраженности и интенсивности дифракционных пиков. В возрасте 28 суток, согласно исходному материалу, было отмечено формирование стабильной кристаллической структуры и уплотнённой микроструктуры цементного камня.

Для оценки однородности экспериментальных результатов использовался коэффициент вариации. Согласно исходным данным, значения разрушающей нагрузки для образцов в возрасте 28 суток составили 402,15; 398,35 и 400,25 кН, среднее значение — 400,25 кН, а стандартное отклонение — 1,90 кН.

Коэффициент вариации определялся по формуле:

$$V = \frac{S}{\bar{X}} \quad (3)$$

где: V — коэффициент вариации, %; S — стандартное отклонение; $\bar{X}$ — среднее арифметическое значение.

Тогда:

$$V = \frac{1,90}{400,25} \cdot 100\% = 0,475\%$$

Таким образом, коэффициент вариации составляет 0,48 %.

Полученное низкое значение коэффициента вариации свидетельствует о высокой однородности результатов в исследуемой серии образцов и их незначительном разбросе. Статистический контроль и оценка прочности бетона осуществляются в соответствии с требованиями ГОСТ 18105–2018 [2].

Обсуждение (Discussions)

Полученные результаты показывают тесную взаимосвязь между кинетикой набора прочности бетона класса В30 и минералогическими изменениями цементного камня. В возрасте 3 суток прочность составила 25,11 МПа (62,7 %), в 7 суток — 28,07 МПа (70,1 %), а к 28 суткам достигла 40,02 МПа.

Средняя интенсивность набора прочности снизилась с 0,740 МПа/сут в период 3–7 суток до 0,569 МПа/сут в период 7–28 суток, то есть примерно на 23,1 %. Это свидетельствует о постепенном замедлении прироста прочности с увеличением возраста бетона.

Данные XRD подтверждают, что рост прочности сопровождается развитием процессов гидратации и изменением минералогического состава цементного камня. Появление портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$, изменение дифракционных максимумов и последующее формирование более стабильной и плотной структуры согласуются с увеличением прочности бетона. Таким образом, совместный анализ механических и XRD-данных позволяет более полно оценить закономерности твердения бетона класса В30 [7–12].

Заключение (Conclusions)

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что прочность бетона класса В30 при сжатии в возрасте 3 суток составила 25,11 МПа, в возрасте 7 суток — 28,07 МПа, а в возрасте 28 суток — 40,02 МПа. При этом в возрасте 3 и 7 суток бетон достиг соответственно 62,7 и 70,1 % от своей 28-суточной прочности.

Установлено, что средняя интенсивность набора прочности в период 3–7 суток составила 0,740 МПа/сут, а в период 7–28 суток — 0,569 МПа/сут.

Результаты XRD-анализа показали, что с увеличением продолжительности твердения происходят изменения минералогического состояния цементного камня. В образце в возрасте 3 суток были зарегистрированы дифракционные рефлексы, связанные с клинкерными фазами, тогда как в образце в возрасте 7 суток дополнительно наблюдались пики, связанные с портландитом $\text{Ca}(\text{OH})_2$. К возрасту 28 суток, согласно исходному материалу, отмечены формирование стабильной кристаллической структуры и уплотнение микроструктуры цементного камня.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности комплексной оценки процесса формирования прочности бетона во времени с учётом процессов гидратации цемента и сопутствующих минералогических и структурных изменений [7–12].

Рецензент: Шарифов А. — доктор технических наук, профессор. Заведующий отделом «Водородная энергетика» Института химии имени В.И. Никитина НАНП.

Литература

1. ГОСТ 18105–2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.
2. ГОСТ 7473–2010. Смеси бетонные. Технические условия.
3. ГОСТ 10181–2014. Смеси бетонные. Методы испытаний.

4. ГОСТ 12730.1–2020. Бетоны. Методы определения плотности.
5. ГОСТ 26633–2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.
6. Bhat, R. A Comprehensive Analysis of Hydration Kinetics and Compressive Strength Development of Fly Ash–Portland Cement Binders / R. Bhat, T. Han, G. Sant, N. Neithalath, A. Kumar // *Journal of Building Engineering*. – 2024. – Vol. 88. – Art. 109191. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.109191.
7. Gonçalves, B. X-ray Diffraction Study of the Early Hydration of Portland Cements Containing Calcium Carbonate by In-situ and Ex-situ Approaches / B. Gonçalves, C. Exposito et al. // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 365. – Art. 129947. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129947.
8. Fanna, D.J. Long-term In Situ X-ray Diffraction Studies on Ordinary Portland Cement Hydration with Correlative X-ray Mapping / D.J. Fanna, Q. Huang, L. George, Z. Tao, K. Moran, R. Wuhler // *Microscopy and Microanalysis*. – 2023. – Vol. 29. – P. 165–167. – DOI: 10.1093/micmic/ozad067.074.
9. Dorn, T. Working Mechanism of Calcium Nitrate as an Accelerator for Portland Cement Hydration / T. Dorn, T. Hirsch, D. Stephan // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2023. – Vol. 106. – P. 752–766. – DOI: 10.1111/jace.18782.
10. Antonovič, V. A Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Cement-Based Materials / V. Antonovič et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – Art. 354.
11. Llorens, J. An Approach to Understanding the Hydration of Cement-Based Materials / J. Llorens et al. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – Art. 9388.
12. Kang, I. Optimal Limestone Content on Hydration Properties of Cementitious Materials / I. Kang et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17. – Art. 3255.
13. Malaiškienė, J. The Influence of Silica Fly Ash and Wood Bottom Ash on Cement Hydration and Concrete Properties / J. Malaiškienė et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17. – Art. 4031.
14. John, E. Calcium Silicate Hydrate—In-situ Development of the Silicate Structure / E. John et al. // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2021. – Vol. 104, No. 12.

Reference

1. GOST 18105–2018. Concrete. Rules for Control and Assessment of Strength.
2. GOST 7473–2010. Concrete Mixtures. Specifications.
3. GOST 10181–2014. Concrete Mixtures. Test Methods.
4. ГОСТ 12730.1–2020. Concrete. Methods for Determination of Density.
5. ГОСТ 26633–2015. Heavyweight and Fine-Grained Concrete. Specifications.
6. Bhat, R. A Comprehensive Analysis of Hydration Kinetics and Compressive Strength Development of Fly Ash–Portland Cement Binders / R. Bhat, T. Han, G. Sant, N. Neithalath, A. Kumar // *Journal of Building Engineering*. – 2024. – Vol. 88. – Art. 109191. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.109191.
7. Gonçalves, B. X-ray Diffraction Study of the Early Hydration of Portland Cements Containing Calcium Carbonate by In-situ and Ex-situ Approaches / B. Gonçalves, C. Exposito et al. // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 365. – Art. 129947. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129947.
8. Fanna, D.J. Long-term In Situ X-ray Diffraction Studies on Ordinary Portland Cement Hydration with Correlative X-ray Mapping / D.J. Fanna, Q. Huang, L. George, Z. Tao, K. Moran, R. Wuhler // *Microscopy and Microanalysis*. – 2023. – Vol. 29. – P. 165–167. – DOI: 10.1093/micmic/ozad067.074.
9. Dorn, T. Working Mechanism of Calcium Nitrate as an Accelerator for Portland Cement Hydration / T. Dorn, T. Hirsch, D. Stephan // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2023. – Vol. 106. – P. 752–766. – DOI: 10.1111/jace.18782.
10. Antonovič, V. A Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Cement-Based Materials / V. Antonovič et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – Art. 354.
11. Llorens, J. An Approach to Understanding the Hydration of Cement-Based Materials / J. Llorens et al. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – Art. 9388.
12. Kang, I. Optimal Limestone Content on Hydration Properties of Cementitious Materials / I. Kang et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17. – Art. 3255.
13. Malaiškienė, J. The Influence of Silica Fly Ash and Wood Bottom Ash on Cement Hydration and Concrete Properties / J. Malaiškienė et al. // *Materials*. – 2024. – Vol. 17. – Art. 4031.
14. John, E. Calcium Silicate Hydrate—In-situ Development of the Silicate Structure / E. John et al. // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2021. – Vol. 104, No. 12.

Сведения об авторах:

Бердиев Облокул Бобокулович, канд. техн. наук, профессор, кафедра Строительные материалы и конструкции, Джизакский политехнический институт, г. Джизак, Узбекистан, ORCID: 0000-0003-4105-2176
E-mail: jizpimalaka@mail.ru

Ботиров Бектош Фарход угли, докторант(PhD), кафедра Строительство зданий и сооружений, Ташкентский архитектурно-строительный университет, г. Ташкент, Узбекистан, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2084-8418>. E-mail: korreys95@gmail.com

Information about the authors:

Berdiev Oblokul Bobokulovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Building Materials and Structures, Jizzakh Polytechnic Institute, Jizzakh, Uzbekistan, ORCID: 0000-0003-4105-2176, E-mail: jizpimalaka@mail.ru

Botirov Bektosh Farkhod ugli, PhD student, Department of Building and Structure Construction, Tashkent University of Architecture and Civil Engineering, Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: 0000-0002-2084-8418. E-mail: korreys95@gmail.com

МЕТОДИКА ВЫБОРА И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОГЭС НА ЗАТВОРАХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

¹М.М. Мухаммадиев, ¹К.С. Джураев, ¹Д.А. Маматкулов, ²Н.М. Хасанзода

¹Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Республика Узбекистан

²Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В данной статье подробно исследуется актуальная возможность эффективного использования гидравлической энергии водных потоков на существующих гидротехнических сооружениях с плоскими затворами для автономной выработки экологически чистой электроэнергии с помощью микроГЭС. В работе представлена и научно систематизирована комплексная методика определения ключевых технико-экономических параметров микрогидроэлектростанций, которая охватывает гидравлические расчеты напора и мощности, а также детальную оценку экономических показателей. Авторами последовательно рассчитываются объемы годовой выработки электроэнергии, необходимые первоначальные капитальные вложения, текущие эксплуатационные затраты, потенциальная экономия условного топлива, чистая прибыль и итоговый срок окупаемости энергетических установок. В практической части статьи приведены точные результаты численных расчетов для широкого диапазона расхода воды от 0,5 до 6,2 м³/с и соответствующей мощности оборудования от 12,05 до 98,23 кВт. Полученные авторами данные наглядно демонстрируют закономерное снижение расчетного срока окупаемости проекта с 4,960 до 3,029 лет при увеличении установленной мощности микроГЭС. Сформулированные выводы и результаты позволяют научно обосновать экономическую и техническую целесообразность массового применения микроГЭС на гидротехнических затворах в условиях современных водозаборных, водовыпускных и водопропускных сооружений. Разработанный подход вносит значительный вклад в развитие малой гидроэнергетики и рациональное использование водных ресурсов региона.

Ключевые слова: микроГЭС, гидротехнический затвор, гидравлический напор, расход воды, мощность, выработка электроэнергии, капитальные вложения, экономическая эффективность.

МЕТОДИКА И ИНТИХОБ ВА АСОСНОК КУНИИ ТЕХНИКИ- ИҚТИСОДИИ ПАРАМЕТРҲОИ НБО-и ХУРД ДАР ДАРОМАДҲОҶИ ИНШООҲОИ ГИДРОТЕХНИКӢ

¹М.М. Мухаммадиев, ¹К.С. Джураев, ¹Д.А. Маматкулов, ²Н.М. Хасанзода

¹Донишгоҳи давлатии техники Тошканд ба номи Исмоил Каримов, Ҷумҳурии Ўзбекистон

²Донишгоҳи техники Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар ин мақола имконияти муҳими истифодаи самарабахши энергияи гидравликии ҷараёнҳои об дар иншооти гидротехникии дорои дарвозаҳои ҳамвор барои тавлиди мустақили неруи барқ аз ҷиҳати экологӣ тоза тавассути неругоҳҳои барқӣ обӣ хурд (НБОХ) ба таври муфассал баррасӣ шудааст. Дар асоси маводҳои аввалия, методикаи мукамал ва мунтазамӣ муайян кардани нишондиҳандаҳои техникии ва иқтисодии НБОХ таҳия гардидааст, ки он ҳисоби фишори гидравликии об, тавоноӣ ва арзёбии нишондиҳандаҳои асосии иқтисодиро дар бар мегирад. Ин методология ҳисобкунии тавлиди солонаи неруи барқ, маблағгузорию асосии аввалия, хароҷоти ҳарсолаи истисморӣ, сарфаи сӯзишвории шартӣ, ғоидаи соф ва муҳлати худкафоягии (бозгардони маблағ) иншооти энергетикиро таъмин менамояд. Дар қисми амалии қор натиҷаҳои дақиқи ҳисобкунӣ барои доираи васеи сарфи оби 0,5 - 6,2 м³/с ва тавоноии таҷдизоти 12,05 - 98,23 кВт оварда шудаанд. Маълумоти бадастомада нишон медиҳанд, ки бо афзоиши тавоноии НБОХ муҳлати ҳисобшудаи худкафоягии лоиҳа аз 4,960 то 3,029 сол ба таври қонунӣ коҳиш меёбад. Натиҷаҳои бадастомада имкон медиҳанд, ки истифодаи самараноки неругоҳҳои хурди барқӣ обӣ дар дарвозаҳои гидротехникии дар шароити иншооти обгирӣ, оббароранда ва обукаткунии дарёҳо ва каналҳо аз ҷиҳати техникии ва иқтисодӣ асоснок карда шаванд. Равиши пешниҳодшуда барои рушди энергетикаи хурд ва истифодаи оқилонаи захираҳои обии минтақа аҳамияти калон дорад.

Калидвожаҳо: неругоҳи хурди барқӣ обӣ (НБОХ), дарвозаи гидротехникии, фишори гидравликии, сарфи об, тавоноӣ, тавлиди неруи барқ, маблағгузорию асосӣ, самаранокии иқтисодӣ.

METHODOLOGY FOR THE SELECTION AND TECHNO-ECONOMIC FEASIBILITY STUDY OF MICRO-HYDRO POWER PLANT PARAMETERS AT HYDROTECHNICAL STRUCTURE GATES

¹M.M. Mukhammadiev, ¹K.S. Dzhusraev, ¹D.A. Mamatkulov, ²N.M. Khasanzoda

¹Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Republic of Uzbekistan

²Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

This article comprehensively examines the relevant feasibility of utilizing the hydraulic energy of water flows at existing hydraulic structures equipped with flat slide gates for autonomous, eco-friendly electricity generation via micro hydropower plants (micro HPPs). Based on extensive source materials, a fully systematized methodology has been developed to determine the critical technical and economic parameters of micro HPPs, integrating hydraulic calculations of head and capacity with financial evaluation. The proposed methodology step-by-step encompasses the calculations of annual electricity generation, initial capital investments, annual operating expenses, potential equivalent fuel savings, net profit, and the final payback period of the energy installations. In the practical section, precise computational results are presented for a wide water flow rate range of 0.5 to 6.2 m³/s and a corresponding equipment capacity range of 12.05 to 98.23 kW. The data obtained by the authors clearly indicate a consistent decrease in the calculated project payback period from 4.960 to 3.029 years as the installed capacity of the micro HPP increases. These essential findings provide a solid scientific and economic justification for implementing micro HPPs

directly at hydraulic gates within water intake, outlet, and water-release structures. This integrated approach contributes significantly to the development of small-scale hydropower engineering and the rational, sustainable use of regional water resources.

Keywords: *micro HPP, hydraulic gate, hydraulic head, water flow rate, capacity, electricity generation, capital investments, economic efficiency.*

Введение (Introduction)

Экологические требования, а также наличие территориально удаленных от электрических сетей сельскохозяйственных объектов небольшой мощности формируют потребность в автономных источниках электроэнергии. Развитие генерирующих мощностей, включая возобновляемые источники энергии, рассматривается как одно из направлений развития электроэнергетики Узбекистана [4]. В исходном материале рассматриваются объекты, расположенные вблизи водных потоков с напорами от 1 до 6 м и энергетическими возможностями в диапазоне от 1 до 100 кВт. Для таких условий перспективным направлением является применение недорогих автономных микроГЭС [1, 6].

Высокая энергетическая плотность водного потока, возможность регулирования его энергии и относительная стабильность режима стока создают предпосылки для использования гидротурбин в составе автономных энергетических установок. Практика применения микроГЭС на существующих гидравлических системах показывает возможность преобразования энергии водного потока в электрическую энергию непосредственно на существующих гидротехнических сооружениях [1, 9]. Вместе с тем применение нерегулируемых гидродвигателей предъявляет повышенные требования к стабилизации напряжения и частоты.

Разработка низконапорных микроГЭС требует предварительного изучения водного объекта, его гидравлических характеристик и диапазонов изменения расхода. Для затворов особенно важным является определение характеристик потока непосредственно в плоскости затвора: расчетные и экспериментальные исследования показывают неравномерность распределения скоростей и наличие вертикальной составляющей скорости [5]. Особый практический интерес представляет размещение микроГЭС непосредственно на затворах гидротехнических сооружений, где уже имеются перепад уровней воды и организованный водопропуск [1, 3, 7, 9, 10].

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве расчетной схемы рассматривается гидроузел энергосистемы, включающий водохранилище, плотину, подводящий и магистральный каналы, распределители, деривационный канал, напорный бассейн, водосброс и реку. В отдельных участках гидроузла предусмотрены гидротехнические затворы, на которых может быть размещена микроГЭС. Возможность такого совмещения с существующими гидросистемами и затворами рассмотрена в работах [1, 3, 7, 9, 10].



Рисунок 1 - Схема гидроузла энергосистемы и предполагаемые места установки микроГЭС.
(Сгенерировано ИИ).

Figure 1- Diagram of the water management and power facility showing proposed installation sites for micro-hydroelectric power plants. (Generated by AI).

Расчетная схема непосредственно установленной на затворе микроГЭС предусматривает входящий расход $Q_{\text{прих}}$ по подводящему каналу, расход $Q_{\text{микроГЭС}}$ через гидроагрегат и уходящий расход $Q_{\text{уход}}$ по отводящему каналу. При установившемся режиме выполняется условие баланса расходов $Q_{\text{микроГЭС}} = Q_{\text{уход}}$. Определение расхода через затвор требует учета распределения скоростей потока в его вертикальном сечении [5].

Напор для микроГЭС определяется по следующему уравнению (1):

$$H = \left(\nabla_{\text{ВБ}} + \frac{Q_{\text{прих}} \cdot t}{S_{\text{дно_вб}}} - \frac{Q_{\text{микроГЭС}} \cdot t}{S_{\text{дно_вб}}} \right) - \left(\nabla_{\text{НБ}} + \frac{Q_{\text{уход}} \cdot t}{S_{\text{дно_нб}}} - \frac{Q_{\text{микроГЭС}} \cdot t}{S_{\text{дно_нб}}} \right) - h_w = [\text{м}]. \quad (1)$$

где $\nabla_{\text{ВБ}}$ – отметка воды до затвора, т.е. отметка верхнего бьефа микроГЭС, м; $\nabla_{\text{НБ}}$ – отметка воды после затвора, т.е. отметка нижнего бьефа микроГЭС, м; $S_{\text{дно_вб}}$ и $S_{\text{дно_нб}}$ – площади дна верхнего и нижнего бьефа, м²; h_w – потеря напора водопроводящего тракта микроГЭС, м; t – время работы микроГЭС, сек.

Потеря напора водопроводящего тракта микроГЭС определяется:

$$h_w = 1,1 \cdot \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{16 \cdot Q_{\text{микроГЭС}}^2}{\pi^2 g \cdot D^4} = 0,182 \cdot \lambda \cdot \frac{L \cdot Q_{\text{микроГЭС}}^2}{D^5}, [\text{м}]. \quad (2)$$

где L – длина водопроводящего тракта микроГЭС, м; D – диаметр водопроводящего тракта микроГЭС, м; λ – коэффициент гидравлического трения и определяется:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_s}{D} \right). \quad (3)$$

где Δ_s – коэффициент шероховатости стенок.



Рисунок 2 - Схема использования затвора гидротехнического сооружения с микроГЭС. (Сгенерировано ИИ).
Figure 2 - Diagram of a hydraulic structure gate integrated with a micro-hydroelectric power plant. (Generated by AI).

Исходя из того, что входящий расход равен уходящему расходу $Q_{\text{микроГЭС}} = Q_{\text{уход}}$, тогда напор примет такую форму:

$$H = \left(\nabla_{\text{ВБ}} + \frac{Q_{\text{прих}} \cdot t}{S_{\text{дно_вб}}} - \frac{Q_{\text{микроГЭС}} \cdot t}{S_{\text{дно_вб}}} \right) - \left(\nabla_{\text{НБ}} - \frac{Q_{\text{уход}} \cdot t}{S_{\text{дно_нб}}} + \frac{Q_{\text{микроГЭС}} \cdot t}{S} \right) - h_w = \nabla_{\text{ВБ}} - \nabla_{\text{НБ}} + \frac{1}{S_{\text{дно_вб}}} (Q_{\text{прих}} \cdot t - Q_{\text{микроГЭС}} \cdot t) - h_w = [\text{м}] \quad (4)$$

Рассмотрим, что $t=1$ сек, потому что единица измерения расхода $\text{м}^3/\text{сек}$ и $Q \cdot t = W = \text{м}^3$ даёт объем, в этом случае напор определяется по формуле:

$$H = \nabla BB - \nabla HB + \frac{1}{S_{\text{дно_вб}}} (W_{\text{прих}} - W_{\text{микроГЭС}}) - hw = [\text{м}] \quad (5)$$

Полная мощность микроГЭС:

$$N_{\text{микроГЭС}} = 9,81 \cdot Q_{\text{микроГЭС}} \cdot H_{\Gamma} = [\text{кВт}], \quad (6)$$

где H_{Γ} - геометрический напор микроГЭС, который определяется по следующей формуле:

$$H = \nabla BB - \nabla HB + \frac{1}{S_{\text{дно_вб}}} (W_{\text{прих}} - W_{\text{микроГЭС}}) = [\text{м}] \quad (7)$$

Мощность микроГЭС:

$$N_{\text{микроГЭС}} = 9,81 \cdot Q_{\text{микроГЭС}} \cdot H \cdot \eta_{\Gamma A}, [\text{кВт}] \quad (8)$$

где $\eta_{\Gamma A}$ - коэффициент полезного действия гидроагрегата ГЭС, %.

Если микроГЭС пропускает весь проходящий расход через микроГЭС

($Q_{\text{микроГЭС}} = Q_{\text{прих}}$), тогда мощность микроГЭС будет равна:

$$N_{\text{микроГЭС}} = 9,81 \cdot Q_{\text{прих}} \cdot H \cdot \eta_{\Gamma A}, [\text{кВт}] \quad (9)$$

Капитальное вложение для создания микроГЭС на имеющемся затворе ГТС определяется по следующему пути. Такой состав технико-экономической оценки соответствует подходу, использованному для обоснования микроГЭС на затворах гидротехнических сооружений [3] и при разработке программы определения параметров гидроэнергетических установок [2].

$$K_{\text{микроГЭС}} = N_{\text{микроГЭС}} \cdot k_{\text{уд}} = [\text{долл. США}] \quad (10)$$

$k_{\text{уд}}$ - удельное капиталовложение на 1 кВт, $\frac{\text{долл.США}}{\text{кВт}}$.

Ежегодная вырабатываемая электроэнергия микроГЭС. Расчет энергетических и экономических показателей с учетом годовой выработки и срока окупаемости применяется также в методиках технико-экономической оценки гидроэнергетических установок [2, 3, 8].

$$\mathcal{E}_{\text{микроГЭС}} = N_{\text{микроГЭС}} \cdot T = 9,81 \cdot H \cdot \eta_{\Gamma A} \cdot T = [\text{кВт} \cdot \text{час}] \quad (11)$$

T – время использования микроГЭС в течение года.

Эксплуатационные затраты по микроГЭС определяются:

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 = [\text{долл. США}] \quad (12)$$

Z_1 – амортизационные расходы: $Z_1 = 0,029 \cdot K = [\text{долл.США}]$.

Z_2 – ремонтные работы: $Z_2 = 0,03 \cdot K = [\text{долл.США}]$.

Z_3 – годовая заработная плата: $Z_3 = m \cdot Z_{\text{зар}} \cdot 12 = [\text{долл.США}]$.

m – количество работников; $Z_{\text{зар}}$ – месячная заработная плата, долл.США.

Цена выработанной электроэнергии микроГЭС:

$$C = \mathcal{E}_{\text{микроГЭС}} \cdot \beta = [\text{долл.США}]. \quad (13)$$

β – стоимость 1 кВт·час электроэнергии, долл.США/кВт·час.

Экономия топливных ресурсов:

$$P_{\text{топливо}} = \mathcal{E}_{\text{микроГЭС}} \cdot G = [\text{кг.у.т.}], \quad (14)$$

G – удельные расход условного топлива, кг/(кВт·час).

Доход от экономии топливных ресурсов:

$$D_{\text{топливо}} = P_{\text{топливо}} \cdot C_{\text{топливо}} = [\text{долл.США}]. \quad (15)$$

$C_{\text{топливо}}$ – средняя цена 1 кг условного топлива, долл.США/кг.

Чистая прибыль от использования микроГЭС:

$$Ч_{\text{п}} = C + D_{\text{топливо}} - Z = [\text{долл.США}]. \quad (16)$$

Сопоставительный экономический коэффициент эффективности:

$$E = Ч_{\text{п}} / K. \quad (17)$$

Срок окупаемости:

$$T_{\text{ок.}} = 1/E = [\text{год}]. \quad (18)$$

Результаты (Results)

На основе разработанной методики в исходном материале приведены результаты расчета технико-экономических параметров микроГЭС. Расчетная серия включает 16 вариантов. Расход микроГЭС изменяется в зависимости от открытия затвора от 0,5 до 6,2 $\text{м}^3/\text{с}$, а расчетная мощность

— от 12,05 до 98,23 кВт (рис. 3). При этом расчетный напор снижается с 2,89 до 1,90 м (рис. 3). Полученный подход непосредственно соответствует ранее опубликованной методике технико-экономического обоснования микроГЭС на затворах [3] и разработанному программному инструменту определения параметров гидроэнергетических установок [2].

Таблица 1 - Результаты расчета технико-экономического обоснования использования микроГЭС на затворе ГТС
Table 1 – Feasibility study results for the implementation of micro-hydroelectric power plants on hydraulic structure gates

№	H, м	Q, м³/с	N, кВт	K, тыс.\$	Э, кВт·ч	З, тыс.\$	Ц, тыс.\$	Птопл., кг у.т.	Дтопл., тыс.\$	Чп, тыс.\$	Ток, лет
1	2,89	0,5	12,05	20,48	105550,4	4,21	3,17	12929,9	5,17	4,13	4,960
2	2,85	0,8	19,01	32,32	166543,2	4,91	5,00	20401,5	8,16	8,25	3,918
3	2,8	1,2	28,02	47,63	245432,1	5,81	7,36	30065,4	12,03	13,58	3,508
4	2,75	1,6	36,69	62,37	321399,1	6,68	9,64	39371,4	15,75	18,71	3,334
5	2,7	2	45,03	76,55	394444,4	7,52	11,83	48319,4	19,33	23,64	3,237
6	2,65	2,4	53,03	90,16	464567,9	8,32	13,94	56909,6	22,76	28,38	3,177
7	2,58	2,8	60,24	102,40	527679	9,04	15,83	64640,7	25,86	32,64	3,137
8	2,52	3,2	67,24	114,31	589037	9,74	17,67	72157,7	28,86	36,79	3,107
9	2,45	3,6	73,55	125,03	644259,2	10,38	19,33	78921,8	31,57	40,52	3,086
10	2,38	4	79,38	134,95	695390,9	10,96	20,86	85185,4	34,07	43,97	3,069
11	2,33	4,3	83,54	142,02	731840,5	11,38	21,96	89650,5	35,86	46,44	3,058
12	2,3	4,5	86,30	146,72	756018,4	11,66	22,68	92612,3	37,04	48,07	3,052
13	2,25	4,8	90,06	153,09	788888,8	12,03	23,67	96638,9	38,66	50,29	3,044
14	2,17	5,2	94,09	159,96	824242,7	12,44	24,73	100969,7	40,39	52,68	3,036
15	2	5,8	96,73	164,44	847325	12,70	25,42	103797,3	41,52	54,24	3,032
16	1,9	6,2	98,23	166,99	860473,2	12,85	25,81	105408,0	42,16	55,13	3,029

Из таблицы 1 видно, что при увеличении расхода с 0,5 до 6,2 м³/с мощность микроГЭС возрастает с 12,05 до 98,23 кВт (рис. 3). Годовая выработка электроэнергии увеличивается с 105 550,4 до 860 473,2 кВт·ч, а чистая прибыль возрастает с 4,13 до 55,13 тыс.\$, и срок окупаемости уменьшается с 4,960 до 3,029 лет (рис. 4).

В исходном материале также установлена зависимость эксплуатационных затрат, чистой прибыли и срока окупаемости от мощности микроГЭС. С ростом мощности наблюдается увеличение абсолютной чистой прибыли и сокращение периода возврата капитальных вложений (рис. 4).

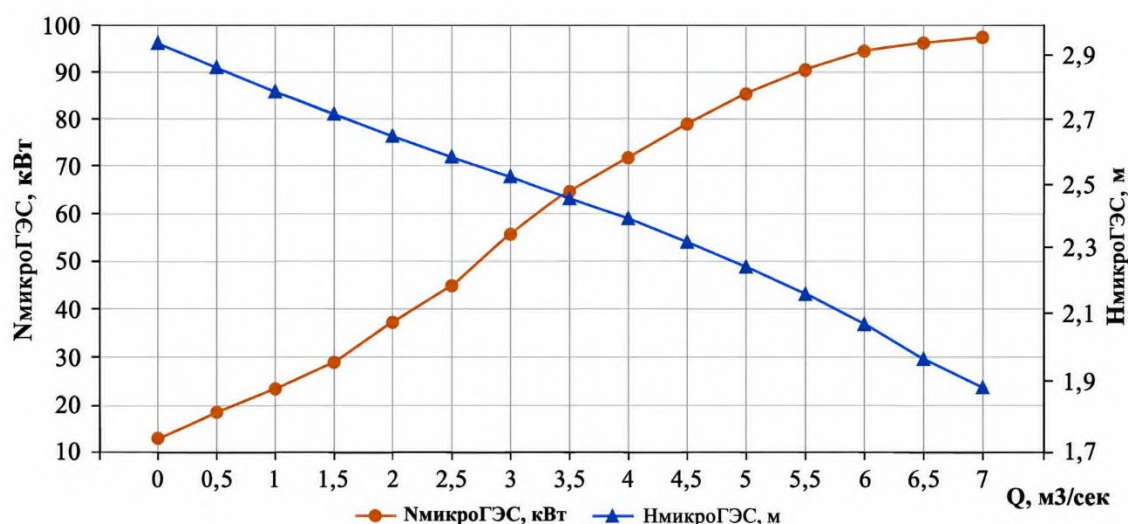


Рисунок 3 - График зависимости напора и мощности микроГЭС от расхода
Figure 3 - Graph of micro-HPP head and power versus flow rate

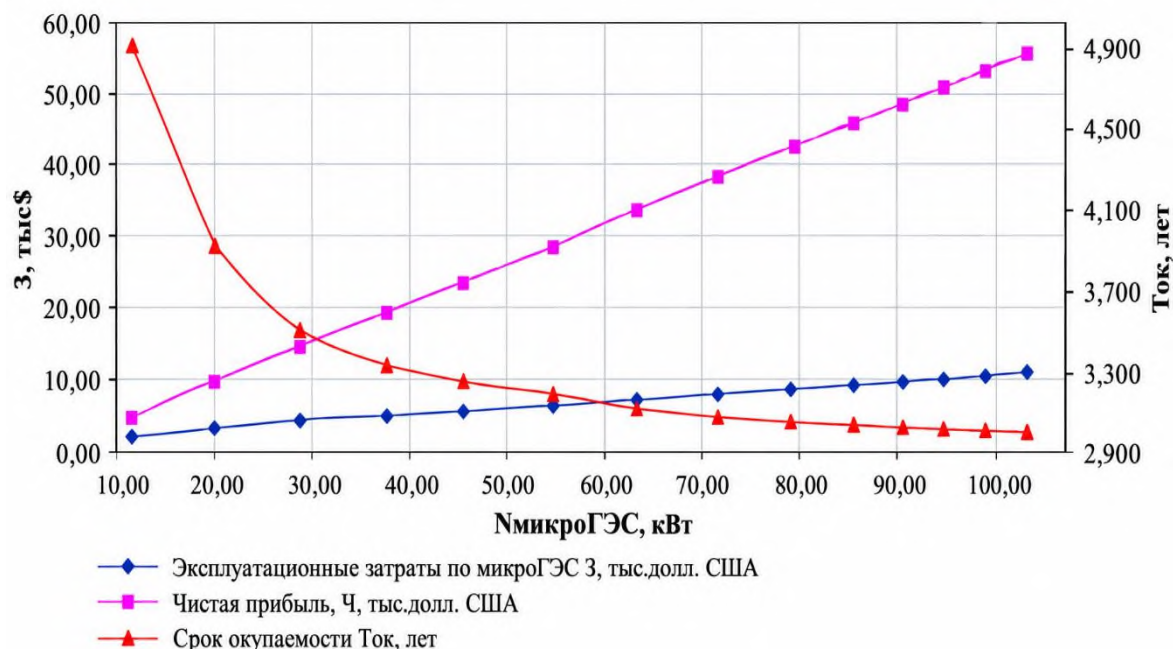


Рисунок 4 - График зависимости чистой прибыли, эксплуатационных затрат и срока окупаемости от мощности микроГЭС

Figure 4 - Graph of net profit, operating expenses, and payback period versus micro-HPP capacity

Обсуждение (Discussions)

Полученные результаты показывают, что размещение микроГЭС непосредственно на затворе гидротехнического сооружения позволяет использовать существующий гидравлический перепад без строительства отдельного крупного гидротехнического комплекса. Такая концепция использования существующей гидравлической инфраструктуры и готового напора рассмотрена в работах [1, 7, 9, 10]. Экономический эффект определяется одновременно расходом воды, доступным напором, КПД гидроагрегата, временем работы и удельными капитальными затратами [3,8].

Для малых расходов экономические показатели менее благоприятны: при мощности 12,05 кВт срок окупаемости составляет 4,960 года. При мощности 98,23 кВт этот показатель снижается до 3,029 года. Таким образом, в рассматриваемой расчетной серии увеличение мощности сопровождается повышением экономической эффективности. Аналогичная зависимость сокращения срока окупаемости при увеличении мощности микроГЭС отмечена в исследовании применения микроГЭС на плоских затворах [10].

Согласно исходному материалу, микроГЭС целесообразно условно разделять на две группы: до 10 кВт и свыше 10 кВт. Установки первой группы могут применяться на малых водотоках с расходом до 1 м³/с, тогда как установки второй группы ориентированы на водотоки с расходом более 1 м³/с. МикроГЭС мощностью свыше 10 кВт могут размещаться на сооружениях с плоскими затворами, включая водозаборные и водопропускные сооружения рек и каналов [10]. Возможность энергетического использования низконапорных и ранее неэнергетических гидротехнических объектов также подтверждается исследованием потенциала водяных мельниц, водосливов и неэнергетических плотин в странах ЕС [6].

При интерпретации результатов следует учитывать, что приведенные экономические значения получены в рамках исходных допущений по стоимости электроэнергии, условного топлива, капитальным и эксплуатационным затратам. Поэтому при проектировании конкретного объекта необходима актуализация этих исходных параметров.

Заключение (Conclusions)

Систематизирована методика технико-экономического обоснования микроГЭС, устанавливаемая на затворе гидротехнического сооружения. Методика объединяет гидравлический

расчет напора и мощности с оценкой годовой выработки электроэнергии и основных экономических показателей.

Для расчетной серии при увеличении расхода от 0,5 до 6,2 м³/с мощность микроГЭС возрастает от 12,05 до 98,23 кВт, а срок окупаемости снижается от 4,960 до 3,029 лет. Это подтверждает наличие положительной зависимости экономической эффективности от увеличения мощности в рассмотренном диапазоне.

Энергетический потенциал гидротехнических затворов водозаборных, водовыпускных и водопропускных сооружений малых и средних водотоков может быть использован для повышения энергообеспечения хозяйственных объектов, энергоресурсосбережения и рационального использования водной энергии. Такой подход соответствует ранее предложенным решениям по использованию микроГЭС с существующими гидросистемами и новым конструкциям затворов [1, 7, 9, 10].

Палуанов Д. Т. — доктор технических наук, профессор кафедры «Гидроэнергетика и гидравлика» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова.

Литература

1. Мухаммадиев, М.М. Техничко-экономическое обоснование использования микрогидроэлектростанций на затворах гидротехнического сооружения / М.М. Мухаммадиев, К.С. Джураев, Абдурауф Абдуазиз уулу, Б.Б. Махмарасулов // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – 2021. – № 4. – Ташкент. – С. 334–339.
2. Мухаммадиев, М.М. Исследование скорости потока воды в затворах гидроэнергетических и ирригационных сооружений / М.М. Мухаммадиев, Ш. Клычев, К.С. Джураев // Вестник СГАСУ: Градостроительство и архитектура. – 2016. – Вып. № 2.
3. Punys, P. An Assessment of Micro-hydropower Potential at Historic Watermill, Weir, and Non-powered Dam Sites in Selected EU Countries / P. Punys, A. Kvaraciejus, A. Dumbrasukas, L. Šilinis, B. Popa // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 133. – April.
4. Кодиров, Д.Б. Разработка опытного образца микрогидроэлектростанции / Д.Б. Кодиров, Г.А. Кушаков, У.Б. Худойбердиев // V Международная научно-практическая онлайн-конференция «Энерго- и ресурсосберегающие технологии: опыт и перспективы». – Кызылорда: КУ им. Коркыт Ата, 2023. – С. 8–13.
5. Kodirov, D. Effective Use of Electrical Energy in Hydro Station / D. Kodirov, G. Kushakov, U. Xudoyberdiyev // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 10, Issue 7. – P. 135–142.
6. Укрепительная цементация оснований плотин в гидротехнических сооружениях / А.Д. Ятимов, Н.М. Хасанов, Ф.А. Холов, М.Н. Хасанов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 1 (61). – С. 176–182. – EDN: LDLVEE.
7. Bokiev, A. Determination of Energetic Parameters of Garland Mobile Micro-hydro Power Plant for Mountain Areas / A. Bokiev, S. Sultonov // Journal of Electrical and Electronics Engineering (JEEE). – India, 2023. – Vol. 13, Issue 2.
8. Bokiev, A. Design of Mobile Electricity Based on Solar and Garland Micro Hydro Power Plant for Power Supply in Namangan Region Mountain Areas / A. Bokiev, S. Sultonov, N. Nuralieva, A. Botirov // E3S Web of Conferences. – Tashkent, 2023. – Vol. 365. – Art. 04003. – DOI: 10.1051/e3sconf/202336504003.
9. Палуанов, Д.Т. Установление критериев безопасности длительно эксплуатируемых каналов / Д.Т. Палуанов, Д.А. Маматкулов, С.Ф. Саидов, Ж. Ахмедов // Неделя науки Инженерно-строительного института: материалы конференции. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025. – С. 373–376.
10. Развитие генерирующих мощностей – ТЭС, АЭС, ВИЭ – основополагающие в развитии электроэнергетики Узбекистана: материалы круглого стола с участием экспертов при Агентстве информации и массовых коммуникаций при Администрации Президента Республики Узбекистан, 28 июня 2019 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xs.uz/ru/post/razvitie-generiruyuschiikh-moschnostej-tes-aes-vie-osnovopolagayuschie-v-razvitii-v-elektroenergetiki-uzbekistana>.
11. Маматкулов, Д.А. Разработка измерительных систем для контроля и управления расходом воды в каналах / Д.А. Маматкулов, А.К. Мамбетов // Цифровая промышленность и автоматизация: инновационные решения в технологических процессах и системах управления производством: сборник материалов Республиканской научно-практической конференции, Каршинский государственный технический университет, 18–19 апреля 2025 г. – 2025. – С. 172–176.

Reference

1. Mukhammadiev, M.M. Technical and Economic Justification of the Use of Micro-Hydroelectric Power Plants at Hydraulic Structure Gates / M.M. Mukhammadiev, K.S. Dzhuraev, Abdurauf Abduaziz uulu, B.B. Makhmarasulov // Problems of Energy and Resource Conservation. – 2021. – No. 4. – Tashkent. – P. 334–339. [in Russian].

2. Mukhammadiev, M.M. Investigation of Water Flow Velocity in Gates of Hydropower and Irrigation Structures / M.M. Mukhammadiev, Sh. Klychev, K.S. Dzhuraev // Bulletin of SGASU: Urban Planning and Architecture. – 2016. – Issue No. 2. [in Russian].
3. Punys, P. An Assessment of Micro-hydropower Potential at Historic Watermill, Weir, and Non-powered Dam Sites in Selected EU Countries / P. Punys, A. Kvaraciejus, A. Dumbrasukas, L. Šilinis, B. Popa // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 133. – April.
4. Kodirov, D.B. Development of a Prototype Micro-Hydroelectric Power Plant / D.B. Kodirov, G.A. Kushakov, U.B. Khudoyberdiyev // Proceedings of the V International Scientific and Practical Online Conference “Energy- and Resource-Saving Technologies: Experience and Prospects”. – Kyzylorda: Korkyt Ata Kyzylorda University, 2023. – P. 8–13. [in Russian].
5. Kodirov, D. Effective Use of Electrical Energy in Hydro Station / D. Kodirov, G. Kushakov, U. Xudoyberdiyev // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 10, Issue 7. – P. 135–142.
6. Strengthening Grouting of Dam Foundations in Hydraulic Structures / A.D. Yatimov, N.M. Khasanov, F.A. Kholov, M.N. Khasanov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2023. – No. 1 (61). – P. 176–182. – EDN: LDLVEE. [in Russian].
7. Bokiev, A. Determination of Energetic Parameters of Garland Mobile Micro-hydro Power Plant for Mountain Areas / A. Bokiev, S. Sultonov // Journal of Electrical and Electronics Engineering (JEEE). – India, 2023. – Vol. 13, Issue 2.
8. Bokiev, A. Design of Mobile Electricity Based on Solar and Garland Micro Hydro Power Plant for Power Supply in Namangan Region Mountain Areas / A. Bokiev, S. Sultonov, N. Nuralieva, A. Botirov // E3S Web of Conferences. – Tashkent, 2023. – Vol. 365. – Art. 04003. – DOI: 10.1051/e3sconf/202336504003.
9. Paluanov, D.T. Establishment of Safety Criteria for Long-Term Operated Canals / D.T. Paluanov, D.A. Mamatkulov, S.F. Saidov, Zh. Akhmedov // Science Week of the Institute of Civil Engineering: Proceedings of the Conference. – St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025. – P. 373–376. [in Russian].
10. Development of Generating Capacities – Thermal Power Plants, Nuclear Power Plants, and Renewable Energy Sources – as Fundamental Factors in the Development of the Electric Power Industry of Uzbekistan: Proceedings of the Round Table with the Participation of Experts at the Agency of Information and Mass Communications under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan, June 28, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://xs.uz/ru/post/razvitie-generiruyuschikh-moschnostej-tes-aes-vie-osnovopolagayuschie-v-razvitii-v-elektroenergetiki-uzbekistana> (Accessed: 08.10.2026). [in Russian].
11. Mamatkulov, D.A. Development of Measurement Systems for Monitoring and Controlling Water Flow in Canals / D.A. Mamatkulov, A.K. Mambetov // Digital Industry and Automation: Innovative Solutions in Technological Processes and Production Control Systems: Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference, Karshi State Technical University, April 18–19, 2025. – 2025. – P. 172–176. [in Russian].

Сведения об авторах:

Мухаммадиев Мурадулла Мухаммадиевич, доктор технических наук, профессор, ТашГТУ имени Ислама Каримова. ORCID Id 0009-0007-5636-7337, E.mail: muradgidro@gmail.com, muhammadiev_m@rambler.ru

Джураев Курбон Салихджанович, PhD, доцент, ТашГТУ имени Ислама Каримова. ORCID Id 0000-0003-4294-2891, E.mail: DjQS1983@gmail.com

Маматкулов Дилмурат Абдуганиевич, доцент, ТашГТУ имени Ислама Каримова. ORCID Id 0009-0005-8899-2044, dmamatkulov0985@gmail.com

Хасанзода Нурали Мамед, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6718-6693>. E-mail: khasanov.nurali@mail.ru

Маълумот оид ба муаллифон:

Мухаммадиев Мурадулла Мухаммадиевич, доктори илмҳои техники, профессор, Донишгоҳи давлатии техники Тошканд ба номи Исмоил Каримов. ORCID Id 0009-0007-5636-7337, E.mail: muradgidro@gmail.com, muhammadiev_m@rambler.ru

Джураев Курбон Салихджанович, PhD, дотсент, Донишгоҳи давлатии техники Тошканд ба номи Исмоил Каримов. ORCID Id 0000-0003-4294-2891, E.mail: DjQS1983@gmail.com

Маматкулов Дилмурат Абдуганиевич, дотсент, Донишгоҳи давлатии техники Тошканд ба номи Исмоил Каримов. ORCID Id 0009-0005-8899-2044, dmamatkulov0985@gmail.com

Хасанзода Нуралӣ Мамед, доктори илмҳои техники, профессор, профессори кафедраи асосҳо, таҳкурсиҳо ва иншоотҳои зеризаминӣ, Донишгоҳи техники Тоҷикистон ба номи академик М.С.Осимӣ. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6718-6693>. E-mail: khasanov.nurali@mail.ru

Information about the authors:

Muradulla Mukhammadievich Mukhammadiev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Islam Karimov Tashkent State Technical University. ORCID Id 0009-0007-5636-7337, E.mail: muradgidro@gmail.com, muhammadiev_m@rambler.ru

Kurban Salikhjanovich Juraev, PhD, Associate Professor, Islam Karimov Tashkent State Technical University. ORCID Id 0000-0003-4294-2891, E.mail: DjQS1983@gmail.com

Dilmurat Abduganievich Mamatkulov, Associate Professor, Islam Karimov Tashkent State Technical University. ORCID Id 0009-0005-8899-2044, dmamatkulov0985@gmail.com

Hasanzoda Nuraly Mamed, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor in the Department of Soil Mechanics, Foundations, and Underground Structures at the Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6718-6693>. E-mail: khasanov.nurali@mail.ru

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приложение 1
к Положению о научном журнале
"Политехнический вестник"

**ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ
статей в журнал "Политехнический вестник"**

1. В журнале публикуются статьи научно-практического и проблемного характера, представляющие собой результаты завершённых исследований, обладающие научной новизной и представляющие интерес для широкого круга читателей журнала.

2. Основные требования к статьям, представляемым для публикации в журнале:

- статья (за исключением обзоров) должна содержать новые научные результаты;
- статья должна соответствовать тематике и научному уровню журнала;
- статья должна быть оформлена в полном соответствии с требованиями к оформлению статей (см. пункт 5).

3. Статья представляется в редакцию по электронной почте и в одном экземпляре на бумаге, к которому необходимо приложить электронный носитель текста, идентичного напечатанному, а также две рецензии на статью и справку о результате проверки на оригинальность.

4. Структура статьи

Текст статьи должен быть представлен в формате IMRAD² на таджикском, английском или русском языке:

ВВЕДЕНИЕ (Introduction)	Почему проведено исследование? Что было исследовано, или цель исследования, какие гипотезы проверены? Включает: актуальность темы исследования, обзор литературы по теме исследования, постановку проблемы исследования, формулирование цели и задач исследования.
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ (MATERIALS AND METHODS)	Когда, где и как были проведены исследования? Какие материалы были использованы или кто был включен в выборку? Детально описывают методы и схему экспериментов/наблюдений, позволяющие воспроизвести их результаты, пользуясь только текстом статьи. Описывают материалы, приборы, оборудование и другие условия проведения экспериментов/наблюдений.
РЕЗУЛЬТАТЫ (RESULTS)	Какой ответ был найден. Верно ли была протестирована гипотеза? Представляют фактические результаты исследования (текст, таблицы, графики, диаграммы, уравнения, фотографии, рисунки).
ОБСУЖДЕНИЕ (DISCUSSION)	Что подразумевает ответ и почему это имеет значение? Как это вписывается в то, что нашли другие исследователи? Каковы перспективы для будущих исследований? Содержит интерпретацию полученных результатов исследования, включая: соответствие полученных результатов гипотезе исследования; ограничения исследования и обобщения его результатов; предложения по практическому применению; предложения по направлению будущих исследований.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ (CONCLUSION)	Содержит краткие итоги разделов статьи без повторения формулировок, приведенных в них.
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (REFERENCES)	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (см. п.3).
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ (AUTHORS' BACKGROUND)	оформляется в конце статьи в следующем виде:

² Данный термин составлен из первых букв английских слов: Introduction (Введение), Materials and Methods (Материалы и методы), Results (Результаты) Acknowledgements and Discussion (Обсуждение). Это самый распространенный стиль оформления научных статей, в том числе для журналов Scopus и Web of Science.

Ному насаб, ФИО, Name

Дараҷа ва унвони илмӣ, Степень и должность,

Title³

Ташкилот, Организация, Organization

e-mail

ORCID⁴ Id

Телефон

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ (CONFLICT OF INTEREST)	Конфликт интересов — это любые отношения или сферы интересов, которые могли бы прямо или косвенно повлиять на вашу работу или сделать её предвзятой. Пример: 1. Конфликт интересов: Автор Х.Х.Х. Владеет акциями Компании Y, которая упомянута в статье. Автор Y.Y.Y. – член комитета XXXX. 2. Если конфликта интересов нет, авторы должны заявить: Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ (AUTHOR CONTRIBUTIONS).	Публикуется для определения вклада каждого автора в исследование. Описание, как именно каждый автор участвовал в работе (предпочтительно), или сообщение о вкладах авторов в процентах или долях (менее желательно). Пример данного раздела: 1. Авторы A1, A2 и A3 придумали и разработали эксперимент, авторы A4 и A5 провели теоретические исследование. Авторы A1 и A6 участвовали в обработке данных. Авторы A1, A2 и A5 участвовали в написании текста статьи. Все авторы участвовали в обсуждении результатов. 2. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации
ДОПОЛНИТЕЛЬНО (по желанию автора)	
БЛАГОДАРНОСТИ (опционально) - ACKNOWLEDGEMENT (optional)	Если авторы в конце статьи выражают благодарность или указывают источник финансовой поддержки при выполнении научной работы, то необходимо эту информацию продублировать на английском языке.
ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ (FUNDING)	Информация о грантах и любой другой финансовой поддержке исследований. Просим не использовать в этом разделе сокращенные названия институтов и спонсирующих организаций.
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ (ADDITIONAL INFORMATION)	В этом разделе могут быть помещены: Нестандартные ссылки. Например, материалы, которые по каким-то причинам не могут быть опубликованы, но могут быть предоставлены авторами по запросу. Дополнительные ссылки на профили авторов (например, ORCID). Названия торговых марок на иностранных языках, которые необходимы для понимания статьи или ссылки на них. Особые сообщения об источнике оригинала статьи (если статья публикуется в переводе). Информация о связанных со статьей, но не опубликованных ранее докладах на конференциях и семинарах.

5. Требования к оформлению статей

³ Title can be chosen from: master student, Phd candidate, assistant professor, senior lecture, associate professor, full professor

⁴ ORCID или Open Researcher and Contributor ID (Открытый идентификатор исследователя и участника) — незапатентованный буквенно-цифровой код, который однозначно идентифицирует научных авторов. www.orcid.org.

Рекомендуемый объем оригинальной статьи – до 10 страниц, обзора – до 15 страниц, включая рисунки, таблицы, библиографический список. В рубрику «Краткие сообщения» принимаются статьи объемом не более 3 страниц, включая 1 таблицу и 2 рисунка.

Рекомендации по набору и оформлению текста

Наименование	Требования	Примечания
Формат страницы	A4	
Параметры страницы и абзаца	отступы сверху и снизу - 2.5 см; слева и справа - 2 см; табуляция - 2 см;	ориентация - книжная
Редактор текста	Microsoft Office Word	
Шрифт	Times New Roman, 12 пунктов	
межстрочный интервал	Одинарный, выравнивание по ширине	Не использовать более одного пробела между словами, пробелы для выравнивания, автоматический запрет переносов, подчеркивания.
Единица измерения	Международная система единиц СИ	
Сокращения терминов и названий	В соответствии с ГОСТ 7.12-93.	должны быть сведены к минимуму
Формулы	Математические формулы следует набирать в формульном редакторе MathTypes Equation или MS Equation, греческие и русские буквы в формулах набирать прямым шрифтом (опция текст), латинские курсивом. Формулы и уравнения печатаются с новой строки и центрируются.	Обозначения величин и простые формулы в тексте и таблицах набирать как элементы текста (а не как объекты формульного редактора). Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в последующем изложении. Нумерация формул сквозная. Повторение одних и тех же данных в тексте, таблицах и рисунках недопустимо
Таблицы	При создании таблиц рекомендуется использовать возможности MS Word (Таблица – Добавить таблицу) или MS Excel. Таблицы должны иметь порядковые номера, название и ссылку в тексте. Таблицу следует располагать в тексте после первого упоминания о ней. Интервал между строчками в таблице можно уменьшать до одинарного, размер шрифта – до 9 пунктов.	Внутри таблицы заголовки пишутся с заглавной буквы, подзаголовки – со строчной, если они составляют одно предложение с заголовком. Заголовки центрируются. Боковые – по центру или слева. Диагональное деление ячеек не рекомендуется. В пустой ячейке обязателен прочерк (тире –). Количество знаков после запятой (точность измерения) должно быть одинаковым.
Рисунки (иллюстрации, графики, диаграммы, схемы)	Должны иметь сквозную нумерацию, название и ссылку в тексте, которую следует располагать в тексте после первого упоминания о рисунке. Рисунки должны иметь расширение, совместимое с MS Word (*JPEG, *BIF, *TIFF (толщина линий не менее 3 пкс) Фотографии должны быть предельно четкими, с разрешением 300 dpi. Максимальный размер рисунка: ширина 150 мм, высота 245 мм. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись, в которой дается объяснение всех его элементов. Кривые на рисунках нумеруются арабскими цифрами и комментируются в подписях к рисункам.	Заголовки таблиц и подрисуночные подписи должны быть по возможности лаконичными, а также точно отражающими смысл содержания таблиц и рисунков. Все буквенные обозначения на рисунках необходимо пояснить в основном или подрисуночном текстах. Все надписи на рисунках (наименования осей, цифры на осях, значки точек и комментарии к ним и проч.) должны быть выполнены достаточно крупно, одинаковым шрифтом, чтобы они легко читались при воспроизведении на печати. Наименования осей, единицы измерения физических величин и прочие надписи должны быть выполнены на русском языке. Не допускается наличие рамок вокруг и внутри графиков и диаграмм. Каждый график, диаграмма или схема вставляется в текст как объект MS Excel.

Рукопись должна быть построена следующим образом:

Раздел	Содержание (пример)	Расположение
Индекс УДК ⁵	УДК 62.214.4; 621.791.05	в верхнем левом углу полужирными буквами
Заголовок	НАЗВАНИЕ СТАТЬИ (должен быть информативным и, по возможности, кратким) (на языке оригинала статьи)	В центре полужирными буквами
Авторы	Инициалы и фамилии авторов (на языке оригинала статьи)	В центре полужирными буквами
Организация	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	В центре полужирными буквами
Реферат (аннотация)	Должен быть информативным и на языке оригинала статьи (таджикском, русском и английском), содержать 800-1200 печатных знаков (120-200 слов). Структура реферата: Введение. Материалы и методы исследования. Результаты исследования. Заключение.	Выровнять по ширине
Ключевые слова	5-6, разделены между собой « , ». (на языке оригинала статьи) Пример: энергосбережение, производство корунда, глинозем, энергопотребление, оптимизация	Выровнять по ширине
На двух других языках приводится: Заголовок Авторы Организация Реферат (аннотация)	перевод названия статьи, авторов ⁶ , организации ⁷ , заголовки и реферат ⁸ и ключевые слова ⁹ на двух других языках	
Статья согласно структуры	Согласно требованиям пункта 4 требования и условия предоставления статей в журнал "Политехнический вестник"	Выровнять по ширине

К статье прилагается (см. <http://vp-es.ttu.tj/>):

1. Сопроводительное письмо (приложение 1А).
2. Авторское заявление (приложение 1Б).
3. Лицензионный договор (приложение 1В).
4. Экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати (приложение 1Г).
5. Рецензия (приложение 1Д).

⁵ Универсальная десятичная классификация (УДК) — система классификации информации, широко используется во всём мире для систематизации произведений науки, литературы и искусства, периодической печати, различных видов документов и организации картотек. Межгосударственный стандарт ГОСТ 7.90—2007. Пример: <https://www.teacode.com/online/udc/>

⁶ В английском переводе фамилии авторов статей представляются согласно системе транслитерации BSI (British Standard Institute). Стандарт BSI обычно применяется в случае, когда требуется корректная транслитерация букв, слов и предложений из кириллического алфавита в латинский в случае оформления библиографических списков с официальным статусом. Им пользуются для того, чтобы попасть в зарубежные базы данных.

⁷ Название организации в английском переводе должно соответствовать официальному, указанному на сайте организации. Непереводимые на английский язык наименования организаций даются в транслитерированном варианте.

⁸ Необходимо использовать правила написания организаций на английском языке: все значимые слова (кроме артиклей и предлогов) должны начинаться с прописной буквы. Совершенно не допускается написание одних смысловых слов с прописной буквы, других — со строчной.

⁹ В английском переводе ключевых слов не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводимых названий собственных имен, приборов и др. объектов, имеющих собственные названия; также не должен использоваться непереводимый сленг, известный только ограниченному кругу специалистов.

Мухаррири матни русӣ:	М.М. Якубова
Мухаррири матни тоҷикӣ:	Муаллифон
Мухаррири матни англисӣ:	М.М. Бобоева
Ороиши компютерӣ ва тарроҳӣ:	М.А. Иззатуллоев
Редактор русского текста:	М.М. Якубова
Редактор таджикского текста:	Авторская редакция
Редактор английского текста:	М.М. Бобоева
Компьютерный дизайн и верстка:	М.А. Иззатуллоев

Нишонӣ: ш. Душанбе, хиёбони акад. Раҷабовҳо, 10^А
Адрес: г. Душанбе, проспект акад. Ражабовых, 10^А

Ба чоп 28.09.2026 имзо шуд. Ба матбаа 30.09.2026 супорида шуд.
Чопи офсетӣ. Қоғози офсет. Андозаи 60x84 1/8
Адади нашр 50 нусха.

Матбааи Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ
ш. Душанбе, кӯчаи акад. Раҷабовҳо, 10^А