

ENGINEER



international scientific journal

SPECIAL ISSUE

E-ISSN

3030-3893

ISSN

3060-5172



SLIB.UZ
Scientific library of Uzbekistan



A bridge between science and innovation



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



ENGINEER

A bridge between science and innovation

E-ISSN: 3030-3893

ISSN: 3060-5172

SPECIAL ISSUE

27-june, 2026



engineer.tstu.uz

**TEXNIKA FANLARI DOKTORI, PROFESSOR
MIRAXMEDOV MAXAMADJON MIRAXMEDOVICH
TAVALLUDINING 80 YILLIGIGA BAG'ISHLANGAN
“SAMARALI QURILISH MATERIALLARI, KONSTRUKSIYALARI VA
TEKNOLOGIYALARI”
MAVZUSIDAGI XALQARO ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI
ILMIY ISHLARI TO'PLAMI**

Toshkent davlat transport universiteti RAASN akademigi, O'zbekistonda xizmat ko'rsatgan yoshlar murabbiyi, texnika fanlari doktori, professor Miraxmedov Maxamadjon Miraxmedovich tavalludining 80 yilligiga bag'ishlangan, ilmiy ishlar to'plami nashr etilishi ko'zda tutilgan «Samarali qurilish materiallari, konstruksiyalari va texnologiyalari» mavzusidagi Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyani o'tkazishni rejalashtirmoqda.

M.M. Miraxmedov kompozitsion qurilish materiallarining polistruktura nazariyasini rivojlantirishga salmoqli hissa qo'shgan. Uning qurilish materialshunosligi sohasidagi ilmiy hissi e'tirofi sifatida 1995-yilda Rossiya arxitektura va qurilish fanlari akademiyasining (RAASN) xorijiy a'zosi etib saylangan. M.M. Miraxmedov 6 ta monografiya, 200 dan ortiq ilmiy maqolalar va 25 ta ixtiroga mualliflik guvohnomalari muallifidir.

Ushbu konferensiyaning asosiy maqsadi - qurilish materialshunosligi, bino va inshootlarni loyihalash va qurilish sohasidagi ilmiy tadqiqotlar natijalarini, shuningdek, muhandislik ta'limini takomillashtirish yo'llarini muhokama qilishdan iborat.

Konferensiya ishida ishtirok etish uchun oliy o'quv yurtlari va ilmiy tadqiqot institutlari olimlari, O'zbekiston Respublikasi va xorijiy davlatlarning ishlab chiqarish vakillari, ilmiy tadqiqotlarda salmoqli natijalarga ega bo'lgan mutaxassislar taklif etiladi.

“Samarali qurilish materiallari, konstruksiyalari va texnologiyalari” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyaning asosiy yo'nalishlari quyidagilardan iborat:

1. Resurs va energiya tejovchi qurilish materiallari va texnologiyalari.
2. Atrof-muhitning transport infratuzilmasiga ta'siri va uni himoya qilish usullari.
3. Bino va inshootlarning qurilish konstruksiyalari: hisoblash va loyihalashning zamonaviy usullari.
4. Arxitektura, shaharsozlik va shahar muhitini rivojlantirish.
5. Qurilishni tashkil etishning innovatsion usullari va qurilish jarayonlari texnologiyalari.
6. Transport obyektlarini loyihalash va qurishda raqamli texnologiyalar hamda sun'iy intellekt.
7. Temir yo'l transporti infratuzilmasi obyektlarini loyihalash, qurish va ekspluatatsiya qilish.
8. Zamonaviy muhandislik ta'limi tizimini takomillashtirish.

Mazkur konferensiya ilmiy hamjamiyatning turli vakillarini bir joyga jamlab, qurilish materialshunosligi sohasidagi zamonaviy muammolar va istiqbollarni muhokama qilish uchun qulay platforma vazifasini bajardi.

**TEXNIKA FANLARI DOKTORI, PROFESSOR
MIRAXMEDOV MAXAMADJON MIRAXMEDOVICH
TAVALLUDINING 80 YILLIGIGA BAG'ISHLANGAN "SAMARALI
QURILISH MATERIALLARI, KONSTRUKSIYALARI VA
TEXNOLOGIYALARI" MAVZUSIDAGI XALQARO ILMIY-AMALIY
KONFERENSIYA
TASHKILYI QO'MITASI**

Adilxodjayev Anvar Ishanovich	Universitetdagi istiqbolli va strategik vazifalarni amalga oshirish masalalari bo'yicha rektor maslahatchisi;
Shaumarov Said Sanatovich	Ilmiy ishlar va innovatsiyalar bo'yicha prorektor;
Muxammadiyev Ne'matjon Raxmatovich	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini mudiri;
Babayev Asqar Ruzibadalovich Shipacheva Yelena Vladimirovna	Qurilish muhandisligi fakulteti dekani; Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini professori, t.f.d. professor;
Maxamataliyev Irkin Muminovich	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini professori, DSc, professor;
Pirmatov Raxmatilla Xamidullayevich	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini professori, t.f.n. professor;
Soy Vladimir Mixaylovich	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini professori, t.f.d. professor;
Narov Rustam Alixanovich	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini professori, t.f.n. professor;
Shoumarov Nigmat Baxramovich	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini professori, t.f.n. professor;
Turgunbayev Urinbek Jamalovich	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini dotsenti, t.f.n. dotsent;
Bocharova Larisa Vasilevna	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini dotsenti, t.f.n. dotsent;
Karimova Feruza Fuzailovna	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini dotsenti, t.f.n. dotsent;
Sharipova Dilafuz Taufukovna	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini dotsenti, PhD, dotsent;
Kandaxarov Sanjar Ishratovich	Ilmiy-innovatsion va loyiha-konstruktorlik bo'limi boshlig'i, PhD, dotsent;
Abdullayev Ulug'bek Xakimovich	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini dotsenti, PhD, dotsent;
Abdullayeva Djamilya Fazilidinovna	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini dotsent v.b., PhD;
Kaxarov Erkin Vasidovich	Bino va sanoat inshootlari qurilishi kafedrasini katta o'qituvchisi;
Kodirov Nodirbek Baxtiyorovich	Temir yo'l muhandisligi kafedrasini dotsent v.b., PhD.

SO‘Z BOSHI

**TEXNIKA FANLARI DOKTORI,
PROFESSOR
MIRAXMEDOV MAXAMADJON
(16 iyun 1946 y. – 26 iyun 2021 y.)**

Miraxmedov Maxamadjon aka 1946-yil 16 iyun kuni O‘zbekiston SSR Andijon oblastining Leninsk (hozirgi Asaka) shahrida tavallud topgan. Maxamadjon aka 1954-yildan 1962-yilgacha Asakadagi 2-sonli sakkiz yillik maktabda o‘qigan. Keyin u o‘sha shahardagi 7-maktabga o‘tgan va uni 1964-yilda oltin medal bilan tugatgan. Miraxmedov Maxamadjon 1970-yilda Sankt-Peterburg temir yo‘l muhandislari institutini temir yo‘l qurilishi, yo‘l va yo‘l xo‘jaligi mutaxassisligi bo‘yicha imtiyozli diplom bilan tamomlagan. Toshkent temir yo‘l muhandislari institutida o‘z mehnat faoliyatini 1971-yilda ilmiy xodim sifatida boshlagan. 1975-yildan fan nomzodi dissertatsiyasini yoqlagandan keyin “Qurilish ishlab chiqarish” kafedrasida assistenti, 1977-yildan kafedra dotsenti va 1980-yildan shu kafedra mudiri lavozimlarida ishlagan. 1986-1989-yillarda M.Miraxmedov Sanoat va fuqaro qurilishi

fakulteti dekani lavozimida ishlagan. Iqtidorli yetuk mutaxassis sifatida 1989-2001-yillar mobaynida Gvineya Respublikasining Konakri universitetida xizmat qildi. Chet el xizmat safaridan qaytgach 2002-yil dan M.Miraxmedov Toshkent temir yo‘l muhandislari instituti marketing xizmati va akademik litsey ishlari bo‘yicha prorektori lavozimiga tayinlangan.

M.Miraxmedov 2003-yilda doktorlik dissertatsiyasini muvaffaqiyatli himoya qildi va unga O‘zbekiston Respublikasi Oliy Attestatsiya Komissiyasi qarori bilan texnika fanlari doktori ilmiy darajasi berildi. 2004-yilda professor ilmiy unvoniga sazovor bo‘lgan.

M.Miraxmedov 2004-yildan institutning o‘quv ishlari bo‘yicha prorektori etib tayinlangan. Ushbu lavozimda ishlash davomida M.Miraxmedov institutda mavjud kadrlar tayyorlash tizimining ijobiy jihatlarini saqlab qolgan holda o‘quv jarayoniga ilg‘or, zamonaviy pedagogik texnologiyalarni joriy etish va ta‘lim berish sifatini oshirish hamda institutning moddiy-texnika, o‘quv-laboratoriya bazasi va ilmiy-pedagogik salohiyatini mustahkamlash borasida ijobiy ishlarni amalga oshirgan. Bu davrda institutning xalqaro aloqalari tiklandi va mustahkamlandi. Xorijning yetakchi temir yo‘l oliy ta‘lim muassasalari bilan hamkorlik aloqalari yo‘lga qo‘yildi. Institut ilmiy-pedagogik salohiyatini mustahkamlash va professor-o‘qituvchilar tarkibini yoshartirish maqsadida, institutning talabalari va yosh pedagoglarini xorijning yetakchi oliy ta‘lim muassasalarida o‘qishlarini davom etkazishlari uchun sharoitlar yaratildi.

M. Miraxmedov 2005-2009-yillar mobaynida Toshkent arxitektura-qurilish instituti rektori lavozimida ish faoliyatini davom ettirdi.

2010-yil fevral oyidan boshlab yana Toshkent temir yo‘l muhandislari instituti faoliyat olib borgan.



M.Miraxmedov 3 ta darslik, 20 ta o'quv qo'llanma, shu jumladan 7 ta fransuz tilida, 9 ta o'zbek tilida va qolganlari rus tilida, 3 ta monografiya, 80 dan ortiq ilmiy maqolalar muallifidir. "Toshkent temir yo'l muhandislari axborotlari", "Arxitektura. Qurilish. Dizayn" va "O'zbekiston muhandis konsultantlari" jurnallarini ta'asis etishda qatnashgan.

M.Miraxmedov ko'pgina nufuzli xalqaro ilmiy anjumanlar ishtirokchisi. Jumladan u Polshaning Katovitsa shahrida 2004 va 2012-yillarda o'tkazilgan, Janubiy Koreyaning Seul shahrida 2013 hamda Germaniyaning Veymer shahrida 2006, 2009 va 2012-yillarda, Rossiyaning Moskva va Sankt-Peterburg shaxarlarida 2003-2013 o'tkazilgan xalqaro ilmiy anjumanlarda ishtirok etgan.

Hozirgi kunda M.Miraxmedov temir yo'l qurilishi sohasida faol ishlayotgan olim sifatida nafaqat respublikada balki xorijda ham tanilgan edi. Uning ilmiy tadqiqotlari tabiiy-texnik tizimlarda, shu jumladan temir yo'llarda ekzogen jarayonlarning salbiy ta'sirini kamaytirish masalalariga bag'ishlangan bo'lib, jumladan, ushbu tadqiqotlarda temir yo'llar, avtomobil

yo'llari, quvurlar va kanallarni ko'chki qum-toshlardan muhofaza qilishning texnik va tashkiliy-texnologik yechimlari topilgan. Uning 25 dan ortiq maqolalari Yevropa mamlakatlari, Rossiya va Ukrainaning nufuzli jurnallarida chop etilgan.

Ilmiy faoliyati davomida ustozlar ilmiy maktabi an'alarini davom ettirib, hozirgi zamon temir yo'l qurilishining eng dolzarb muammolari bo'yicha ilmiy tadqiqotlarni yo'lga qo'yish, ularning saviyasini yuqori darajaga ko'tarish uchun tinmay mehnat qilib, ko'plab iqtidorli shogirdlar yetishtirib, mamlakatimizda temir yo'l sohasiga yosh olimlar va pedogog kadrlar tayyorlashning sifatini oshirishga katta hissa qo'shgan.

M.Miraxmedov institut jamoasi orasida o'zining olijanob insoniy xislatlari bilan obro' qozongan edi. U tom ma'nodagi o'zbek ziyolilaridan bo'lib, o'zining yuksak madaniyati, namunali axloqi, o'ziga va boshqalarga ham talabchan va adolatli munosabati bilan ajralib turardi.

**“BINO VA SANOAT INSHOOTLARI
QURILISHI”
KAFEDRASI JAMOASI**



Optimization of Foam Concrete with Fly Ash and Silica Fume for Energy-Efficient Wall Blocks

A. Ilyasov¹^a A. Allamuratov¹^b

¹Karakalpak State University, Nukus, Uzbekistan

Abstract: The article presents a design-screening approach for non-autoclaved foam concrete intended for thermal-insulating and structural-thermal-insulating wall blocks. The proposed mixtures combine Portland cement, fine quartz sand, fly ash, silica fume, a polycarboxylate superplasticizer and preformed foam. The main objective is to obtain a rational balance between dry density, compressive strength, thermal conductivity and water absorption without excessive cement consumption. A five-level density series from D500 to D900 was analyzed. The results show that mixtures in the D650-D750 range provide the most balanced performance: thermal conductivity remains below 0.16 W/(m·K), while the predicted 28-day compressive strength exceeds 3.0 MPa. The paper also proposes an integral score method that can be used for selecting foam concrete compositions for wall products in dry and hot climatic regions.

Keywords: Foam concrete, preformed foam, fly ash, silica fume, thermal conductivity, dry density, lightweight wall blocks, water absorption, energy efficiency

1. INTRODUCTION

Foam concrete is a lightweight cementitious material containing a system of uniformly distributed artificial air pores. Compared with ordinary dense concrete, it has lower dry density, reduced thermal conductivity and improved technological flexibility. These characteristics make it suitable for non-load-bearing wall blocks, monolithic insulation layers, roof screeds and fill materials [1]–[3].

The main difficulty in producing reliable foam concrete is the simultaneous control of pore structure and cement matrix quality. Excessive foam content reduces density and thermal conductivity, but it can also decrease strength and increase shrinkage. On the other hand, increasing cement content improves strength but worsens economic and thermal indicators. Therefore, the development of foam concrete should be based on a multi-criteria balance rather than on a single target parameter.

The use of supplementary cementitious materials is one of the most effective ways to improve this balance. Fly ash contributes to particle packing and later-age pozzolanic hardening, while silica fume fills microvoids and promotes the formation of additional C-S-H phases. In combination with a superplasticizer, these components can reduce water demand and stabilize the cement paste around air pores.

The aim of this article is to develop and evaluate a series of foam concrete mixtures for wall blocks and to determine a rational density interval in which

strength, thermal insulation and moisture resistance are simultaneously acceptable.


2. MATERIALS AND RESEARCH METHODS

The proposed material system includes Portland cement as the main binder, low-calcium fly ash as a mineral filler, silica fume as a highly reactive microfiller, fine quartz sand as a skeletal component, a polycarboxylate superplasticizer and preformed foam prepared from a protein-based foaming agent. Water dosage was selected to maintain paste flowability while minimizing the water-to-binder ratio.

Foam concrete mixtures were designed for five target density grades. The preformed foam was introduced at the final mixing stage in order to reduce mechanical destruction of air cells. The quality of foam was evaluated by foam density, half-life and visual stability. Hardened specimens were assessed by dry density, 28-day compressive strength, water absorption and thermal conductivity.

For comparative selection of the best composition, an integral score was calculated using normalized values of strength, thermal conductivity and water absorption. Higher strength increases the score, whereas higher thermal conductivity and water absorption decrease it. The simplified relation used for screening is expressed as:

^a <https://orcid.org/0000-0001-6973-4545>

^b <https://orcid.org/0009-0003-4421-0691>



$$S = 0.40 \cdot R_s + 0.35 \cdot (1 - \lambda_n) + 0.25 \cdot (1 - W_n) \quad (1)$$

where S is the integral score, R_s is normalized compressive strength, λ_n is normalized thermal conductivity and W_n is normalized water absorption.

Table 1
Proposed mix proportions for foam concrete wall blocks

Mix	Cement	FA/SF	Sand	W/B	Target D
FC-500	270	90/20	120	0.43	D500
FC-600	285	95/25	155	0.41	D600
FC-700	300	100/30	190	0.39	D700
FC-800	320	100/35	225	0.37	D800
FC-900	345	90/40	260	0.35	D900

Note: cement, fly ash (FA), silica fume (SF) and sand are given in kg/m^3 ; W/B is water-to-binder ratio.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The obtained screening results confirm the typical relationship between density and performance of foam concrete. A decrease in density improves thermal insulation but reduces mechanical strength. This trend is caused by the increase in total air volume and the reduction in the solid load-bearing frame of the cement-sand matrix.

The D500 mixture has the lowest thermal conductivity, but its strength is sufficient mainly for insulation products and non-load-bearing fills. Mixtures D600 and D700 demonstrate a more balanced structure because the amount of cementitious matrix is sufficient to form stable interpore partitions, while the pore volume remains high enough to provide thermal efficiency.

Table 2
Screening properties of foam concrete mixtures.

Mix	Density kg/m^3	R28 MPa	λ $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$	Water %	Score
FC-500	515	1.34	0.112	38.5	63
FC-600	605	2.10	0.132	35.1	75
FC-700	695	3.08	0.153	31.7	86
FC-800	805	4.42	0.181	28.9	82

FC-900	910	5.76	0.212	25.3	69
--------	-----	------	-------	------	----

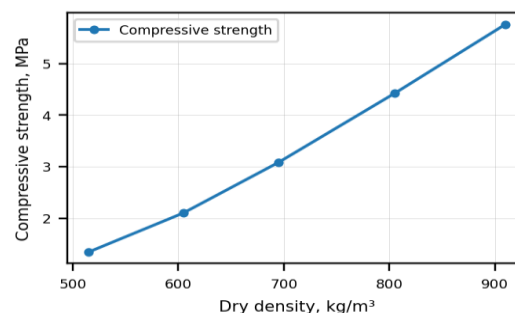


Fig. 1. Relationship between dry density and compressive strength

Figure 1 shows that compressive strength increases almost linearly in the considered density range. This confirms that the load-bearing capacity of foam concrete is mainly controlled by the thickness and continuity of interpore partitions. However, an increase in density above D800 reduces the thermal advantage of the material.

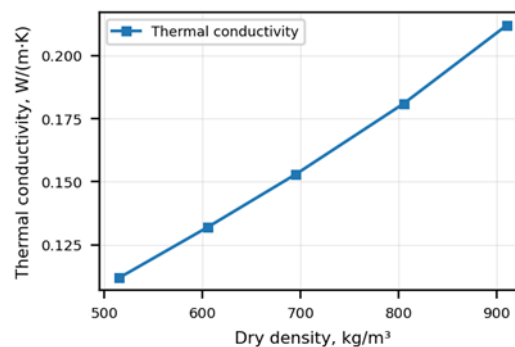


Fig. 2. Relationship between dry density and thermal conductivity

Thermal conductivity also increases with density, because the fraction of solid mineral phases becomes larger and the amount of air-filled pores decreases. For wall products intended to reduce heat losses, the D600-D700 interval is the most promising compromise between insulation and strength.

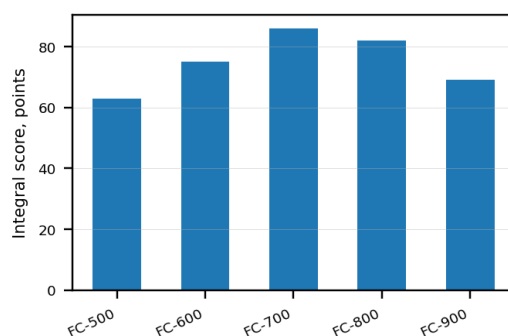


Fig. 3. Integral score of the designed mixtures



The integral score indicates that FC-700 is the most balanced composition. Although FC-800 has higher compressive strength, its thermal conductivity is noticeably higher. FC-500 and FC-600 are useful for insulation layers, whereas FC-700 can be considered for structural-thermal-insulating wall blocks after pilot verification.

Table 3
Recommended application range of selected mixtures

Density grade	Main advantage	Limitation	Recommended use
D500	Lowest λ	Low strength	Roof/floor insulation
D600	Low weight	Medium strength	Non-load walls
D700	Balanced	Needs curing control	Wall blocks
D800	High strength	Higher λ	Partitions/base layers

4. TECHNOLOGICAL RECOMMENDATIONS

The foam should be introduced only after the cementitious slurry reaches stable flowability. Overmixing after foam addition must be avoided because it destroys air cells and causes density deviation. The recommended mixing sequence is: dry blending of cement, fly ash, silica fume and sand; addition of water with superplasticizer; short homogenization; introduction of preformed foam; casting and protected curing.

In hot and dry climates, early moisture loss can cause shrinkage microcracking. Therefore, foam concrete blocks should be protected from wind and direct solar radiation during the first 24-48 hours. Curing under film or in a humid chamber is recommended until sufficient matrix strength is developed.

5. CONCLUSIONS

A five-level density series of foam concrete mixtures with fly ash and silica fume was proposed for energy-efficient wall blocks. The results show that the use of mineral additives and a superplasticizer makes it possible to improve the matrix quality and reduce thermal conductivity while maintaining acceptable strength.

The most rational composition in the screening series is FC-700, which combines a dry density of about 695 kg/m³, compressive strength of 3.08 MPa and thermal conductivity of 0.153 W/(m·K). This

composition can be recommended for further laboratory verification and pilot production of structural-thermal-insulating wall blocks.

The proposed integral score method is convenient for comparing alternative foam concrete compositions because it simultaneously considers strength, thermal performance and water absorption.

REFERENCES

- [1] Ramamurthy K., Nambiar E.K.K., Ranjani G.I.S. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2009;31(6):388-396.
- [2] Nambiar E.K.K., Ramamurthy K. Air-void characterization of foam concrete. *Cement and Concrete Research*. 2007;37(2):221-230.
- [3] Gencil O., et al. A detailed review on foam concrete composites. *Applied Sciences*. 2022;12(11):5752.
- [4] ASTM C796/C796M-19. Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam.
- [5] ASTM C869/C869M-24. Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete.
- [6] Neville A.M. *Properties of Concrete*. 5th ed. Pearson Education, 2011.
- [7] Jones M.R., McCarthy A. Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research*. 2005;57(1):21-31.
- [8] Hamad A.J. Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete: review. *International Journal of Materials Science and Engineering*. 2014;2(2):152-157.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Allanazar Ilyasov Professor, doctor of technical sciences, Karakalpak state university
e-mail: allanazar86@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6973-4545>

Allambergen Allamuratov Assistant, Karakalpak state university
e-mail: allambergen9191@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-4421-0691>



The Effect of Heavy-Duty Pavement Concrete Mix Composition on its Physico-Mechanical Properties

A. Adilkhodjaev¹^a, T. Amirov¹^b

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This article examines the differences in strength and porosity throughout the entire thickness of the upper and lower layers formed by the vibratory compaction of a cement-concrete pavement mixture with a non-optimal composition. Research has also been conducted to determine the effect of the sand content in the aggregate on the physical and mechanical properties of concrete mixtures for roads designed for heavy loads. Based on these studies, recommendations have been developed for optimizing the composition of road concrete and determining the integral service life of cement-concrete road pavements.

Keywords: Optimal composition, delamination, vertical deformation, sand fineness, enriched sand, bulk density, granularity, ease of laying, volume of absorbed air, strength

1. INTRODUCTION

In the Republic of Uzbekistan, economic growth, the development of transport infrastructure, an increase in the intensity of traffic on roads, an increase in the volume of transportation of heavy goods, climate change are the causes of many defects on the roads. In addition to domestic and world experience, according to scientists of the republic, the large-scale use of cement concrete coatings is not only a solution to existing problems, but the use of local materials in the preparation of the mixture serves to save money[1]–[7].

Therefore, many of our highways are being reconstructed, and these roads are being changed from asphalt concrete to cement concrete. This, in turn, creates all-round convenience in the transportation of cargo and passengers. However, the construction of cement concrete roads is a somewhat complicated technological process.[1], [8].

2. THE MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH

Due to the low cost of operation, resistance to many deformations and high loads, resistance to external climatic factors (especially in dry-hot climates), increasing strength over time, high water permeability, cement concrete pavements are preferable to other types of concrete pavements.

As a result of the use of local materials in the design of the optimal composition of concrete, with the use of modern technologies, it is possible to increase the strength of concrete, the necessary mobility of the concrete mixture and the efficiency of concrete (minimum consumption of cement). When choosing the composition of the concrete mixture, it is necessary to correctly estimate the consumption of

cement and take into account several criteria of the water-cement ratio [9-13].

In the dry-hot climatic conditions of Uzbekistan, some disadvantages arose as a result of the use of a non-optimal composition of the road-concrete mixture used in the construction of roads with cement-concrete pavement (Figure 1).

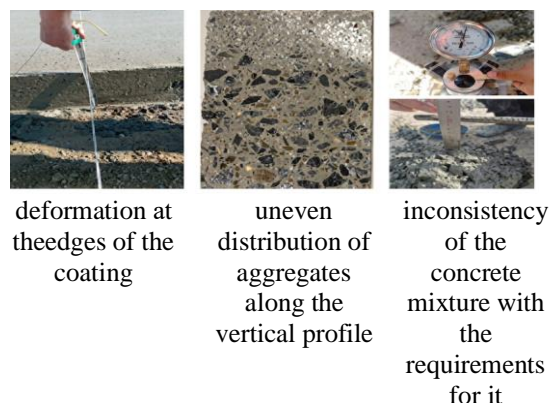


Fig. 1. Some of the disadvantages caused by the use of non-optimally selected concrete mix composition

Concrete that is slipformed to form a stable structure requires small aggregates, especially to fill the voids left by large aggregates [7-8].

If the aggregates contain too many fine particles, the mixture may delaminate due to vibration during paving, which leads to layer of sand and cement on top of the pavement. This layer may lead to cracking within hours of application (plastic shrinkage cracks) and/or possible premature cracking.

According to the results of numerous tests, it can be said that the strength of the upper layer of the concrete pavement can be up to 10% less than the lower layer. In

^a <https://orcid.org/0000-0001-5729-5178>

^b <https://orcid.org/0000-0002-2681-8797>



addition, the micro-porosity of the upper layer increases and becomes prone to destruction.

Fig. 2 and 3 show a comparative histogram of the porosity of samples taken from the upper and lower layers of the cement-concrete pavement and a graph of the distribution of porosity at different sizes.

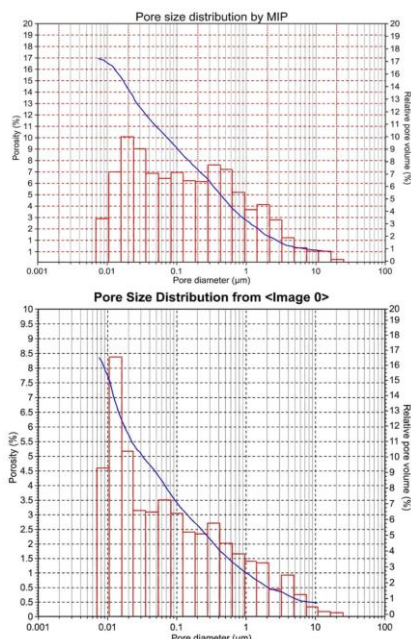


Fig. 2. Comparative histogram of porosity in samples taken from the upper and lower layers of cement-concrete pavement: a) upper layer; b) lower layer

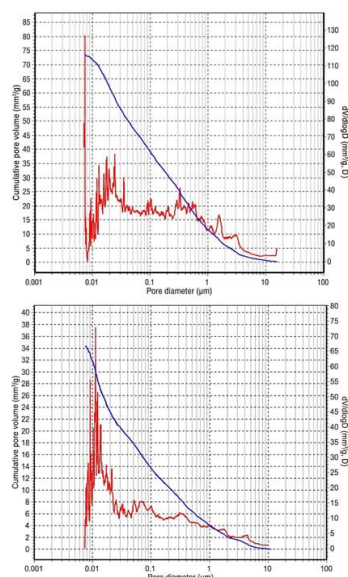


Fig. 3. Distribution graph of pore sizes in samples taken from the upper and lower layers of cement-concrete pavement: a) upper layer; b) lower layer

After the passage of the sliding formwork, stresses and deformations occur in the newly formed concrete slab due to its own weight. This causes the vertical edges and edges of the coating to bleed. The value Δh

and the actual thickness- h of the edges of the newly formed concrete pavement are measured after the spreading of the edges of the slab is completed (Fig. 4). The relative vertical deformation of the edge of the coating [14] is determined by the following formula (1):

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} 100 \quad (1)$$

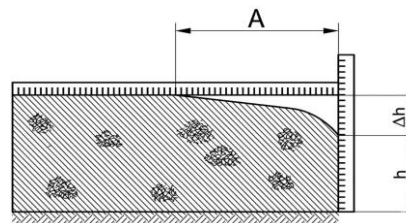


Fig. 4. Scheme for measuring the deformation of the edges of the pavement

These technological properties of the concrete mixture are significantly positively affected by the relative proportion of sand in the aggregates, the fineness of the sand and the amount of entrained air. In addition, with a decrease in the mobility of the concrete mixture and the size of the flint (gravel), the stability of the edges and side faces of the newly formed concrete slab increases. The consumption of the concrete mixture is selected in accordance with the accepted speed of laying the concrete paver.

In Central Asia, for the manufacture of concrete, mainly river, mountain or barren sands are used. The composition of the sand used for concrete must be clean. Dust with clay particles covers the surface of the grains of sand and prevents their adhesion to the cement stone, reduces the strength of concrete [15-17].

3. RESULTS AND DISCUSSION

According to the composition we have chosen, 2 types of sand produced by “POMEGRANATE” LLC and “GRANITE-MINING” LLC were taken as a fine aggregate. Although these sands meet the requirements of GOST 8736-2014 and GOST 31424-2010 in certain parameters, they do not meet the requirements of GOST 26633-2012. Therefore, by mixing these sands in a certain amount, sand was created that meets the requirements of GOST 26633-2015 [18-20].

When used as a cement concrete filler, sand must comply with the requirements of GOST 26633-2015 (Fig. 5).

When checking the properties of sand obtained by mixing both sands in an amount of 60/40%, the test results showed that the sand meets the requirements of GOST 26633-2015 for fine aggregates for cement concrete (Fig. 5).



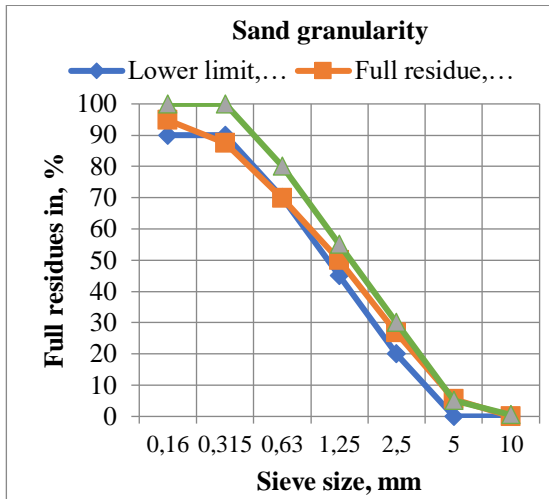


Fig. 5. Grain composition of enriched sand according to GOST 26633-2015

As can be seen from the graph, some fractions of the enriched sand do not meet the requirements of GOST 26633-2015, but since the composition was selected on the basis of this enriched sand and laboratory tests were carried out, the concrete samples showed the required strength results and did not significantly affect the properties of the mixture.

Crushed stone is used as a coarse aggregate for the preparation of road-concrete mix. Crushed stone is mined in the mountains and by crushing stones formed as a result of natural weathering of hard rocks. The surface is sharp, jagged, and usually contains a mixture of sand, clay, dust, and organic matter. Crushed stone is a loose material capable of crushing various hard rocks into large pieces, as well as broken bricks, slag, etc [11-16].

In the composition we have chosen, crushed stone of 5-20 mm fraction are used by "BUKHARTOSH" LLC and 20-40 mm fraction by "GRANITE-MINING" LLC (Fig. 6).

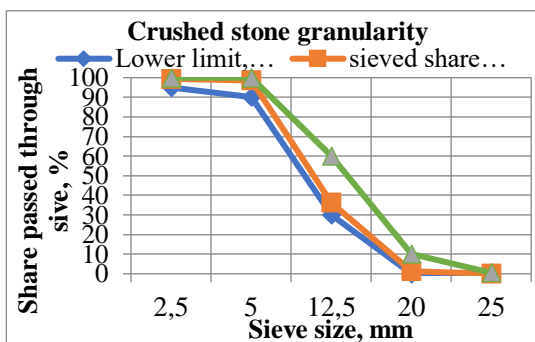


Fig. 6. Graph for determining the grain size of the shank fraction 5-20 mm

The crushed stone of 20-40 fraction produced by "GRANITE-MINING" LLC also met all the requirements when tested, like the 5-20 mm fraction.

Studies conducted at the selected site showed various changes in the concrete mixture when

changing the percentage of sand in the aggregate mixture to 0.25, 0.26, 0.27, 0.28, 0.29 and 0.30. Sand in a concrete mixture is a fine aggregate that serves to fill the space between large aggregates (together with water + cement + air).

Therefore, it was found that the percentage of sand in the mixture of aggregates directly affects the properties of the concrete mixture. Without changing the amount of water, cement and SAM additives, when the percentage of sand in the filler mixture was increased, the changes as shown in Figures 7 and 8 were observed.

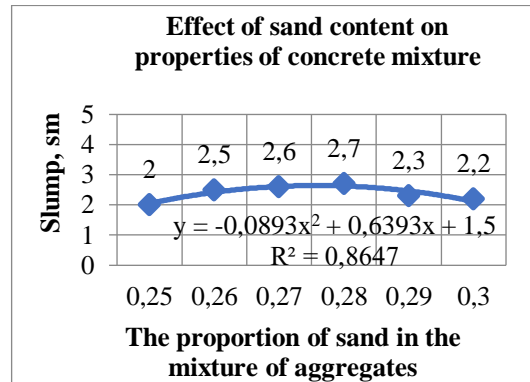


Fig. 7. The effect of the proportion of sand in the aggregate mixture on the slump grade of the mixture

It is stated that the requirement for the P1 grade of the concrete mix for the selected object should be in the range of 1-4 cm.

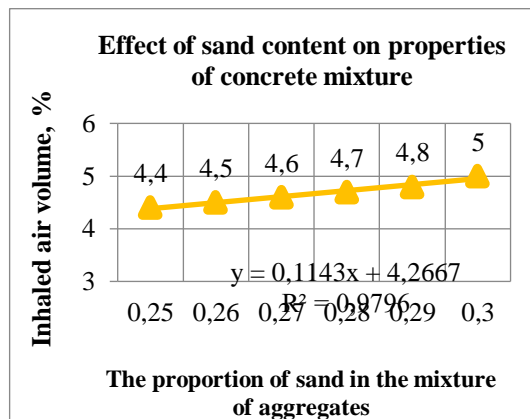


Fig. 8. The effect of the percentage of sand in the mixture of aggregates on the amount of absorbed air in concrete

The effect of the value of the sand content in the aggregate mixture on the compressive strength of concrete depends on the size of the sand: for concrete with coarse sand, the strength does not depend significantly on the sand content in the aggregate mixture, when the sand is fine, the strength decreases proportionally with the increase in the sand content in the aggregate mixture (Fig. 9).



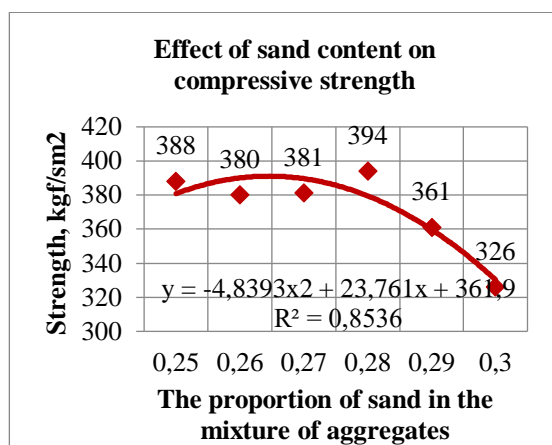


Fig. 9. The effect of the percentage of sand in the aggregate mixture on the compressive strength of concrete at the age of 28 days

It was found that increasing the value of the percentage of sand in the mixture of aggregates from 0.25 to 0.30 has a positive effect on the tensile strength of road concrete (Fig. 10).

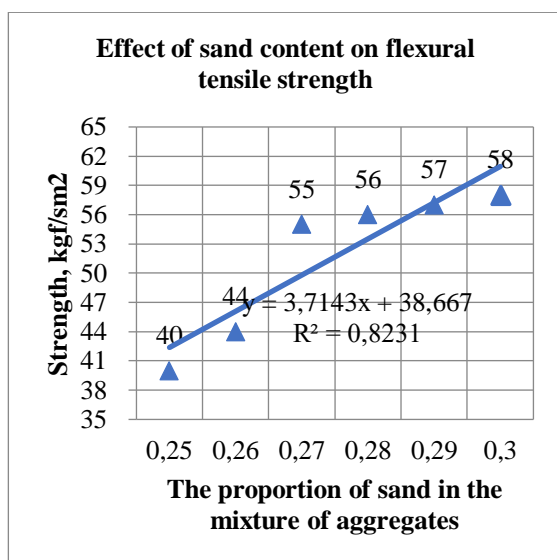


Fig. 10. The effect of the proportion of sand in the aggregate mixture on the flexural tensile strength of concrete at the age of 28 days

The percentage of sand in concrete can affect its density, but it is not the only factor. Usually, the greater the percentage of sand, the lower the density of the concrete mixture. This is due to the fact that the sand does not provide sufficient density and does not completely fill the volume of the concrete mixture [18-20].

4. CONCLUSION

However, a small amount of sand in the concrete mixture can cause the concrete to have a high density and be more difficult to handle during pouring and

placing. To achieve an optimal balance between the density and workability of concrete, it is necessary to balance the proportion of sand in the concrete mix according to the requirements of a particular project.

The proportion of sand in the mixture of aggregates has a significant effect on the physical and mechanical properties of concrete. When the percentage of sand in the aggregate mixture increases, the average volume of open pores decreases, and the volume of conditional closed reserve pores in concrete increases to 4.4-5.0%. This ensures high cold resistance of concrete. During our research, it was found that concrete achieves its optimal properties when the value of the percentage of sand in the mixture of aggregates for the selected object is 0.28. Moreover, when the amount of sand is increased, the price of the concrete mixture decreases, because sand is a large aggregate for this object. It is cheap. For this reason, we recommend taking the percentage of sand in the filler mixture at a value of 0.28 for the selected object.

Furthermore, introducing a structural coefficient that characterizes the composition of road concrete, and using it in an integrated durability model, will bridge the existing gap between microstructural concepts of concrete and engineering methods for calculating road pavements. This will also allow for a more accurate description of failure accumulation processes and better forecasting of service life.

REFERENCES

- [1] T. Amirov, X. Aripov, B. Qurbonov, M. Tuxtayev, and S. Rakhmatov, "Designing the composition of road concrete with chemical additives," *E3S Web Conf.* 264, 02049 *CONMECHYDRO — 2021*, vol. 264, p. 02049, Jun. 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202126402049
- [2] S.S. Rakhmatov and D.D. Kholmurotov, "Determining bulk density and fineness level of cement used for concrete mix," *Inter-Science Innov in Uzbekistan. and Journal of Scientific Research*, No. 24, pp. 294–297, 2023.
- [3] T.J. Amirov and S.S. Rakhmatov, "Improving the durability of road concrete and ferroconcrete products," *Silesian Univ. Technol. Fac. Transp. "Transport Probl. XI Int. Conf.*, pp. 7–12, 2019.
- [4] T.J. Amirov and S.S. Rakhmatov, "The use of polymer materials that form a curtain in the maintenance of a newly laid road concrete pavement," *Toshkent davlat Transp. Univ. Transp. Resur. tejankor texnologiyalar*, pp. 246–250, 2021.
- [5] T.J. Amirov, A.K. Narmanov, S. Rakhmatov, and Murodullayev. O.K, "Calculation of rigid airfield pavements (calculation of single-layer concrete and reinforced concrete pavements)," *Innov. Mod. Educ. Syst. USA*, pp. 1–254, 2021.
- [6] S.S. Rakhmatov, "Substantiation of the composition of the road concrete mixtures when



laying in sliding formwork concrete mixer," *Master's dissertation*, 2023, p. 104.

[7] T.J. Amirov and S.S. Rakhmatov, "Investigation of the properties of large aggregates used for road heavy concrete mix," Candidate of Technical Sciences, Profr. MAYI and JizPI Honorary Profr. A collection of articles of the scientific conference dedicated to the 75th anniversary of the birth of Azizov Kudratulla Khusanovich, 2023.

[8] https://www.researchgate.net/publication/236945358_Design_of_Concrete_Mixes_by_Systematic_Steps_and_ANN

[9] Erkinov S.F. Master's dissertation "Design of the composition of road heavy concrete with chemical admixtures for use in the conditions of Uzbekistan" Tashkent-2016 y 105 page

[10] Tuxtayev M.B, Isayev J.A, Mamatmuminov A.T. The experience of south africa, west germany, spain, japan, usa in the construction of cement concrete pavements. <https://7universum.com/ru/tech/zayavka/8143/fb3fad3a65.-6,2023-yil>.

[11] Tarek U.M, Mohammad Z.H, Jamil A.J "Effect of sand-to-aggregate volume ratio on durability of concrete" *Innovative Infrastructure Solutions*. September 2022 44-54 page. DOI:10.1007/s41062-022-00915-8

[12] Yahya G.M Aggregates in Concrete Mix Design. Lulea Technology University. 2017 y 119

[13] GOST 31424-2010. Sand obtained by crushing dense rocks in the production of crushed stone. Technical conditions.

[14] GOST 8736-2014. Sand for construction work. Technical conditions.

[15] GOST 8735-88. Sand for construction work. Test methods.

[16] GOST 8267-93. Crushed stone and gravel from dense rock for construction work. Technical conditions.

[17] GOST 8269.0-97. Crushed stone and gravel obtained from dense rocks and industrial waste for construction work. Physico-mechanical test methods.

[18] GOST 26633-2015. Heavy and fine-grained concretes. Technical conditions.

[19] GOST 27006-19. Concrete. Content selection rules.

[20] GOST 7473-2010. Concrete mixtures. Technical conditions.





INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anvar Adilkhodjaev Tashkent State Transport University
E-mail: anvar_1950@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5729-5178>

T. Amirov Tashkent State Transport University
E-mail: tursoat.amirov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2681-8797>



On the Mechanism of the Influence of Various Micro-Fillers and Chemical Additives on the Microstructure and Strength of Cement Paste

A.I. Adilkhodzheyev¹^a, I.A. Kadirov²^b, F.E. Abdukadirov¹^c, E.V. Kakharov²^d


¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

²National Research University "TIAME", Tashkent, Uzbekistan

Abstract The paper examines the mechanism of the influence of complex micro-fillers and chemical additives on the microstructure formation and physical-mechanical properties of cement paste. The hydration and structure formation processes in binary cement composites with the introduction of active mineral admixtures and superplasticizers are analyzed. It is experimentally confirmed that the use of an optimized composition of micro-fillers contributes to a significant compaction of the cement matrix structure, a decrease in total porosity from 14.5% to 9.2%, and an increase in compressive strength by 33–34%. The research results demonstrate the effectiveness of using these composites in the production of resource-saving high-strength concretes adapted to the regional climatic conditions.

Keywords: Cement Paste, Micro-fillers, Microstructure, Strength, Porosity, Hydration, Modified Concrete

О Механизме Влияния Различных Микронаполнителей и Химических Добавок на Микроструктуру и Прочность Цементного Камня

А.И. Адилходжаев¹^a, И.А. Кадилов²^b, Ф.Э. Абдукадилов¹^c,
Кахаров Э.В.²^d

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан

²Национальный исследовательский университет «ТИИМСХ», Узбекистан

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы влияния комплексных микронаполнителей на формирование микроструктуры и физико-механические показатели цементного камня. Проанализированы процессы гидратации и структурообразования в бинарных цементных композитах при введении активных минеральных добавок и суперпластификаторов. Экспериментально подтверждено, что использование оптимизированного состава микронаполнителей способствует значительному уплотнению структуры цементной матрицы, снижению общей пористости с 14,5 % до 9,2 % и повышению прочности на сжатие на 33–34 %. Результаты исследований демонстрируют эффективность применения данных композитов в производстве ресурсосберегающих высокопрочных бетонов, адаптированных к климатическим условиям регионов.

Ключевые слова: Цементный камень, микронаполнители, микроструктура, прочность, пористость, гидратация, модифицированный бетон


1. ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития строительной индустрии характеризуется ростом требований к эксплуатационным характеристикам конструкционных материалов. Одним из ключевых факторов в данном контексте является создание высокопрочных и долговечных цементных систем, способных выдерживать значительные статические и динамические нагрузки в различных климатических условиях.


Традиционные подходы к повышению прочности бетона за счет простого увеличения расхода цемента на сегодняшний день признаны экономически неэффективными и экологически неоправданными.

К настоящему времени предложены и успешно внедряется ряд эффективных методов, позволяющих проектировать цементные композиты, обладающие комплексом наперед заданных свойств одним из которых являются

^a <https://orcid.org/0000-0003-4552-0418>

^b <https://orcid.org/0000-0001-9425-4523>

^c <https://orcid.org/0000-0003-2271-3768>

^d <https://orcid.org/0009-0002-6680-2105>



многокомпонентные модифицированные системы.

Важнейшую роль в формировании структуры и свойств таких систем играют микронаполнители, такие как карбонат кальция, минеральные порошки и активные минеральные добавки. Их введение в состав цементных композиций позволяет управлять процессом структурообразования на микроуровне. Микронаполнители выполняют функцию центров кристаллизации продуктов гидратации, способствуя более равномерному распределению новообразований и заполняют микропоры в цементной матрице. Это приводит к значительному уплотнению структуры цементного камня и улучшению его физико-механических показателей.

В рамках реализации долгосрочных планов по разработке ресурсосберегающих технологий цементных бетонов, особую актуальность приобретают вопросы изучения совместного влияния различных типов микронаполнителей и химических добавок-модификаторов [1-3].

Исследования П. Кумара Мехты (P.K. Mehta) и П. Монтейро (P. Monteiro) заложили фундамент понимания механизмов формирования микроструктуры бетона и роли ультрадисперсных добавок в повышении его долговечности [4]. В работах К. Скривенера (K. Scrivener) и Б. Лотенбаха (B. Lothenbach) подробно изучены процессы гидратации многокомпонентных вяжущих и влияние микронаполнителей на формирование кристаллического каркаса [5]. Также значительный вклад в развитие высокотехнологичных бетонов внес П.К. Эйтин (P.C. Aitcin), обосновавший эффективность комплексного применения суперпластификаторов и микрокремнезема [6-8].

Несмотря на значительное количество исследований, вопросы совместного влияния микрокремнезема и известняковой муки на процессы структурообразования цементного камня в условиях сухого жаркого климата остаются недостаточно изученными. Особенно актуальным является исследование механизмов уплотнения цементной матрицы при низком водоцементном отношении.

В данной работе представлены результаты исследований по созданию высокопрочного цементного камня. Предлагается использование синергетического эффекта взаимодействия суперпластификаторов нового поколения и

бинарных микронаполнителей, что позволяет достичь высокой плотности упаковки частиц на микроуровне и обеспечить требуемую долговечность конструкций.

Целью данного исследования является изучение влияния микронаполнителей на формирование микроструктуры, плотности и прочностных характеристик цементного камня, а также обоснование эффективности их применения в производстве строительных материалов нового поколения.

Научная новизна исследования заключается в установлении механизма совместного влияния бинарных микронаполнителей и суперпластификаторов на процессы уплотнения цементной матрицы и формирования плотной микроструктуры цементного камня.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для реализации экспериментальных исследований были выбраны материалы, широко применяемые в строительной индустрии Республики Узбекистан, что обеспечивает практическую значимость полученных результатов.

Цемент: В качестве основного вяжущего использовался портландцемент марки ПЦ 400-Д20 производства АО «Бекабадцемент» (соответствующий ГОСТ 10178). Химический состав цемента характеризуется содержанием основных оксидов: CaO (62-65%), SiO₂ (20-22%), Al₂O₃ (4-6%) и Fe₂O₃ (2-4%). Удельная поверхность цемента составляла 3000-3200 см²/г.

Микронаполнители:

- **Микрокремнезем:** ультрадисперсный материал с содержанием аморфного SiO₂ не менее 90%, обладающий высокой пуццолоновой активностью.

- **Известняковая мука (микрокальцит):** тонкомолотый карбонат кальция, используемый для уплотнения структуры и ускорения процессов кристаллизации гидратных фаз.

- **Минеральные порошки:** полученные путем тонкого измельчения местных горных пород до удельной поверхности 4500-5000 см²/г.

Основные физико-химические характеристики и минералогический состав исходных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические характеристики исходных материалов

Материал	Удельная поверхность, см ² /г	Плотность, г/см ³	Основной компонент
Портландцемент ПЦ 400	3100	3,12	CaO, SiO ₂
Микрокремнезем	18500	2,20	SiO ₂ (аморфный)
Известняковая мука	4200	2,65	CaCO ₃



Для изучения влияния данных материалов на свойства цементного камня были подготовлены серии образцов с различным процентным содержанием микронаполнителей. В ходе эксперимента варьировалось содержание микрокремнезема в пределах 5–10%, и известняковой муки 10–20% от массы цемента.

Процесс приготовления смесей включал предварительное сухое перемешивание цемента с микронаполнителями в течение 3 минут для достижения гомогенности состава. Затем вводилась вода затворения с предварительно растворенным в ней суперпластификатором на поликарбоксилатной основе. Перемешивание продолжалось до получения однородной массы с заданной подвижностью. Водоцементное отношение исследуемых составов составляло 0,32–0,35.

Из приготовленной смеси формовались образцы-кубы размером 70,7x70,7x70,7 мм. Уплотнение проводилось на стандартной виброплощадке в течение 30–60 секунд. Образцы выдерживались в формах в течение 24 часов, после чего подвергались распалубке и помещались в камеру нормального твердения с температурой 20±2°C и относительной влажностью воздуха не менее 95%.

Химические добавки (Суперпластификаторы): Для обеспечения требуемой подвижности бетонной смеси при низком водоцементном отношении (В/Ц) применялись суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе Glenium ACE 430.

Особое внимание уделялось изучению адсорбционного взаимодействия суперпластификатора с поверхностью микронаполнителей. Установлено, что дозирование добавки в пределах 0,8–1,2% от массы вяжущего позволяет эффективно распределять ультрадисперсные частицы в объеме цементного теста, предотвращая их флокуляцию (слипание).

Методика эксперимента: Изготовление образцов-кубов размером 70,7x70,7x70,7 мм проводилось в соответствии с действующими стандартами. Для каждого экспериментального состава изготавливалось не менее трех образцов. Испытания на прочность при сжатии выполнялись в возрасте 3, 7, 28 суток, а также в рамках долгосрочного мониторинга до 24 месяцев. Изучение микроструктуры цементного камня проводилось с использованием методов электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 при увеличении ×2000.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных экспериментальных исследований были получены данные о влиянии комплексных микронаполнителей на прочностные характеристики цементного камня в различные сроки твердения. Основные результаты испытаний на сжатие для контрольных и модифицированных составов приведены в табл. 2. Прогнозные значения прочности, полученные методом экстраполяции.

Таблица 2

Показатели прочности на сжатие (МПа)

Срок твердения	Контрольный состав (ПЦ 400)	Модифицированный состав (Ц + МК + СП)	Прирост прочности (%)
3 суток	18,5	23,2	+25%
7 суток	28,4	36,5	+28%
28 суток	42,5	56,8	+33%
6 месяцев (прогноз)	48,2	64,5	+34%

Погрешность экспериментальных измерений не превышала 5 %, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Для наглядного представления интенсивности набора прочности и сравнительного анализа динамики твердения бинарных систем была построена гистограмма (рис. 1)

Анализ прочностных характеристик. Экспериментальные исследования прочности на сжатие проводились в сроки от 3 суток до 24 месяцев, что позволило оценить как раннюю прочность, так и долговечность бинарных систем. Установлено, что образцы с комплексными микронаполнителями (микрокремнезем +

известняковая мука) показывают стабильный рост прочности на всех этапах.

- В ранние сроки (3–7 суток) прочность модифицированных составов выше контрольных на 15–20%, что объясняется ускорением гидратации минералов цемента на поверхности микронаполнителей.

- К 28 суткам прирост прочности достигает 30–35% при оптимальной дозировке суперпластификатора.

- Прогнозные показатели согласно 24-месячному плану исследований указывают на сохранение положительной динамики без признаков деструкции, что подтверждает высокую стабильность структуры.



Помимо прочностных показателей, введение комплексных добавок существенно влияет на физические характеристики материала.

Сравнительные данные по плотности, водопоглощению и пористости приведены в табл. 3.

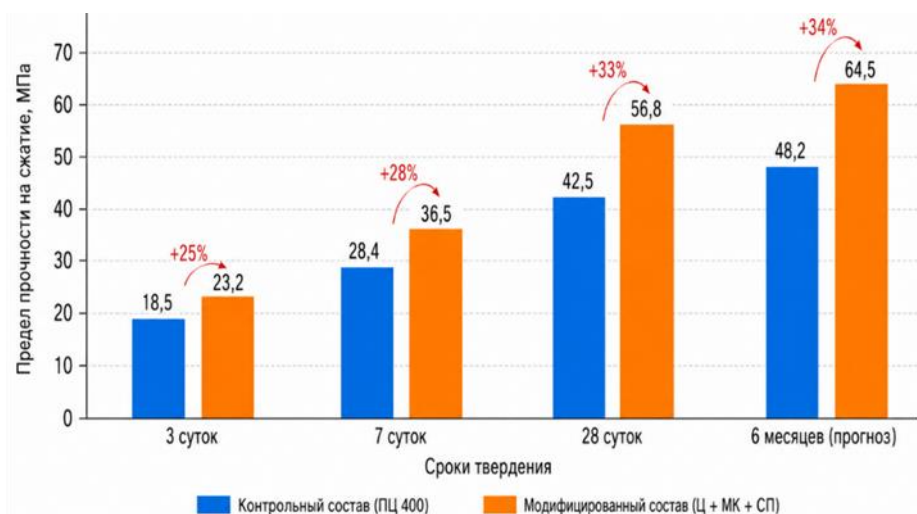


Рис. 1. Влияние комплексного модифицирования на динамику набора прочности цементного камня

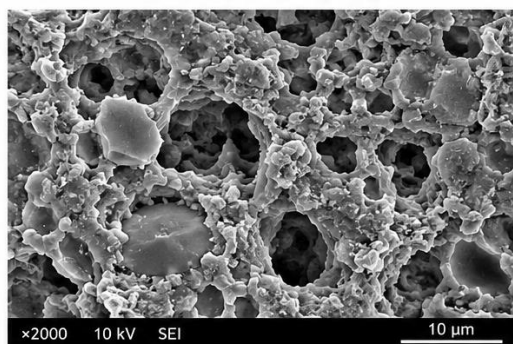
Таблица 3

Влияние комплексных микронаполнителей на физические свойства цементного камня

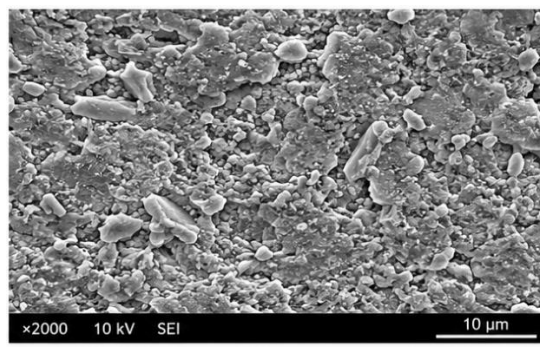
Состав	Плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Пористость, %
Контрольный	2150	5,8	14,5
С микронаполнителями	2310	3,1	9,2

Особый интерес представляет изучение влияния микронаполнителей на микроструктуру цементного камня. Методом сканирующей электронной микроскопии было установлено, что введение ультрадисперсных добавок

способствует значительному уплотнению матрицы. На рис. 2 представлены микрофотографии скола образцов, подтверждающие заполнение капиллярных пор продуктами гидратации и частицами микронаполнителей.



Контрольный образец



Модифицированный образец

Рис. 2. СЭМ-микрофотографии структуры цементного камня при увеличении $\times 2000$ (масштаб 10 μm)

На основании результатов СЭМ-анализа была предложена теоретическая модель уплотнения цементной матрицы. Теоретическая модель формирования структуры (рис.3) наглядно демонстрирует механизм взаимодействия

микронаполнителей с цементными зернами, где ультрадисперсные частицы эффективно заполняют межзерновое пространство, создавая плотный кристаллический каркас.



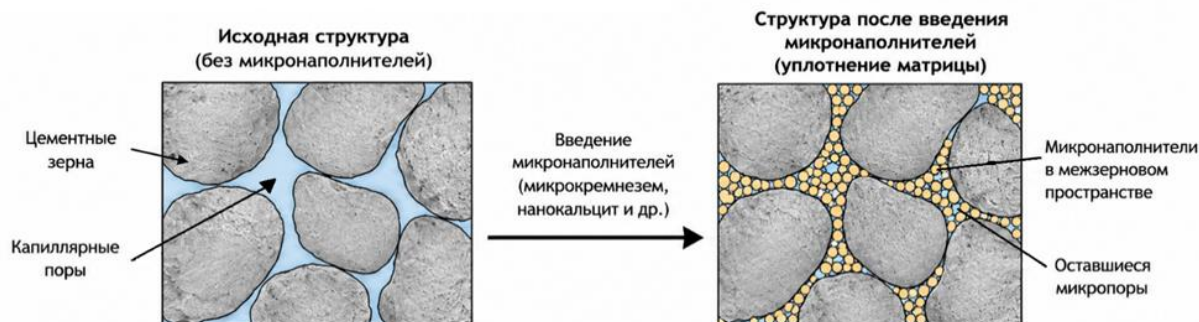


Рис. 3. Структурная схема уплотнения цементной матрицы при введении микронаполнителей

Изучение микроструктуры цементного камня методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) выявило качественные изменения в строении матрицы. В контрольных образцах наблюдается наличие капиллярных пор и фрагментарное расположение кристаллов гидросиликата кальция. Установлено, что введение микронаполнителей способствует более интенсивному образованию низкоосновных гидросиликатов кальция (C-S-H), обеспечивающих повышение плотности цементной матрицы:

- в модифицированных составах микронаполнители эффективно выполняют роль «микрофиллера», плотно заполняя пространство между зернами цемента;
- микроструктура характеризуется высокой плотностью и минимальным количеством макропор;
- продукты гидратации располагаются более компактно, формируется более плотная пространственная структура гидросиликатов кальция (C-S-H).

Плотность и водопоглощение. Эффективность заполнения пор в цементной матрице напрямую отразилась на физических свойствах камня.

- Плотность: введение комплексных микронаполнителей позволило повысить среднюю плотность образцов на 5-8% (с 2150 до 2310 кг/м³).
- Водопоглощение: благодаря перекрытию капиллярных каналов ультрадисперсными частицами, показатель водопоглощения снизился с 5,8% до 3,1%.

Исследованиями показано, что комплексное использование микрокремнезема и известняковой муки не только упрочняет материал, но и значительно повышает его сопротивляемость агрессивным воздействиям внешней среды, что особенно важно для транспортных сооружений (например, эстакад метро).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований влияния комплексных микронаполнителей на свойства цементных систем сформированы следующие выводы:

1. Повышение прочностных характеристик: Установлено, что применение комплексных микронаполнителей и суперпластификаторов обеспечивает повышение прочности цементного камня на 33–34 % по сравнению с контрольными составами.

2. Эффективность структурообразования: Методами микроструктурного анализа подтверждено, что микронаполнители эффективно выполняют роль «микрофиллера», плотно заполняя межзерновое пространство цементной матрицы. Это приводит к снижению общей пористости с 14,5% до 9,2% и существенному уплотнению структуры, что напрямую коррелирует с ростом прочности и долговечности материала.

3. Ресурсосбережение и экономическая эффективность: Применение разработанных составов является высокоэффективным с точки зрения ресурсосбережения. Использование местных минеральных добавок и отходов производства позволяет снизить удельный расход дорогостоящего клинкерного цемента без потери качественных характеристик бетона. Данный подход способствует снижению себестоимости строительных конструкций и уменьшению экологической нагрузки при производстве строительных материалов.

4. Практическая значимость: Полученные результаты рекомендуются для внедрения при производстве высокопрочных бетонов для транспортного строительства, в частности для элементов эстакад метрополитена и мостовых конструкций, эксплуатируемых в условиях сухого и жаркого климата.

Таким образом, применение комплексных микронаполнителей является перспективным направлением разработки высокоэффективных и



долговечных цементных композитов нового поколения.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

[1] Адилходжаев А. И., Кадилов И. А., Абдукадилов Ф. Э. Стратегия модификации цементных систем тонкодисперсными минеральными наполнителями. Journal of Transport, ISSN: 2181-2438, Vol. 1, No. 1, 2026. P. 226–229

[2] Adilkhodjaev A.I., Kadyrov I.A., Kudratov B., Xasanov B., Umarov I. On the structure of cement stone with fillers from metallurgical waste // XXVI International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2023).

[3] Адилходжаев А.И., Абдусаттаров А., Ниязбеков С.С., Абдукадилов Ф.Э., Кадилов И.А., Совершенствование методов расчёта тонкостенных конструкций из бетона. Монография, Lambert, ISBN 978-620-9-58598-2, 2026, 159 с

[4] Mehta P.K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2014.

[5] Scrivener K. L., Lothenbach B. Cementitious Materials: Composition, Properties and Applications. – CRC Press, 2022.

[6] Aitcin P.C. High Performance Concrete. London: CRC Press; 1998.

[7] Neville A.M. Properties of Concrete. 5th ed. London: Pearson Education; 2011.

[8] Taylor H.F.W. Cement Chemistry. 2nd ed. London: Thomas Telford; 1997.

ИНФОРМАЦИЯ INFORMATION ABOUT AUTHORS

А.И.Адилходжаев Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан
anvar.adilkhodjaev@tstu.uz

И.А.Кадилов Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ», Узбекистан
kadirov.i@tiiame.uz

Ф.Э.Абдукадилов Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан
farkhod.abduqodirov@tstu.uz

Кахаров Э.В Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan
kaharoverkin8@gmail.com



Design-Based Assessment of Hybrid Thermal-Insulating Dry Plaster Mortars for Aerated Concrete Walls in Aral Sea Region Conditions

A. Ismaylova¹^a

¹Urgench State University, Khorezm, Uzbekistan

Abstract The paper presents a design-based assessment of thermal-insulating dry plaster mortars intended for aerated concrete and other porous wall materials under the dry, windy and salt-aerosol affected conditions of the Aral Sea region. The study focuses on the simultaneous compatibility of the plaster layer with the porous substrate in terms of thermal resistance, vapour permeability, capillary water absorption, adhesion and crack resistance. Five mortar variants were compared: a reference cement-sand plaster, perlite-based and vermiculite-based lightweight plasters, a hollow-microsphere modified plaster and a hybrid perlite-vermiculite-microsphere composition. A multi-criteria approach was used to evaluate the balance between low thermal conductivity, sufficient compressive strength, low water absorption and vapour-open behaviour. The calculated screening indicators show that the hybrid composition can reduce thermal conductivity to 0.116 W/(m·K), decrease capillary water absorption to 0.26 kg/(m²·h^{0.5}), and maintain adequate adhesion to aerated concrete. The results confirm that the best solution is not the composition with the lowest density alone, but the one that combines closed and open pore systems with a compatible lime-cement matrix and hydrophobic modification. A minimal laboratory testing program is proposed for further verification before pilot application.

Keywords: Aerated concrete, dry plaster mortar, thermal insulation, perlite, vermiculite, hollow microspheres, vapour permeability, capillary water absorption, Aral Sea region, salt aerosol, multi-criteria assessment

1. INTRODUCTION

Aerated concrete is widely used in energy-efficient wall systems because its cellular structure reduces density and improves the thermal performance of building envelopes. However, the same porous structure also makes the material sensitive to capillary suction, vapour accumulation and surface damage when the finishing layer is selected incorrectly. In dry continental regions, especially in territories affected by dust and salt aerosols, the external plaster must not only protect the wall from rain and mechanical action but also maintain a safe moisture balance inside the wall section.

Traditional cement-sand plasters are relatively dense and strong, but their thermal conductivity is high and their deformation compatibility with aerated concrete is limited. A hard and low-vapour layer can increase the risk of interfacial cracking, efflorescence and local detachment. For this reason, dry thermal-insulating plaster mortars containing lightweight fillers, polymer modifiers, hydrophobizing agents and microfibrils are becoming an important direction for façade systems based on aerated concrete blocks.

The purpose of this paper is to develop and compare several thermal-insulating dry plaster mortar compositions for porous wall substrates. The comparison is based on a multi-criteria framework in which thermal insulation, moisture transport and

mechanical compatibility are assessed together rather than separately.

2. MATERIALS AND METHODS

The designed mortar system contains Portland cement, hydrated lime, fine mineral filler, lightweight porous fillers, polymer powder, cellulose ether, hydrophobizer and dispersed microfibrils. Expanded perlite and vermiculite were selected as open-pore lightweight fillers, while hollow mineral microspheres were used as a closed-pore component. The lime-cement binder was chosen to improve vapour openness and reduce stiffness compared with a purely cement matrix.

Five compositions were analysed. M0 is a reference cement-sand plaster. M1 and M2 contain perlite and vermiculite respectively. M3 contains hollow mineral microspheres, and M4 is a hybrid composition combining perlite, vermiculite and microspheres. The numerical values in the tables are design-screening indicators intended for formulation selection and laboratory planning.

The basic thermal and moisture criteria were expressed using the following relationships:

$$R = d / \lambda \quad (1)$$

$$R_0 = R_{si} + \sum(d_i / \lambda_i) + R_{se} \quad (2)$$

$$sd = \mu \cdot d \quad (3)$$

$$W = (m_t - m_0) / (A \cdot \sqrt{t}) \quad (4)$$

$$S = \sum w_i \cdot x_i \quad (5)$$

^a <https://orcid.org/0009-0000-4596-0759>



Here R is the thermal resistance of a layer, d is the layer thickness, λ is the thermal conductivity coefficient, R_0 is the total thermal resistance of the wall section, s_d is the equivalent air layer thickness, μ is the vapour diffusion resistance factor, W is the capillary water absorption coefficient, A is the wetted surface area, and S is the integral multi-criteria score obtained from normalized indicators x_i and weights w_i .

Composition design

The composition design was aimed at reducing density and thermal conductivity while keeping the plaster mechanically compatible with an aerated concrete substrate. The amount of cellulose ether and polymer powder was kept moderate because excessive polymer content may reduce vapour permeability. The hydrophobizer was increased in lightweight compositions to compensate for the open-pore structure of perlite and vermiculite.

Table 1
Designed compositions of dry thermal-insulating plaster mortars

Component	M0	M1	M2	M3	M4
Portland cement, wt. %	28.00	25.00	24.50	23.00	22.00
Hydrated lime, wt. %	8.00	9.00	9.00	10.00	9.00
Fine quartz/limestone filler, wt. %	62.35	46.40	46.00	44.60	38.60
Expanded perlite, wt. %	0.00	17.00	0.00	6.00	10.00
Expanded vermiculite, wt. %	0.00	0.00	18.00	6.00	8.00
Hollow mineral microspheres, wt. %	0.00	0.00	0.00	7.60	9.40
Redispersible polymer	1.00	1.60	1.50	1.60	1.70

Cellulose ether, wt. %	0.25	0.30	0.30	0.35	0.35
Organosilicon hydrophobizer, wt. %	0.20	0.35	0.35	0.45	0.50
Polypropylene/basalt microfibrils, wt. %	0.15	0.25	0.25	0.30	0.35
Air-entraining stabilizer, wt. %	0.05	0.10	0.10	0.10	0.10
Recommended water/dry mix ratio	0.23	0.29	0.31	0.27	0.28
Polymer powder, wt. %					

Note. The water/dry mix ratio is given for mortar preparation and is not included in the 100 wt. % dry composition balance.

Table 2
Design-screening performance indicators for the compared compositions

Mix	M0	M1	M2	M3	M4
Density, kg/m^3	1340	690	720	640	610
λ , $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	0.345	0.153	0.168	0.128	0.116
μ	13	7	8	9	8
s_d at 20 mm, m	0.26	0.14	0.16	0.18	0.16
W , $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^{0.5})$	0.52	0.36	0.39	0.30	0.26
Compressive strength	8.2	2.8	3.2	3.8	3.5



h, MPa					
Adhesion, MPa	0.42	0.31	0.34	0.37	0.39
Shrinkage, mm/m	1.25	0.91	0.86	0.74	0.69
Score	0.46	0.79	0.77	0.86	0.91

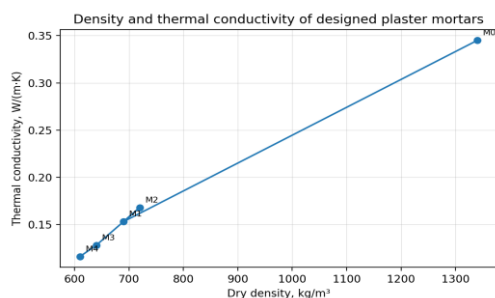


Fig. 1. Relationship between dry density and thermal conductivity of the designed mortars

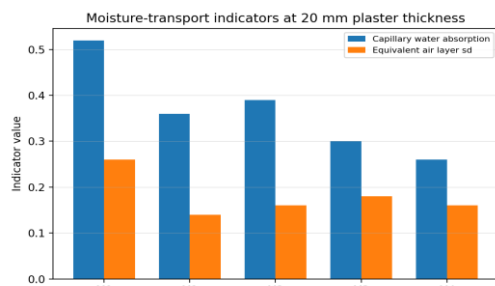


Fig. 2. Moisture-transport indicators used to check vapour-open and water-resistant behaviour

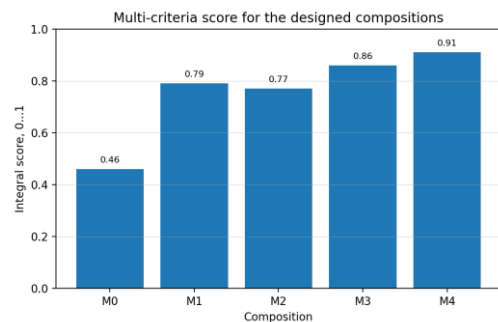


Fig. 3. Integral multi-criteria score of the designed compositions

3. RESULTS AND DISCUSSION

The reference composition M0 has the highest density and thermal conductivity. Although it provides high compressive strength, the strong and dense cement-sand matrix is less favourable for aerated concrete because it can restrict vapour

movement and increase stress at the interface. This is confirmed by the highest capillary water absorption coefficient and the lowest integral score.

The perlite and vermiculite compositions reduce density by nearly one half compared with M0. Perlite gives a lower thermal conductivity than vermiculite in the proposed design, while vermiculite slightly improves compressive strength. However, both materials contain open pores; therefore, the hydrophobizer and polymer-cellulose system are important to prevent uncontrolled capillary suction.

The microsphere-modified composition M3 demonstrates a better balance between low thermal conductivity and mechanical resistance. Hollow particles create a closed-pore contribution to thermal insulation, while the fine mineral matrix keeps sufficient adhesion to the substrate. The hybrid composition M4 achieved the highest score because it combines the thermal efficiency of lightweight fillers with lower water absorption and acceptable vapour openness.

For façade use in the Aral Sea region, the most important result is the balance between water resistance and vapour permeability. A hydrophobic but vapour-open plaster reduces rain and aerosol solution ingress, while allowing moisture accumulated in the wall to dry outward. Such compatibility is especially important for aerated concrete because its thermal conductivity and durability are strongly affected by moisture content.

Recommended laboratory verification

Before industrial implementation, the proposed compositions should be verified using a minimal but complete testing program. The program must include thermal, hygric, mechanical and durability tests, because a single indicator such as thermal conductivity cannot fully describe façade performance.

Table 3

Recommended minimal testing program for plaster compatibility with aerated concrete

Indicator	Purpose	Method / reference direction	Recommended target
Thermal conductivity	Evaluate insulation efficiency	Steady-state heat flow test; comparison with EN 998-1 T classes	≤ 0.20 W/(m·K), preferably ≤ 0.12 W/(m·K)
Compressive strength	Check mechanical stability	Prism compression test after 28 days	CS I-CS II range; avoid excessive stiffness
Adhesion to aerated concrete	Prevent delamination	Pull-off test on prepared aerated concrete blocks	≥ 0.25 MPa with cohesive or mixed failure



Vapour permeability	Control drying capacity	Vapour diffusion resistance and s_d calculation	$s_d \leq 0.20$ m at 20 mm layer thickness
Capillary water absorption	Limit rain and salt solution intake	Capillary uptake test on dried specimens	≤ 0.40 kg/(m ² ·h ^{0.5})
Drying shrinkage	Estimate crack risk	Length-change measurement on prisms	≤ 1.0 mm/m for façade plaster
Salt aerosol / wet-dry cycles	Assess Aral Sea durability risk	Cyclic wetting with salt solution and drying	No visible scaling; mass loss $\leq 5\%$
Freeze-thaw resistance	Check seasonal durability	Cyclic freezing and thawing after water conditioning	Strength loss $\leq 15\%$ and no delamination

4. CONCLUSION

A design-based comparative assessment of dry thermal-insulating plaster mortars for aerated concrete walls was prepared. The results show that the optimal façade plaster for porous wall materials should be selected using a multi-criteria approach that combines thermal conductivity, vapour permeability, capillary water absorption, adhesion and shrinkage.

Among the compared compositions, the hybrid system M4 showed the best balance of properties. Its calculated thermal conductivity was 0.116 W/(m·K), capillary water absorption was 0.26 kg/(m²·h^{0.5}), and the integral score reached 0.91. The hybrid approach is promising because perlite and vermiculite reduce density, microspheres add closed-pore insulation, and the lime-cement-polymer matrix maintains compatibility with aerated concrete.

The proposed compositions can be used as a basis for laboratory trials and pilot production of lightweight plaster mortars for dry and salt-aerosol affected regions. Further work should focus on real specimen testing, cyclic durability assessment and optimization of the hydrophobizer dosage under local climatic conditions.

REFERENCES

- [1] EN 998-1:2010. Specification for mortar for masonry - Rendering and plastering mortar.
- [2] GOST R 57336-2016 (EN 998-1:2010). Rendering and plastering mortars - Technical specifications.
- [3] DIN 4108-3:2014. Thermal protection and energy economy in buildings - Protection against moisture.

[4] QMQ 2.01.04-2018. Construction heat engineering. Building standards of the Republic of Uzbekistan.

[5] SHNQ 3.04.01-21. Insulation and finishing coatings. Urban planning norms and rules of the Republic of Uzbekistan.

[6] Palomar, I.; Barluenga, G. A multiscale model for pervious lime-cement mortar with perlite and cellulose fibers. 2018.

[7] Pavlik, Z.; Fort, J.; Pavlikova, M.; et al. Modified lime-cement plasters with enhanced thermal and hygric storage capacity. 2016.

[8] Koksal, F.; Gencil, O.; Kaya, M. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars. 2015.

[9] Chen, J.P. Experimental study of external thermal insulation mortar based on fly ash floating bead. 2012.

[10] Inozemtsev, A.S.; Korolev, E.V. Hollow microspheres as efficient fillers for high-strength lightweight composites. 2013.

[11] Semenov, V.S.; Rozovskaya, T.A. Energy-efficient dry masonry mixtures based on hollow microspheres. 2014-2015.

[12] UNDP. UNDP and Uzbekistan join forces to combat dust storms in the Southern Aral Sea region. Press release, 2025.

[13] Rakhmatova, N.; et al. Temporal and Spatial Dynamics of Dust Storms in Uzbekistan from Meteorological Station Records (2010-2023). Atmosphere, 2025.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ismaylova Aysuliu Basic doctorant, Urganch state university
E-mail: ismaylovaaysuliu676@gmail.com
Tel.: +998942946564
<https://orcid.org/0009-0000-4596-0759>



Visual Determination of Adhesion of Bitum Modified with Defecate with Marble Stone

I.S. Sadikov¹^a, G.K. Isakova¹^b, R.K. Kadirbergenov¹^c

¹Tashkent State Transport University, Tashkent

Abstract The longevity of asphalt concrete pavements largely depends on the adhesion properties between bitumen and mineral aggregates. The insufficient adhesion of the bitumen to the surface of the unit leads to coating degradation under the influence of moisture, a decrease in strength, and a reduction in service life. Therefore, improving the adhesive properties of bitumen is one of the important issues in the field of road construction. In this article, the adhesion properties of grade 50/70 road bitumen to marble stone material were studied by modifying it with defective mineral powder, which is a sugar refinery waste. During the research, a homogeneous mixture was prepared by adding a certain amount of defecate to the bitumen composition, and visual tests were conducted in accordance with the requirements of GOST 12801. During the test, the degree of bitumen retention on the marble surface was assessed through visual observation.

Keywords: Road bitumen, defect, adhesion, modification, marble stone, industrial waste

1. INTRODUCTION

Bitumen binder is the primary adhesive material for road surfaces, which holds the road structure in a continuous state and makes the surface of the coating waterproof. However, when cracks appear in the pavement or water enters the pavement from the external environment, the connection between the bitumen and the aggregate is disrupted, and the bitumen separates from the surface of the aggregate [1].

By their chemical nature, aggregates can be acidic or basic (alkaline). According to Hefer's (2005) research, acidic materials form better chemical bonds with basic materials, and basic materials with acidic materials. To form a strong chemical bond in the bitumen-aggregate system, a base aggregate such as limestone reacts well with the acidic components contained in the bitumen [2]. Calcium carbonate (CaCO_3), present in limestone, forms a strong bond with the carboxylic acids in the bitumen. Conversely, silicate aggregates have an acidic nature, and bitumen is also a weakly acidic substance. Therefore, the adhesion strength between such aggregates and bitumen is relatively low [3]. Nevertheless, under high temperatures and mechanical effects, a certain degree of bonding between the bitumen and the aggregates can occur. However, when water enters the asphalt surface, it displaces the bitumen film from the surface of the unit. Once this process begins, separation accelerates [4].

Currently, scientific research is being conducted to improve the physical, mechanical, and adhesive properties of bitumen to increase the service life of

highway pavements. The efficient use of industrial waste is particularly important from both environmental and economic perspectives [6]. One of the wastes generated in sugar production plants is defecate, which contains calcium carbonate, organic substances, and fine mineral particles. The use of this material as a bitumen modifier allows for the improvement of asphalt concrete composition.

The adhesion of bitumen to mineral material determines the water resistance and strength of the asphalt concrete. According to GOST 12801, adhesion is determined by evaluating the visual condition of the surface of the bitumen-coated stone material. [5]

The aim of this study is to visually evaluate the adhesion properties of grade 50/70 bitumen with marble stone by modifying it with a 5% defect.


2. RESEARCH METHODOLOGY

In this experiment, 50/70 bitumen, widely used in road construction, was selected as the bitumen binder, and one of the wastes generated at sugar production enterprises—defecate—was obtained. The nature of the chemical composition of the selected mineral powder was analyzed separately (Table 1). Table 1. Chemical composition of the defect.

Table 1
Chemical composition of the defect

Component	Amount (%)
N(Nitrogen)	0.2–0.7
P_2O_5 (Phosphorus)	0.2–0.9
K_2O (Potassium)	0.3–1.0

^a <https://orcid.org/0000-0002-2595-288X>

^b <https://orcid.org/0009-0001-4990-8920>

^c <https://orcid.org/0009-0002-4922-0744>



MgO (Magnesium)	0.4–0.8
CaCO ₃	80-85

Marble grain (at least 10 mm) is tied to it with a thread or thin wire (diameter not more than 0.5 mm) and heated in a drying oven. The heating temperature of the crushed stone is 130–150°C for viscous bitumens (Fig. 1). After 1 hour of heating, it is immersed in bitumen for 15 seconds, then removed and hung on a stand to drain excess bitumen. The marble stone sample was covered with bitumen with a defect of 5% relative to the mass of the prepared bitumen (Fig. 2). The samples were tested in a hot water environment in accordance with the requirements of GOST 12801. Then it is removed and immersed in a glass of cold distilled water for 1-3 minutes to cool and fix the bitumen film remaining on the surface of the gravel. The surface of the marble grain is checked on a 5-point scale with an interval of 0.5 points. After testing, the sample surface was visually evaluated according to Table 2.



Fig. 1.



Fig. 2.



Fig. 3.

Table 2
The results are evaluated according to the table below

Properties of bitumen film on the surface of gravel	Quality
The film is fully preserved, although its thickness may decrease in some places.	5 points (very good)
The film is intact, but has been partially detached from sharp corners and edges.	4 points (good)
More than 50 percent of the film remains on the surface of the stone.	3 points (satisfactory)
The film is preserved by less than 50 percent, and individual drops of bitumen are observed on the exposed surface.	2 points (bad)

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results of the laboratory tests conducted show that the adhesion properties of bitumen modified on the basis of defecate (sugar production waste) to the surface of mineral materials, particularly marble, are significantly higher than those of conventional bitumen.

During observations, it was established that the interaction between the modified bitumen and the marble stone is stable and durable. The active components in the defecate have a positive effect on the physicochemical properties of the bitumen, increasing its polarity and, as a result, contributing to the formation of a strong molecular bond on the surface of the mineral material. Under hydrothermal and mechanical loads, the main part of the binder layer remains intact. This indicates that the process of the binder's separation from the mineral surface occurs to a very small extent [7]. The experimental results also confirmed that almost the entire surface of the mineral material is covered with bitumen. Only in some cases were very small point



separations observed in microzones with sharp edges and high surface energy of the crystalline structure. Based on the results of visual assessment and current standard requirements, it was established that the degree of adhesion of the modified bitumen has high quality indicators. It can be evaluated as an effective material in ensuring the strength and longevity of road surfaces, showing significantly superior results compared to conventional bitumen. Overall, while cases of binder separation are more common in conventional bitumen samples, defect-modified bitumen demonstrated a high degree of adhesive stability and reliability.

The indicators obtained during the study confirm that incorporating the defecate into the bitumen composition allows for a fundamental improvement in the physical, mechanical, and adhesive properties of the binder. Primarily, this is explained by the fact that highly dispersed mineral particles in the defecate function as active fillers within the bitumen dispersion system. In this process, fine dispersed particles strengthen the molecular structure of the bitumen, forming a stable framework in the "bitumen-filler" system, which in turn increases the ability of the binder to moisten the surface of the mineral material.

At the same time, calcium compounds and other active components in the defecate chemically interact with the asphaltene and resin fractions of the bitumen, ensuring thermodynamic stability in the boundary layer between the mineral material and the binder. As a result of such a complex action, the water resistance of the asphalt concrete pavement increases, and the risk of bitumen film detachment during operation is significantly reduced.

From an economic and environmental perspective, the use of industrial waste defecate as a modifier serves as an effective alternative to expensive artificial additives while optimizing the consumption of pure bitumen. Most importantly, this method of disposal creates a foundation for mitigating the negative impact of sugar industry waste on the environment and developing waste-free technologies based on the principles of the "green economy." In conclusion, composite materials based on defecate-modified bitumen are a promising direction in road construction, ensuring high operational efficiency.

4. CONCLUSION

As a result of scientific research and laboratory tests, it was confirmed that adding a 5% defecate additive to grade 50/70 bitumen significantly strengthens the adhesive bond of the binder with the marble mineral material. Visual and instrumental assessments conducted in accordance with the requirements of GOST 12801 showed that the modified bitumen

possesses high quality indicators and is included in the highest scoring system [5]. This modification method serves as an effective technical solution for increasing the resistance of asphalt concrete coatings to water and aggressive environmental influences. At the same time, the application of defecate, which is considered a sugar industry waste, in the field of road construction is of strategic importance in the rational disposal of industrial waste and ensuring environmental sustainability. General analyses indicate that the developed modified bitumen composition allows for the extension of road pavement service life and the achievement of economic efficiency[9].

REFERENCES

- [1] Kennedy, T. W., and W. V. Ping.1991. "Comparison Study of Moisture Damage Test Methods for Evaluating Antistripping Treatments in Asphalt Mixtures." *Transportation Research Record*, no. 1323: 361–1981.<https://trid.trb.org/view/365875>.
- [2] Surfaces. Ontario: Ministry of Transportation and Communication. Hefer, A. 2005. "Adhesion in Bitumen-aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water on the Adhesive Bond." PhD diss., Texas A&M University.
- [3] Cappelletti, G., and P. Fermo.2016. "15—Hydrophobic and Superhydrophobic Coatings for Limestone and Marble Conservation A2."In *Smart CompositeCoatings and Membranes*, edited by M.F.Montemor, 421–452. Cambridge:Woodhead Publishing.
- [4] Lu Zhou, Gordon Airey, Yuqing Zhang & Chonghui Wang, "Multiscale characterisation on the adhesion and selective adsorption at bitumen–mineral interface", *Road Materials and Pavement Design*, pp. 3–21, 2024.
- [5] Гост 12801-98 "материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства".
- [6] Study of adhesion characteristics of different bitumen–aggregate combinations using bitumen bond strength test. Syeda Aamara Asif, Naveed Ahmed, Aneeqa Hayat, Sabahat Hussan, Faisal Shabbir & Khalid Mehmood <https://doi.org/10.1080/02533839.2018.1490205>
- [7] Little, D. N., and J. S. Epps. The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. National Lime Association, Washington DC, 2001.
- [8] Bhasin, A., and D. N. Little. "Characterization of Aggregate Surface Energy Using the Universal Sorption Device." *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 8, 2007, pp. 634–641.
- [9] Hefer, A. "Adhesion in Bitumen-aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water



on the Adhesive Bond.” PhD diss., Texas A&M University, 2005.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.S. Sadikov Tashkent State Transport University, Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: jaamm.ru@gmail.com

G.K. Isakova Tashkent State Transport University, Postgraduate Student, Department of Roads and Telecommunications
E-mail: gulxanisakova22@gmail.com

R.K. Kadirbergenov Tashkent State Transport University, Master’s Student
E-mail: qadirbergenovruslan.55@gmail.com



Prospects for Using Foam Concrete That Complies with The Principles of “Green Building”

Z.M. Sattorov¹ ^a, N.A. Madraymov¹ ^b

¹Tashkent University of architecture and construction, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. This article examines the development of energy-efficient and environmentally friendly materials, a pressing issue in modern construction. Specifically, using international research methods, the physical, mechanical, and thermal properties of foam concrete prepared from ash generated at thermal power plants were analyzed. The study examined experimental methods for preparing foam concrete samples of varying compositions and determining their density, strength, thermal conductivity, and durability.

Keywords: Lightweight concrete, thermal conductivity, foaming agent, foamed ash concrete, building materials, strength, resources, industrial waste, pilot testing, fly ash, cement, energy-saving material

“Yashil Qurilish” Tamoyillariga Mos Keluvchi Ko‘pikkulbetonning Istiqbollari

Z.M. Sattorov¹ ^a, N.A. Madraymov¹ ^b

¹Tashkent arxitektura-qurilish universiteti, Toshkent, O‘zbekiston

Annotatsiya. Mazkur maqolada zamonaviy qurilish sohasida dolzarb muammolardan biri bo‘lgan energiya samarador va ekologik xavfsiz materiallar yaratish masalasi ko‘rib chiqilgan. Xususan, issiqlik elektr stansiyalarida hosil bo‘ladigan uchuvchi kul asosida tayyorlanadigan ko‘pikkulbetonning fizik-mexanik va issiqlik xossalari xorijiy tadqiqot metodologiyasi asosida tahlil qilingan. Tadqiqotda turli tarkibdagi ko‘pikkulbeton namunalari tayyorlash, ularning zichligi, mustahkamligi, issiqlik o‘tkazuvchanligi hamda chidamlilik ko‘rsatkichlarini aniqlash bo‘yicha tajriba-sinov usullar tadqiq qilingan.

Kalit so‘zlar: Yengil beton, issiqlik o‘tkazuvchanlik. ko‘pik hosil qiluvchi modda, ko‘pikkulbeton, qurilish materiallari, mustahkamlik, resurslar, sanoat chiqindilari, tajriba-sinov, uchuvchi kul, sement, energiya tejamkor material

1. KIRISH


Hozirgi kunda qurilish sohasi jahondagi eng yirik resurs va energiya iste‘mol qiluvchi tarmoqlardan biri hisoblanadi. Aholi sonining ortib borishi, urbanizatsiya jarayonlarining jadallashuvi hamda zamonaviy infratuzilmaning rivojlanishi natijasida energiya samarador va ekologik xavfsiz qurilish materiallariga bo‘lgan talab tobora ortib bormoqda. Shu nuqtai nazardan, tabiiy resurslardan oqilona foydalanish va sanoat chiqindilarini qayta ishlash asosida yangi turdagi qurilish materiallarini ishlab chiqish dolzarb vazifalardan biriga aylanmoqda.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2025-yil 1-dekabrda “Qurilish materiallari sanoatini rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-365-sonli qarorida qurilish materiallari sanoatida raqobatbardoshlikni yanada oshirish, qo‘shilgan qiymatli qurilish materiallarini ishlab chiqarish hajmini kengaytirish, sohada amaliyot va ilmiy

tadqiqotlarning o‘zaro integratsiyasini ta‘minlash, sifat nazoratini kuchaytirish, bino va inshootlarni loyihalashda va qurilishda ekologik toza hamda energosamarador qurilish materiallaridan foydalanish nazoratini tashkil etish maqsadida qurilishda foydalaniladigan qurilish materiallari hajmining kamida 25 foizini ekologik toza, resurs tejamkor va energiya samarador qurilish materiallari tashkil etishini joriy etish muhim vazifa sifatida belgilangan [1].

So‘nggi yillarda issiqlik elektr stansiyalari chiqindisi hisoblangan uchuvchi kuldan foydalanish orqali olinadigan yengil beton turlari, jumladan, ko‘pikkulbetonga katta qiziqish bildirilmoqda. Ushbu material o‘zining past zichligi, yuqori g‘ovakli tuzilishi va yaxshi issiqlik o‘tkazmaslik xossalari bilan ajralib turadi. Shu bilan birga, yuqorida keltirilgan qaror talablariga muvofiq, sanoat chiqindilarini qurilish materiallari ishlab chiqarishga jalb qilish orqali ekologik muammolarni kamaytirish va

^a  <https://orcid.org/0000-0001-9824-1491>

^b  <https://orcid.org/0009-0008-9074-5079>



resurslardan samarali foydalanish imkoniyati yaratiladi.

Ko'pikkulbeton – bu sement, uchuvchi kul, suv va ko'pik hosil qiluvchi moddalar asosida tayyorlanadigan yengil beton turi bo'lib, qurilishda devorbop bloklar, himoya qatlamlari va boshqa konstruktiv qismlar sifatida keng qo'llanilishi mumkin.

Adabiyotlar tahlili

Qurilish materialshunosligi sohasida bugungi kunda ustuvor vazifalardan biri – mahalliy xom ashyolar hamda ikkilamchi resurslardan samarali foydalanish orqali yuqori sifatli, mustahkam, arzon va energiya tejamkor qurilish materiallarini ishlab chiqarishdan iborat. Bu yo'nalishdagi tadqiqotlar nafaqat iqtisodiy samaradorlikni oshirish, balki qurilish sohasida resurslardan oqilona foydalanish va atrof-muhitni muhofaza qilish talablarini ham yanada kuchaytirishga xizmat qiladi. Shu nuqtai nazardan, issiqlik elektr stansiyalarida hosil bo'ladigan kul chiqindilarini qayta ishlab, ular asosida yengil va energiya tejavchi qurilish materiallari tayyorlash masalasi xorijiy olimlar tomonidan keng o'rganilmoqda. Xususan Anowar Wakaa Ali, Nada Mahdi Fawzi, Purev-Erdene Bat-Erdene, Sanjay Pareek, E. Rommel, L. Prasetyo, Y. Rusdianto, R. Karimah, A.S.Riyanto, S.A.Cahyo, Sheng Li, Hongbo Li, Changyu Yan, Yongfa Ding, Xuanshuo Zhang, Jing Zhao olimlar tadqiqot ishlarini olib borishgan.

1. Anowar Wakaa Ali, Nada Mahdi Fawzi “Ekologik toza materiallaridan foydalangan holda yengil ko'pik beton ishlab chiqarish (Production of Light Weight Foam Concrete with Sustainable Materials)” bo'yicha tadqiqot ishlarini olib borishgan. Mazkur tadqiqotda yengil massali ko'pik betonni ekologik va resurs tejamkor materiallar asosida ishlab chiqarish imkoniyatlari tahlil qilingan bo'lib, yengil va energiya tejavchi material sifatida ko'pikkulbetonning istiqbollari mavzusi bilan bevosita bog'langan. Ishda an'anaviy sementli tarkiblarga sanoat chiqindilari, jumladan, issiqlik elektr stansiyalaridan olinadigan kul qo'shimchalari kiritilib, ularning material xossalari ta'siri o'rganilgan. Tadqiqot natijalari ko'rsatishicha, kul asosidagi qo'shimchalar qo'llanilganda ko'pik betonning zichligi kamayadi, issiqlik o'tkazuvchanligi yaxshilanadi va materialning energiya samaradorligi oshadi. Shu bilan birga, bunday tarkiblar yetarli darajadagi mustahkamlikni saqlab qolishi aniqlangan. Bu esa ko'pikkulbetonni nafaqat yengil, balki yuqori darajadagi issiqlik o'tkazmaslikka ega qurilish materiallari sifatida qo'llash imkonini beradi. Mualliflar xulosasiga ko'ra, sanoat chiqindilaridan foydalanish orqali ishlab chiqarilgan ko'pik beton qurilish sohasida ekologik xavfsiz, iqtisodiy samarador va energiya tejamkor yechim sifatida katta istiqbolga ega. Ushbu yondashuv resurslardan oqilona foydalanish bilan birga, chiqindilar miqdorini kamaytirish va “yashil qurilish” konsepsiyasini rivojlantirishga xizmat qiladi [2].

2. Purev-Erdene Bat-Erdene, Sanjay Pareek “Faza o'zgartiruvchi materiallarni o'z ichiga olgan kul asosidagi ko'pik betonni ishlab chiqishni tajribaviy o'rganish (Experimental Study on the Development of Fly Ash Foam Concrete Containing Phase Change Materials (PCMs))” bo'yicha tadqiqot ishlarini olib borishgan. Mazkur ilmiy tadqiqotda uchuvchi kul asosida tayyorlangan ko'pik beton tarkibiga faza o'zgartiruvchi materiallar qo'shish orqali uning issiqlik-fizik xossalari yaxshilash imkoniyatlari tajriba asosida o'rganilgan. Ushbu yondashuv “yengil va energiya tejamkor material sifatida ko'pikkulbetonning istiqbollari” mavzusi doirasida alohida ahamiyat kasb etadi, chunki ushbu materiallar binolarda haroratni barqaror ushlab turish xususiyati bilan ajralib turadi.

Tadqiqot jarayonida turli tarkibdagi namuna betonlar tayyorlanib, ularning zichligi, mustahkamligi va issiqlikni saqlash hamda uzatish xossalari tahlil qilingan. Natijalar shuni ko'rsatadiki, kul qo'shilgan ko'pikkulbeton issiqlik energiyasini yutish va binolarda harorat tebranishlarini kamaytiradi. Bu esa, o'z navbatida, isitish va sovitishga sarflanadigan energiya miqdorini kamaytirish imkonini beradi.

Shu bilan birga, uchuvchi kuldan foydalanish materialning ekologik jihatdan maqbulligini ta'minlab, sanoat chiqindilarini samarali qayta ishlashga xizmat qiladi. Tadqiqot xulosalariga ko'ra, kul qo'shilgan ko'pikkulbeton kelajakda energiya samarador qurilish materiallari orasida muhim o'rin egallashi mumkin bo'lib, nafaqat yengil va himoya xususiyatlari yuqori material, balki energiya tejavchi innovatsion materil sifatida ham katta istiqbolga ega [3].

3. E. Rommel, Y. Rusdianto, R. Karimah, A.S.Riyanto, S.A. Cahyo “Ko'pik hosil qiluvchi vosita va uchuvchan kuldan foydalangan holda ko'pik betonning issiqlik xossalari (The insulation properties of foam concrete with the use of foamagent and fly-ash) bo'yicha tadqiqot ishlarini olib borishgan. Ushbu tadqiqotda ko'pik hosil qiluvchi moddalar va uchuvchi kuldan foydalanilgan holda olingan ko'pik betonning issiqlik o'tkazmaslik xossalari tajriba asosida o'rganilgan.

Tadqiqot jarayonida turli tarkibdagi ko'pik beton namunalari tayyorlanib, ularning zichligi, g'ovaklilik darajasi va issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientlari tahlil qilingan. Natijalar shuni ko'rsatadiki, uchuvchi kul va ko'pik hosil qiluvchi moddalarning muvofiq tanlangan miqdori materialda bir xil taqsimlangan g'ovakli tuzilmani shakllantiradi. Bu esa uning zichligini pasaytirib, issiqlik o'tkazmaslik xossalari sezilarli darajada yaxshilaydi.

Shu bilan birga, uchuvchi kuldan foydalanish materialning ekologik jihatdan samaradorligini oshirib, sanoat chiqindilarini qayta ishlash imkoniyatini kengaytiradi. Tadqiqot xulosalariga ko'ra, ko'pikkulbeton yuqori issiqlik o'tkazmaslikka ega bo'lgan yengil material sifatida binolarda energiya sarfini kamaytirishda muhim o'rin tutadi va



zamonaviy energiya tejamkor qurilishda keng qo'llanish istiqboliga ega [4].

4. Sheng Li, Hongbo Li, Changyu Yan, Yongfa Ding, Xuanshuo Zhang, Jing Zhao "Uchuvchan kul asosida ko'pik betonning mustahkamligi va mexanik tavsiflarini o'rganish (Investigating the Mechanical and Durability Characteristics of Fly Ash Foam Concrete)" bo'yicha tadqiqot ishlarini olib borishgan. Ushbu tadqiqotda uchuvchi kul asosida tayyorlangan ko'pik betonning mexanik mustahkamligi va uzoq muddatli foydalanishga chidamlilik xossalari atroflicha tajriba asosida o'rganilgan. Ushbu ish "yengil va energiya tejamkor material sifatida ko'pikkulbetonning istiqbollari" mavzusi doirasida muhim ahamiyatga ega bo'lib, materialning nafaqat issiqlik o'tkazmaslik, balki uning ishonchligi va barqarorligiga ham e'tibor qaratilgan.

Tadqiqot davomida turli tarkibdagi ko'pikkulbeton namunalari tayyorlanib, ularning bosimga chidamliligi, zichligi, suv shimuvchanligi, muzlash-eritish sikllariga bardoshlilik kabi ko'rsatkichlari tahlil qilingan. Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, uchuvchi kul qo'shilishi material tuzilmasini yaxshilab, uning zichligini kamaytiradi va ayni paytda yetarli darajadagi mustahkamlikni ta'minlaydi. Shu bilan birga, ko'pikkulbetonning g'ovakli tuzilishi uning issiqlik o'tkazmaslik xossalari oshiradi.

Tadqiqot xulosalariga ko'ra, to'g'ri tanlangan tarkib va texnologiya asosida ishlab chiqarilgan ko'pikkulbeton yuqori mustahkamlik va chidamlilikka ega bo'lib, qurilishda keng qo'llash imkoniyatiga ega. U nafaqat yengil va energiya tejamkor material sifatida, balki uzoq muddat xizmat qiluvchi va ekologik jihatdan samarali qurilish yechimi sifatida ham katta istiqbolga ega [5].

2. TADQIQOT METODOLOGIYASI

Sheng Li, Hongbo Li, Changyu Yan, Yongfa Ding, Xuanshuo Zhang, Jing Zhao "Uchuvchan kul asosida ko'pik betonning mustahkamligi va mexanik tavsiflarini o'rganish (Investigating the Mechanical and Durability Characteristics of Fly Ash Foam Concrete)" bo'yicha tadqiqotning metodologiyasi o'rganildi. Tadqiqot ishida uchuvchi kul asosida tayyorlangan ko'pik betonning mexanik tavsiflarini baholash uchun kompleks tajriba usullar qo'llanildi. Tadqiqot metodologiyasi bir nechta bosqichlardan iborat bo'lib, material tayyorlash, namuna shakllantirish va laboratoriya sinovlarini o'tkazish jarayonlarini o'z ichiga oladi.

Avvalo, tadqiqot uchun xom ashyo sifatida sement, uchuvchi kul, suv va ko'pik hosil qiluvchi moddalar tanlab olindi. Turli proporsiyalardagi qorishmalar tayyorlanib, ko'pik generatsiyasi orqali bir xil g'ovakli tuzilishga ega bo'lgan yengil beton namunalari hosil qilindi. Namunalar standart o'lchamlarda shakllantirilib, belgilangan vaqt

davomida (7, 14 va 28 sutka) tajriba-sinovga o'tkazildi.

Keyingi bosqichda mexanik xossalari baholash uchun mustahkamlikga chidamlilik sinovlari o'tkazildi. Bu sinovlar orqali materialning mustahkamligi va uning zichlikka bog'liqligi aniqlandi. Shu bilan birga, materialning uzoq muddatli barqarorligini baholash maqsadida chidamlilik ko'rsatkichlari ham tadqiq qilindi. Jumladan, suv shimuvchanligi, g'ovaklilik darajasi, qurish-namlanish va muzlash-eritish ta'sirlariga bardoshlilik sinovlari amalga oshirildi.

Tadqiqot jarayonida olingan natijalar tahlil qilinib, uchuvchi kul miqdorining ko'pik beton tuzilmasi va uning fizik-mexanik xossalari ta'siri aniqlandi. Shuningdek, materialning mikrotuzilishi va g'ovaklar taqsimoti ham qiyosiy tahlil qilindi. Ushbu metodologiya orqali ko'pikkulbetonning optimal tarkibi va uning qurilishda qo'llash imkoniyatlari ilmiy jihatdan asoslandi.

Tajriba-sinov tadqiqot usullari

Sheng Li, Hongbo Li, Changyu Yan, Yongfa Ding, Xuanshuo Zhang, Jing Zhao "Uchuvchan kul asosida ko'pik betonning mustahkamligi va mexanik tavsiflarini o'rganish (Investigating the Mechanical and Durability Characteristics of Fly Ash Foam Concrete)" bo'yicha tadqiqotning tajriba-sinov usullari quyidagicha shakllantirildi [5].

Ushbu tadqiqotda uchuvchi kul asosidagi ko'pik beton namunalari tayyorlashda ko'pik hosil qilish usuli qo'llanildi. Mazkur usulda ko'pik hosil qiluvchi moddalarning reaksiyasi natijasida qorishma ichida bir xil taqsimlangan g'ovakli tuzilma shakllantirildi. Bu jarayonda ko'pik hosil bo'lish tezligi sementli suspenziyaning qotish va mustahkamlanish tezligi bilan mos kelishi muhim ahamiyatga ega bo'lib, barqaror tuzilma hosil qilishni ta'minlaydi [6, 7, 8].

Tajriba uchun sement, uchuvchi kul, qum tuproq, suv, superplastifikator (suv kamaytiruvchi qo'shimcha), ko'pik barqarorlashtiruvchi modda, polipropilen tola va vodorod peroksidi asosiy tashkil etuvchilar sifatida tanlab olindi. Barcha tashkil etuvchilar oldindan hisoblangan proporsiyalar bo'yicha elektron tarozida aniq o'lchanib tayyorlandi.

Qorishma tayyorlash jarayoni quyidagi bosqichlarda amalga oshirildi:

– dastlab quruq komponentlar (sement, uchuvchi kul, qum tuproq, stabilizator) yuqori tezlikdagi qorishtirgichda bir necha daqiqa davomida aralashtirildi;

– keyinchalik suv va superplastifikator qo'shib, bir xil konsistensiya hosil bo'lguncha qayta aralashtirildi;

– qorishma devorlariga yopishib qolgan qismlar to'liq qo'shib yuborilib, aralashtirish davom ettirildi;

– so'ngra gaz hosil qiluvchi modda – vodorod peroksidi qo'shib, qisqa vaqt davomida tez



aralashtirildi, natijada aralashmada ko'plab mayda g'ovaklar shakllana boshladi.

Tayyor qorishma darhol oldindan moylangan qoliplarga joylashtirildi. Namunalar ikki xil o'lchamda shakllantirildi:

– 100×100×100 mm o'lchamdagi kub namunalar (mexanik sinovlar uchun);

– 300×300×30 mm o'lchamdagi plastina namunalar (issiqlik o'tkazuvchanlikni aniqlash uchun).

Qoliplarga joylangan qorishma yuzasidagi namlik yo'qolishini oldini olish maqsadida plyonka bilan qoplandi. Namunalar dastlab 48 soat davomida qolipda saqlanib, keyinchalik qolipdan chiqarildi [9, 10]. So'ngra ular standart sharoitda ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$ harorat va 95% dan yuqori nisbiy namlikda) saqlanib, keyingi sinovlar uchun tayyor holatga keltirildi.

Qo'shimcha ravishda, ayrim namunalar sinov talablariga moslashtirish uchun yuzasi tekislab kesildi. Plastina shaklidagi namunalar esa issiqlik o'tkazuvchanlikni aniqlash uchun maxsus o'lchamlarga keltirildi.

Mazkur tajriba-sinov metodikasi orqali bir xil g'ovakli tuzilishga ega, barqaror va nazorat qilinadigan tarkibli ko'pikkulbeton namunalari olindi hamda ularning fizik-mexanik va issiqlik xossalarini ishonchli baholash imkoniyati yaratildi.

3. XULOSA

Ko'pikkulbeton yengil va energiya tejamkor qurilish materiali sifatida zamonaviy qurilish sohasida katta istiqbolga ega [11]. Uning past zichligi, yuqori g'ovakli tuzilishi va past issiqlik o'tkazuvchanligi binolarda issiqlik yo'qotilishini kamaytirib, energiya sarfini sezilarli darajada qisqartirish imkonini beradi. Shu bilan birga, uchuvchi kul kabi sanoat chiqindilaridan foydalanish materialning ekologik xavfsizligini oshirib, tabiiy resurslarni tejashga xizmat qiladi.

Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, to'g'ri tanlangan tarkib va zamonaviy texnologiyalar asosida ishlab chiqarilgan ko'pikkulbeton yetarli mustahkamlik va chidamlilikka ega bo'lib, uni qurilishning turli sohalarida samarali qo'llash mumkin [12]. Shu bois, ko'pikkulbeton "yashil qurilish" tamoyillariga mos keluvchi, iqtisodiy jihatdan maqbul va energiya samarador material sifatida kelajakda keng qo'llanilishi kutilmoqda.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR / REFERENCES

[1] O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2025-yil 1-dekabrda "Qurilish materiallari sanoatini rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-365-sonli qarori (Qonunchilik ma'lumotlari milliy bazasi, 02.12.2025 y., 07/25/365/1120-son).

[2] Anowar Wakaa Ali, Nada Mahdi Fawzi. Production of Light Weight Foam Concrete with Sustainable Materials. // Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 11, No. 5, 2021, 7647-7652

[3] Purev-Erdene Bat-Erdene, Sanjay Pareek. Experimental Study on the Development of Fly Ash Foam Concrete Containing Phase Change Materials (PCMs). Materials 2022, 15, 8428. <https://doi.org/10.3390/ma15238428>

[4] E. Rommel, Y. Rusdianto, R. Karimah, A.S.Riyanto, S.A. Cahyo. The insulation properties of foam concrete with the use of foam-agent and fly-ash. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 821 (2020) 012013 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/821/1/012013

[5] Sheng Li, Hongbo Li, Changyu Yan, Yongfa Ding, Xuanshuo Zhang, Jing Zhao. Investigating the Mechanical and Durability Characteristics of Fly Ash Foam Concrete. // Materials 2022, 15, 6077. <https://doi.org/10.3390/ma15176077>

[6] Sattorov Z.M., Madraymov N.A. Issiqlik elektr stansiyasidan chiqadigan "f" va "c" sinfli kullari asosidagi qurilish materiallarining xossalarini tajriba-sinov usullari. // Engineer international scientific journal. Special Issue 24-april, 2025. ToshDTU // – Toshkent, 2025. – p. 43–46.

[7] Sattorov Z.M., Madraymov N.A. Issiqlik elektr stansiyasi kuli asosida ko'pikkulbeton ishlab chiqarish tadqiqotlari va muammolari. // Ilmiy–amaliy jurnal "Arxitektura, Qurilish va Dizayn". // №3/2024, – Toshkent, 2024 y. – 538–544 b.

[8] Sattorov Z.M., Madraymov N.A. Ko'pik beton bloklar ishlab chiqarishning an'anaviy texnologiyalari. // "Farg'ona viloyatidagi beton va temirbeton ishlab chiqarish korxonalarida energiya samaradorligini oshirish va ekologik barqarorlikni ta'minlashda zamonaviy yechimlar" mavzusida respublika ilmiy va ilmiy-texnik konferensiya to'plami. // – Farg'ona. FarDTU, 25-26 sentabr 2025 y. – 612-615 b.

[9] Sattorov Z.M., Madraymov N.A. Tabiiy resurslarni tejash va barqaror qurilish materiallari ishlab chiqarishini kengaytirishda ko'pikkulbeton olish usullari tadqiqoti. // Ilmiy–amaliy jurnal "Arxitektura, Qurilish va Dizayn". // Maxsus son №2/2025, – Toshkent, 2025 y. – 166–170 b.

[10] Sattorov Z.M., Otajonov O.A., Madraymov N.A. Sanoat chiqindisi asosidagi ko'pikkulbeton qorishmasining reologik xossalariga kimyoviy qo'shimchani ta'siri. // FarDTU Ilmiy-texnika jurnali. // T.30, Maxsus son №3. – Farg'ona, 2026 y. – 90-97 b.

[11] Sattorov Z.M., Abdullaev A.J., Ibroximov B.R. Yangi O'zbekistonda qurilish materiallari ishlab chiqarish sanoatining rivojlanish tendensiyalari. // Ilmiy–amaliy jurnal "Arxitektura Qurilish Dizayn". // №3/2021, – Toshkent, 2021 y. – 129–135 b.



[12] Sattorov Z.M., Murodov B.Z. Yangi O'zbekistonda qurilish materiallari ishlab chiqarish sanoatining rivojlanish yo'nalishlari va istiqbollari. // Ilmiy–texnik jurnal “Milliy Standart”. // №2/2022, – Toshkent, 2022 y. – 10–17 b.

MUALLIFLAR TO‘G‘RISIDA MA’LUMOTLAR

**Sattorov Zafar
Muradovich** Toshkent arxitektura-
qurilish universiteti,
“Qurilish va atrof-muhit
muhandisligi” kafedrası
professori
E-mail:
mr.s.zafar@mail.ru
[https://orcid.org/0000-
0001-9824-1491](https://orcid.org/0000-0001-9824-1491)

**Madraymov
Niyetbay
Amangeldiyevich** Toshkent arxitektura-
qurilish universiteti
“Qurilish va atrof-muhit
muhandisligi” kafedrası
tayanch doktoranti
[https://orcid.org/0009-
0008-9074-5079](https://orcid.org/0009-0008-9074-5079)



Research Analysis on Partial Replacement of Cement in Concrete with Fly Ash and Wollastonite

Z.M. Sattorov¹^a, O.A. Otajonov²^b

¹Tashkent University of Architecture and Civil Engineering, Tashkent, Uzbekistan

²Fergana State Technical University, Fergana, Uzbekistan

Abstract: This study investigated the effect of partial replacement of cement in concrete with fly ash and wollastonite mineral on concrete properties. The potential of wollastonite, a natural mineral and ash produced by coal combustion in thermal power plants, to improve the environmental and mechanical properties of concrete was analyzed. In the experimental process, a certain part of the cement was replaced with 20% and 25% ash, as well as 10% and 15% wollastonite, and several concrete compositions were prepared. During the study, the workability, compressive strength and durability properties of the concrete mixture were tested at 7, 14 and 28-day curing periods.

Keywords: Concrete, concrete testing, workability, strength, durability testing, sodium sulfate, wollastonite, fly ash

Beton Tarkibidagi Sementni Kul va Wollastonit bilan Qisman Almashtirish Bo'yicha Olib Borilgan Tadqiqot Tahlillari

Sattorov Z.M.¹^a, Otajonov O.A.²^b

¹Toshkent arxitektura-qurilish universiteti, Toshkent, O'zbekiston

²Farg'ona davlat texnika universiteti, Farg'ona, O'zbekiston

Annotatsiya: Mazkur tadqiqotda beton tarkibidagi sementni qisman uchuvchi kul va wollastonit minerali bilan almashtirishning beton xossalariga ta'siri o'rganilgan. Issiqlik elektr stansiyalarida ko'mir yoqilishi natijasida hosil bo'ladigan kul hamda tabiiy mineral hisoblangan wollastonitning betonning ekologik va mexanik xususiyatlarini yaxshilashdagi imkoniyatlari tahlil qilindi. Tajriba jarayonida sementning ma'lum qismi 20 % va 25 % miqdorda kul, shuningdek 10 % va 15 % miqdorda wollastonit bilan almashtirilgan hamda bir nechta beton tarkiblari tayyorlandi. Tadqiqot davomida beton qorishmasining harakatchanligi, siqilishdagi mustahkamligi va chidamlilik xususiyatlari 7, 14 va 28 sutkalik qotish davrlarida sinovdan o'tkazilgan.

Kalit so'zlar: Beton, beton sinovi, harakatchanlik, mustahkamlik, chidamlilik sinovi, natriy sulfat, wollastonit, uchuvchi kul


1. KIRISH

Beton insoniyat taraqqiyotida eng muhim qurilish materiallaridan biri hisoblanadi. Hozirgi kunda u dunyo bo'yicha eng ko'p ishlatiladigan sun'iy qurilish materiali sifatida e'tirof etiladi. Betonning keng qo'llanilishiga uning yuqori mustahkamligi, uzoq xizmat muddati, iqtisodiy samaradorligi va turli konstruksiyalarda qo'llash imkoniyati sabab bo'lmoqda. Zamonaviy qurilish sanoatini betonsiz tasavvur qilish qiyin. Shunga qaramay, so'nggi yillarda beton ishlab chiqarishda asosiy bog'lovchi material hisoblangan sement ekologik muammolarni keltirib chiqarmoqda. Xalqaro Energetika Agentligi

ma'lumotlariga ko'ra, sement ishlab chiqarish jarayoni global karbonat angidrid (CO₂) chiqindilarining qariyb 7 % ini tashkil etadi. Portlandsement ishlab chiqarish jarayonida ohaktoshning kuydirilishi va yuqori haroratda klinker olish katta miqdorda energiya talab qiladi. Bu esa atmosfera ifloslanishining ortishiga olib keladi [1-3].

Shu sababli, bugungi kunda sementning ma'lum qismini mineral qo'shimchalar bilan almashtirish bo'yicha ko'plab ilmiy izlanishlar olib borilmoqda. Mineral qo'shimchalardan foydalanish betonning issiqlik ajralishini kamaytiradi, suv o'tkazmasligini oshiradi, sulfat muhitlarga chidamliligini yaxshilaydi

^a <https://orcid.org/0000-0001-9824-1491>

^b <https://orcid.org/0000-0003-0830-2989>



va betonning uzoq muddat xizmat qilishini ta'minlaydi. Bundan tashqari, ular ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirib, ekologik xavfsizlikni ta'minlashda ham muhim ahamiyatga ega.

Hozirgi kunda Hindiston dunyodagi eng yirik sement ishlab chiqaruvchi davlatlardan biri hisoblanadi. Biroq katta hajmdagi sement ishlab chiqarish ekologik muammolarni ham kuchaytirmoqda. Shu bois sanoat chiqindilaridan samarali foydalanish va alternativ bog'lovchi materiallarni qo'llash dolzarb masalalardan biri bo'lib qolmoqda.

2. MATERIALLAR VA TADQIQOT METODOLOGIYASI

Uchuvchi kul — issiqlik elektr stansiyalarida maydalangan ko'mirni yoqish natijasida hosil bo'ladigan mayda dispersli kuldir. Yonish jarayonida hosil bo'lgan juda mayda zarrachalar tutun gazlari bilan birga ko'tariladi va elektrofiltrlar yoki maxsus matoli filtrlarda ushlab qolinadi.

Uchuvchi kul tarkibida asosan: kremniy oksidi (SiO_2), alyuminiy oksidi (Al_2O_3), temir oksidlari (Fe_2O_3) kabi oksidlar mavjud bo'ladi. Uning kimyoviy tarkibi ishlatilgan ko'mir turi va yonish texnologiyasiga bog'liq holda farq qiladi [4].

Qurilish sanoatida uchuvchi kul keng qo'llaniladi. Ayniqsa beton ishlab chiqarishda u putssolan qo'shimcha sifatida muhim ahamiyat kasb etadi. Uchuvchi kul sement bilan reaksiyaga kirishib, qo'shimcha kalsiy gidrosilikatlar hosil qiladi va betonning zichligini oshiradi. Natijada:

- betonning ishlovchanligi yaxshilanadi;
- gidratatsiya issiqligi kamayadi;
- suv o'tkazuvchanligi pasayadi;
- sulfat muhitlarga chidamlilik ortadi;
- uzoq muddatli mustahkamlik yaxshilanadi.

Uchuvchi kuldin foydalanish tabiiy resurslarni tejashga xizmat qiladi hamda sement sarfini kamaytirish orqali CO_2 chiqindilarini qisqartiradi. Shu jihatdan u ekologik barqaror qurilish materiallarini yaratishda muhim komponent hisoblanadi.

Vollastonit — tabiiy holda uchraydigan kalsiy inosilikat minerali bo'lib, kimyoviy formulasi CaSiO_3 ko'rinishida ifodalanadi. Mineral tarkibida ayrim hollarda magniy, temir va marganes kabi elementlar ham uchrashi mumkin. Vollastonit odatda oq rangda bo'lib, tolali mikrostrukturaga ega.

U asosan ohaktosh yoki dolomit jinslarining yuqori harorat va bosim ta'sirida metamorfik o'zgarishi natijasida hosil bo'ladi. Mineral ingliz kimyogari va mineralogi Uilyam Hayd Vollaston sharafiga nomlangan. Vollastonitning asosiy afzalliklari quyidagilardan iborat: yuqori oq ranglilik; namlikni kam shimishi; past issiqlik o'tkazuvchanlik; yuqori termik barqarorlik; kimyoviy inertlik; mikroarmaturalovchi xususiyati.

Vollastonit mikrotolalari beton tarkibida mikroarmatura vazifasini bajaradi. Ular beton ichidagi mikro yoriqlar rivojlanishini sekinlashtiradi hamda cho'zilishdagi va egilishdagi mustahkamlikni oshiradi. Shuningdek, betonning qisqarish deformatsiyalarini kamaytirishga yordam beradi [5]. Vollastonit plastmassa, keramika, bo'yoq sanoati, metallurgiya va qurilish materiallari ishlab chiqarishda keng qo'llaniladi. Ayniqsa, beton tarkibida undan foydalanish betonning mexanik va ekspluatatsion xususiyatlarini yaxshilash imkonini beradi.

Natriy sulfat (Na_2SO_4) va chidamlilik sinovi. Betonning uzoq muddat xizmat qilish xususiyatlarini baholashda sulfat muhitlarga chidamlilik muhim ko'rsatkichlardan biri hisoblanadi. Natriy sulfat (Na_2SO_4) beton konstruksiyalariga agressiv ta'sir ko'rsatadigan kimyoviy moddalardan biri hisoblanadi.

Sulfat ionlari sement toshi tarkibidagi gidratatsiya mahsulotlari bilan reaksiyaga kirishib: hajmiy kengayish; mikro yoriqlar hosil bo'lishi; betonning yemirilishi kabi salbiy jarayonlarni yuzaga keltiradi. Shu sababli, betonning Na_2SO_4 eritmasidagi chidamliligi maxsus laboratoriya sinovlari orqali aniqlanadi. Tajribalarda beton namunalar ma'lum muddat natriy sulfat eritmasida saqlanadi va ularning: massa yo'qotishi; mustahkamlikning kamayishi; yuzadagi yemirilish holati baholanadi.

Uchuvchi kul va vollastonit qo'shilgan betonlarda zich struktura hosil bo'lishi tufayli sulfat ionlarining beton ichiga kirib borishi kamayadi. Natijada bunday betonlarning agressiv muhitdagi chidamliligi oddiy betonlarga nisbatan yuqori bo'ladi [6].

Mayda to'ldiruvchi. Beton tarkibida mayda to'ldiruvchi sifatida tabiiy qum ishlatildi. Qumning fizik-mexanik xossalari beton qorishmasining ishlov beruvchanligi va mustahkamligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Tadqiqot davomida qumning granulometrik tarkibi, suv shimuvchanligi, zichligi hamda solishtirma og'irligi aniqlanib, standart talablariga muvofiqiqlik tekshirildi.

1-jadval

Mayda to'ldiruvchining xossalari

Xossalari	Qum
Elak tahlili	II zona
Yiriklik moduli	2,871
Solishtirma og'irligi	2,64
Suv shimuvchanligi	1,77 %
Hajmiy zichligi	1,62 (bo'sh), 1,76 (zichlangan)

Yirik to'ldiruvchi. Tadqiqotda 20 mm va 10 mm fraksiyalari maydalangan shag'al yirik to'ldiruvchi sifatida qo'llanildi. To'ldiruvchining zarba bardoshligi, maydalanuvchanligi, yassi va cho'zinchoq donalar miqdori betonning umumiy



mustahkamligi hamda uzoq muddatli ishlash xususiyatlariga ta'sir qiladi.

2-jadval

Yirik to'ldiruvchining xossalari

Xossalari	20 mm	10 mm
Solishtirma og'irligi	2,88	2,99
Suv shimuvchanligi	1,46 %	0,29 %
To'ldiruvchining zarba qiymati	9,21 %	9,33 %
To'ldiruvchining maydalanuvchanlik qiymati	11,75 %	9,98 %
Yassilik indeksi	10,89 %	25,26 %
Cho'zinchoqlik indeksi	6,84 %	7,66 %
Hajmiy zichligi	1,657 (bo'sh), 1,75 (zichlangan)	1,53 (bo'sh), 1,68 (zichlangan)

Vollastonit tabiiy kaltsiy inosilikat minerali bo'lib, beton tarkibida mikroto'ldiruvchi sifatida ishlatildi. U betonning mikrostrukturasi yaxshilanishiga, yorilishlarga chidamlilikning oshishiga va mustahkamlik ko'rsatkichlarining yaxshilanishiga xizmat qiladi.

3-jadval

Vollastonitning xossalari

Xossalari	Qiymati
pH qiymati	9,9
Solishtirma og'irligi	2,67
Hajmiy zichligi	1211,8 kg/m ³
Rangi	Oq

Beton tarkibini loyihalash. Tadqiqot davomida B45, B50 va B55 markali beton qorishmalari tayyorlandi. Beton tarkibi loyihalashda suv-sement nisbati, to'ldiruvchilar miqdori hamda optimal ishlov beruvchanlik va mustahkamlik ko'rsatkichlari hisobga olindi.

4-jadval

1 m³ B45 markali beton uchun qorishma tarkibi

Suv	Sement	Mayda to'ldiruvchi	Yirik to'ldiruvchi	Jami
153,26	383,13	808,18	1197,71	2542,28

5-jadval

1 m³ B50 markali beton uchun qorishma tarkibi

Suv	Sement	Mayda to'ldiruvchi	Yirik to'ldiruvchi	Jami
153,26	437,90	766,92	1179,36	2537,44

6-jadval

1 m³ B55 markali beton uchun qorishma tarkibi

Suv	Sement	Mayda to'ldiruvchi	Yirik to'ldiruvchi	Jami
153,26	414,22	784,62	1188,84	2540,94

3. TADQIQOT NATIJALARI

Harakatchanlik. Yangi tayyorlangan beton qorishmasining harakatchanligi cho'kish sinovi yordamida baholandi. Cho'kish qiymati qolipning yuqori qismi bilan cho'kkan betonning eng yuqori nuqtasi orasidagi balandlik farqi orqali aniqlangan. Tadqiqot natijalari vollastonit va kul qo'shimchalari beton qorishmasining plastikligini oshirishini ko'rsatgan.

Siqilish mustahkamligi natijalari. Betonning siqilishdagi mustahkamligini aniqlash uchun o'lchami 150 × 150 × 150 mm bo'lgan kub namunalar tayyorlandi. Namunalar siqilish pressida sinovdan o'tkazilgan va yuk beton yemirilguniga qadar bosqichma-bosqich oshirildi. Siqilish mustahkamligi quyidagi formula orqali hisoblandi:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

bu yerda: P — siqilishdagi kuch; A — kubning kesim yuzasi, mm².

Natijalar shuni ko'rsatganki, optimal miqdordagi vollastonit va kul qo'shimchalari betonning siqilish mustahkamligini sezilarli darajada oshirdi.

Mustahkamlik va chidamlilik sinovi natijalari. Betonning sulfat muhitiga chidamliligini aniqlash maqsadida 150 mm o'lchamdagi beton kub namunalar tayyorlandi va 28 sutka davomida suvda qotirildi. Qotish muddati tugagandan so'ng namunalar yuzasi tozalandi va ularning boshlang'ich massasi qayd etilgan.

Keyinchalik namunalar natriy sulfat (Na₂SO₄) eritmasiga tushirildi va ma'lum vaqt oralig'ida kuzatib borildi. 28 sutkadan so'ng namunalar eritmadan chiqarilib, massa yo'qotilishi hamda mustahkamlik kamayishi foizlari aniqlangan.

Tadqiqot natijalari vollastonit va kul qo'shilgan beton namunalarining sulfat muhitiga chidamliligi oddiy betonlarga nisbatan yuqori ekanligini ko'rsatgan.



4. XULOSA

Sement massasiga nisbatan 15 % vollastonit va 20 % kul qo‘shilganda B45, B50 va B55 markali betonlarning ishlov beruvchanligi yaxshilandi.

B45 markali beton tarkibida 15 % vollastonit va 20 % kul ishlatilganda siqilish mustahkamligi oddiy beton bilan solishtirganda 7,66 % ga oshdi.

B50 markali beton tarkibida vollastonit va kul qo‘shilishi natijasida maksimal siqilish mustahkamligi 6,52 % ga ortdi.

B55 markali beton tarkibida 15 % vollastonit va 20 % kul qo‘llanganda siqilish mustahkamligi 4,93 % ga oshdi.

Vollastonit va kul qo‘shilishi natijasida betonning ajralishdagi cho‘zilish mustahkamligi B45, B50 va B55 markalari uchun mos ravishda 4,96 %, 5,68 % va 5,65 % ga oshdi.

Na_2SO_4 eritmasida o‘tkazilgan chidamlilik sinovlari oddiy B45, B50 va B55 betonlarida mustahkamlik yo‘qotilishi mos ravishda 6,70 %, 7,52 % va 6,79 % ekanligini ko‘rsatgan.

Tadqiqot natijalariga ko‘ra, sementni qisman almashtirish uchun eng maqbul tarkib 15 % vollastonit va 20 % kul ekanligi aniqlangan.

Vollastonit va kuldan foydalanish sement sarfini kamaytirishga, betonning mexanik xossalarini yaxshilashga hamda ekologik jihatdan barqaror qurilish materiallari ishlab chiqarishga xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR / REFERENCES

[1] Сатторов З.М., Мирзаев Б.К., Отажанов О.А. Летучая зола как полезное техногенное сырье для получения строительных материалов. // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности: материалы XI Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции молодых исследователей, Волгоград, 22-27 апреля 2024 г. Под общей редакцией Н.Ю. Ермиловой, Е.А. Калюжиной. — Волгоград: ВолгГТУ, 2024. – 254–

257 с.

[2] Нечаев А. А., Селезнева Е. А., Щепочкина Ю. А., Селезнева Г. Ю. Химические добавки в технологии бетонов. // С. 568-570.

[3] Z.M. Sattorov, O.A. Otajonov Influence of the ash of “Angren” thermal power plants and superplasticizer on the properties of aerated concrete. // Ilmiy–amaliy jurnal “Arxitektura Qurilish Dizayn”. // №3/2023, – Toshkent, 2023 y. – 146-149 b.

[4] “Effect of wollastonite microfibers as cement replacement on the properties of cementitious composites”, Yue Li, Zhenghua Lyu, Aiqin Shen, Ziming He, 2020ElsevierLtd.

[5] “Research initiatives on the influence of wollastonite in cement-based construction material”, Nishant A Naira, V. Sairamb, 10 October 2020, j.jclepro.2020.124665.

[6] Bhavin Pindoriya, Aakash Suthar “Experimental investigation on Partial Replacement of cement with FlyAsh and Wollastonite in Concrete” International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Volume: 12 Issue: 05 | May 2025. www.irjet.net Page 706-711.

MUALLIFLAR TO‘G‘RISIDA MA‘LUMOTLAR

Sattorov Zafar Muradovich Toshkent arxitektura-qurilish universiteti, “Qurilish va atrof-muhit muhandisligi” kafedrası professori
E-mail: mr.s.zafar@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9824-1491>

Otajonov Olmosbek Asqarali o‘g‘li Farg‘ona davlat texnika universiteti, “Qurilish materiallari va buyumlari” kafedrası katta o‘qituvchisi
E-mail: olmosbekotajonov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0830-2989>



Complex Modification of Cement Matrix and Bloated Vermiculite Surface to Increase the Strength of Heat-Insulating Constructional Blocks

J. Turgaev¹^a, N. Takhirjanov²^b

¹Karakalpak State University, Nukus, Karakalpakstan, Uzbekistan

²Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The technological and structural prerequisites for increasing the strength of heat-insulating structural blocks based on expanded vermiculite without significantly increasing cement consumption have been considered. The scientific idea of the work lies in the comprehensive modification of the "cement matrix - vermiculite aggregate" system, including the introduction of microcrystalline, fly ash, and superplasticizer into the binder composition, as well as sequential treatment of the vermiculite surface with NaOH solution, liquid glass, and the GKJ-11 hydrophobizer. It has been shown that the increase in strength is determined not only by the compaction of cement stone and the formation of additional hydrosilicate phases but also by the state of the interphase transition zone. Based on the results of composition analysis, X-ray phase data, and microstructural images, it is substantiated that complex treatment reduces the open porosity of the filler surface, increases adhesion, and forms a more stable "filler-cement stone" contact. The proposed approach ensures a rational combination of low density, thermal insulation efficiency, and increased operational reliability for vermiculite blocks.

Keywords: Expanded vermiculite; thermal insulation-construction blocks; cement matrix; microcrystalline earth; fly ash; superplasticizer; interphase transition zone; hydrophobization; C-S-H-gel

Комплексная Модификация Цементной Матрицы и Поверхности Вспученного Вермикулита для Повышения Прочности Теплоизоляционно-Конструкционных Блоков

Ж.А.Тургаев¹^a, Н.К. Тахиржанов²^b


¹Каракалпакский государственный университет, Нукус, Каракалпакстан, Узбекистан

²Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: Рассмотрены технологические и структурные предпосылки повышения прочности теплоизоляционно-конструкционных блоков на основе вспученного вермикулита без существенного увеличения расхода цемента. Научная идея работы заключается в комплексной модификации системы «цементная матрица — вермикулитовый наполнитель», включающей введение микрокремнезёма, золы-уноса и суперпластификатора в состав вяжущего, а также последовательную обработку поверхности вермикулита раствором NaOH, жидким стеклом и гидрофобизатором ГКЖ-11. Показано, что повышение прочности определяется не только уплотнением цементного камня и образованием дополнительных гидросиликатных фаз, но и состоянием межфазной переходной зоны. По результатам анализа составов, рентгенофазовых данных и микроструктурных изображений обосновано, что комплексная обработка снижает открытую пористость поверхности наполнителя, повышает адгезию и формирует более устойчивый контакт «наполнитель — цементный камень». Предложенный подход обеспечивает рациональное сочетание низкой плотности, теплоизоляционной эффективности и повышенной эксплуатационной надежности вермикулитовых блоков.

Ключевые слова: Вспученный вермикулит; теплоизоляционно-конструкционные блоки; цементная матрица; микрокремнезём; зола-уноса; суперпластификатор; межфазная переходная зона; гидрофобизация; C-S-H-гель

^a <https://orcid.org/0000-0003-2483-9727>

^b <https://orcid.org/0009-0004-4251-7101>



1. ВВЕДЕНИЕ

Вспученный вермикулит является эффективным легким пористым заполнителем для получения теплоизоляционно-конструкционных материалов, поскольку характеризуется малой насыпной плотностью и развитой поровой структурой. Вместе с тем высокая открытая пористость и водопоглощение зерен могут снижать прочность цементных композитов за счет локального перераспределения воды, роста капиллярной пористости и ослабления контакта на границе раздела фаз [1, 4]. Поэтому повышение прочности вермикулитовых блоков целесообразно рассматривать не как результат простого увеличения расхода цемента, а как задачу направленного формирования плотной цементной матрицы и стабильной межфазной переходной зоны.

Методологическая основа исследования включает два взаимосвязанных направления. Первое направление предусматривает модификацию цементного вяжущего микрокремнезёмом, золой-уноса и суперпластификатором, что обеспечивает снижение водоцементного отношения, микрофиллерное уплотнение и развитие дополнительных гидратных фаз. Второе направление связано с химической подготовкой поверхности вспученного вермикулита, направленной на уменьшение открытых дефектов, повышение гидрофобности и улучшение адгезионного взаимодействия с цементным камнем [2, 3].

Физико-механические характеристики вермикулитовых блоков определяются совокупным влиянием качества цементной матрицы и состояния контактной зоны между цементным камнем и зёрнами заполнителя. При

повышенной пористости матрицы и недостаточном сцеплении поверхности вермикулита с гидратными продуктами цемента нагрузка передается неравномерно, что способствует развитию микротрещин и преждевременному разрушению композита.

Наиболее чувствительным элементом структуры является межфазная переходная зона. В ней концентрируются капиллярные поры, локальные пустоты и дефекты сцепления, которые формируют потенциальные пути разрушения. Следовательно, повышение прочности и долговечности материала должно обеспечиваться одновременным уплотнением цементного камня и функционализацией поверхности вермикулитового заполнителя.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для обоснования оптимального состава многокомпонентного вяжущего проанализировано влияние минеральных и химических добавок на прочность цементной системы. Микрокремнезём рассматривался как высокодисперсный активный компонент, способный заполнять микропоры и вступать в пуццолановое взаимодействие с гидроксидом кальция с образованием дополнительного C-S-H-геля. Зола-уноса использовалась как тонкодисперсный минеральный наполнитель с частичной пуццолановой активностью, а суперпластификатор — как компонент, снижающий водопотребность смеси и повышающий плотность цементного камня [5–7].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таблица 1

Составы для определения оптимальных значений многокомпонентного вяжущего

Tarkib	Цемент	МК	СП	Зола-уноса	В/Ц	Рсж, 28 сут., МПа
Цемент	400				0,410	45,3
МК 4 %	384	16			0,400	47,7
МК 6 %	376	24			0,395	49,2
МК 8 %	368	32			0,390	51,5
Зола 6 %	376			24	0,387	46,4
Зола 8 %	368			32	0,380	47,0
Зола 10 %	360			40	0,373	47,5
СП 0,5 %	400		2		0,395	46,5
СП 1,0 %	400		4		0,382	48,6
СП 1,5 %	400		6		0,372	49,2



Данные таблицы 3.1 свидетельствуют, что введение модифицирующих добавок изменяет прочность цементной системы в зависимости от их природы и дозировки. В контрольном составе без добавок прочность составляет 45,3 МПа. При использовании микрокремнезёма наблюдается последовательное повышение прочности, что объясняется сочетанием микрофиллерного эффекта и пуццолановой реакции, в результате которой часть свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ преобразуется в дополнительные низкоосновные гидросиликаты кальция.



Рис. 3.1. Прочность от количества микрокремнезема

Сопоставление рисунков 3.1 и 3.2 показывает, что микрокремнезём обеспечивает более интенсивный прирост прочности по сравнению с золой-уноса. Такая зависимость обусловлена более высокой удельной поверхностью микрокремнезёма и его способностью ускорять формирование дополнительного C-S-H-геля. Зола-уноса преимущественно улучшает

Применение золы-уноса также обеспечивает прирост прочности, однако выраженность эффекта ниже по сравнению с микрокремнезёмом, что связано с меньшей реакционной активностью в ранние сроки твердения. Суперпластификатор повышает эффективность цементной системы за счет диспергирования частиц цемента и снижения В/Ц, вследствие чего уменьшается капиллярная пористость. Полученные результаты показывают, что наибольший структурный эффект ожидается при рациональном сочетании минеральных добавок и химического пластифицирования.

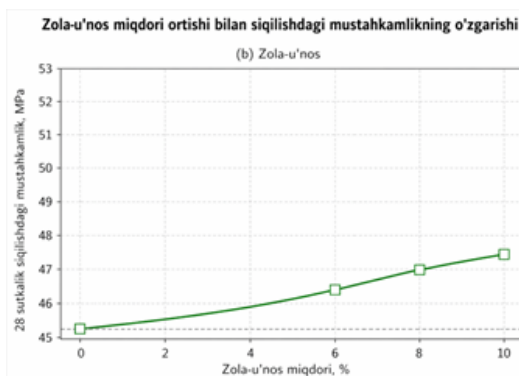


Рис. 3.2. Прочность от количества золы-уноса

гранулометрическую упаковку и вносит вклад в позднее пуццолановое твердение. Следовательно, микрокремнезём может рассматриваться как основной активный модификатор цементной матрицы, а зола-уноса — как дополнительный компонент, повышающий плотность и технологичность вяжущей системы.

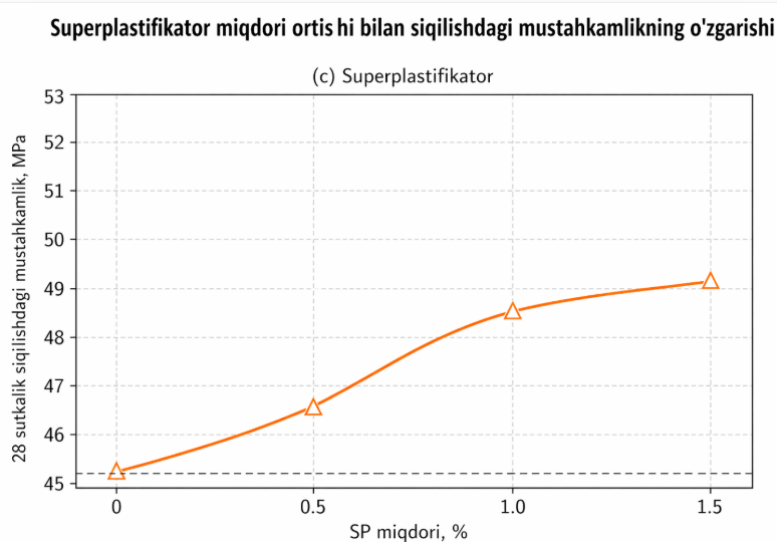


Рис. 3.3. Прочность от количества суперпластификатора

На рисунке 3.3 представлена зависимость прочности от дозировки суперпластификатора.

Введение добавки позволяет снизить водоцементное отношение при сохранении



удобоукладываемости, что особенно важно для легких композитов с пористым наполнителем. При избытке воды возрастает объем капиллярных пор и ухудшается адгезия в межфазной зоне; поэтому структурный эффект суперпластификатора связан не только с технологическим улучшением смеси, но и с формированием более плотной цементной матрицы.

Для подтверждения механизма повышения прочности проведен анализ рентгенофазовых и микроструктурных данных цементного вяжущего. Совместная интерпретация этих данных позволяет установить изменения фазового состава, степень уплотнения цементного камня и особенности формирования контактной зоны при введении микрокремнезёма, суперпластификатора и вермикулитового наполнителя [3, 8].

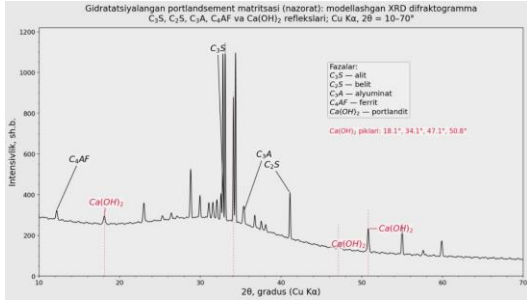


Рис. 3.4. Гидратированная цементная матрица

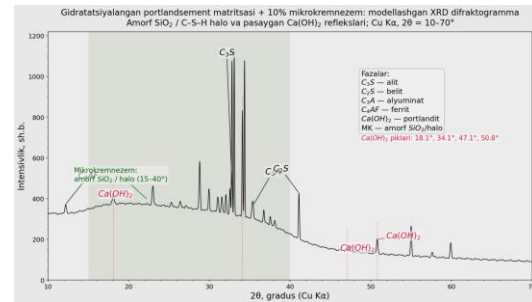


Рис. 3.5. Цемент + 10 % микрокремнезём

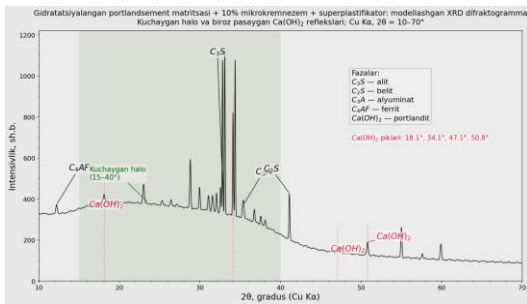


Рис. 3.6. Цемент + МК + суперпластификатор

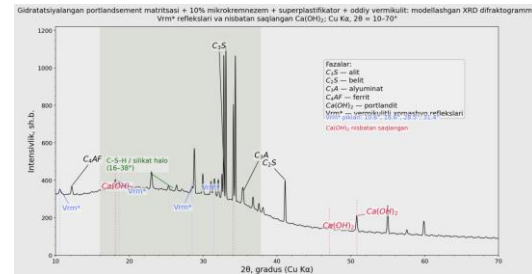


Рис. 3.7. Цемент + МК + СП + обычный вермикулит

Рисунки 3.4–3.6 показывают, что модификация цементной матрицы микрокремнезёмом и суперпластификатором сопровождается снижением относительного содержания свободного Ca(OH)_2 , увеличением доли слабо кристаллизованных гидросиликатных фаз и более равномерным распределением продуктов

гидратации. Однако рисунок 3.7 фиксирует сохранение недостаточно плотной контактной зоны при использовании немодифицированного вспученного вермикулита. Это подтверждает необходимость перехода от простой модификации вяжущего к комплексному воздействию на всю систему «матрица — наполнитель».

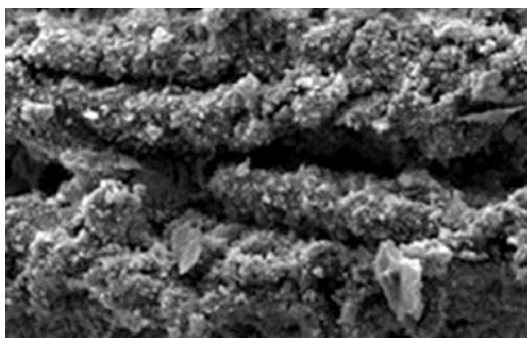


Рис. 3.8. Цементный камень

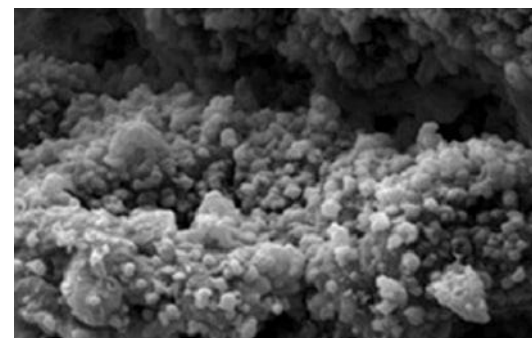


Рис. 3.9. Цемент + микрокремнезём

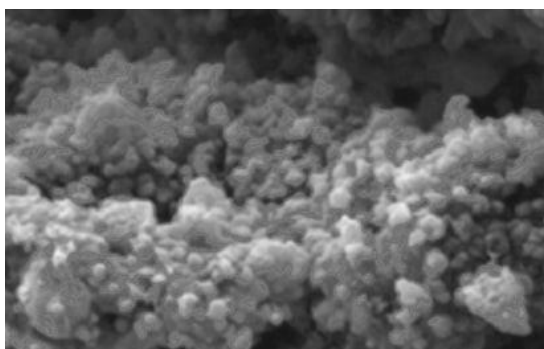


Рис. 3.10. Цемент + МК + СП

Микроструктурные изображения 3.8–3.10 подтверждают, что последовательное введение микрокремнезёма и суперпластификатора уменьшает количество крупных капиллярных пор и повышает однородность цементного камня. Вместе с тем рисунок 3.11 показывает, что при контакте с необработанным вермикулитом сохраняются участки разрыхления и неполного сцепления. Следовательно, уплотнение цементной матрицы является необходимым, но

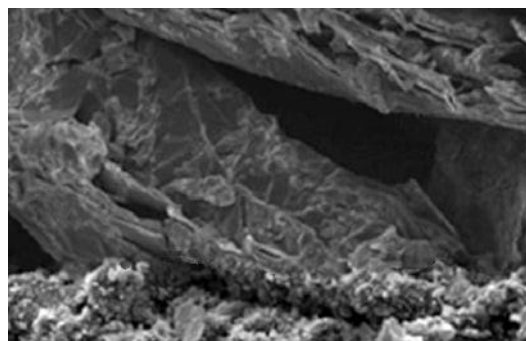


Рис. 3.11. Цемент + МК + СП + обычный вермикулит

недостаточным условием повышения прочности вермикулитового легкого бетона.

Модификация поверхности вспученного вермикулита выполнялась по технологической схеме, приведенной на рис. 3.12. Цель обработки заключалась в снижении открытой пористости, уменьшении водопоглощения, повышении поверхностной активности и формировании более плотной межфазной переходной зоны с цементным камнем.



Рис. 3.12. Схема модификации поверхности

Схема на рис. 3.12 отражает последовательность комплексной обработки заполнителя. На первом этапе проводится щелочная активация раствором NaOH, повышающая реакционную способность и шероховатость поверхности. На втором этапе обработка жидким стеклом формирует тонкий силикатный слой и частично перекрывает открытые поры. На завершающем этапе гидрофобизатор ГЖЖ-11 снижает капиллярное водопоглощение и стабилизирует поверхность. Последовательное применение этих операций обеспечивает синергетический эффект, поскольку

каждая стадия компенсирует ограничения предыдущей.



Таблица 2

Морфологические признаки поверхности вермикулита после модификации

Метод	Состояние поверхности	Открытые поры, мкм	Адгезия	Гидрофобность
Без обработки	Слоистая, рыхлая, открытые дефекты	15–25	Низкий	Отсутствует
NaOH	Активированная, шероховатая	10–15	Средний	Слабая
Жидкое стекло	Уплотненная, силикатная пленка	7–10	Средний	Средняя
ГКЖ-11	Более гладкая, водоотталкивающая	6–8	Средне-высокий	Высокая
Комплексная	Уплотненная, микропленочная	3–5	Высокий	Высокая

Данные таблицы 3.2 подтверждают, что способ обработки существенно влияет на морфологическое состояние поверхности вермикулита. Исходный наполнитель характеризуется рыхлой слоистой структурой и открытыми дефектами размером 15–25 мкм, что создает условия для повышенного водопоглощения и слабой адгезии с цементной матрицей.

После обработки NaOH размер открытых пор уменьшается до 10–15 мкм, а поверхность

приобретает более развитый микрорельеф, способствующий механическому зацеплению. Обработка жидким стеклом снижает размер пор до 7–10 мкм за счет образования силикатной пленки. ГКЖ-11 повышает гидрофобность и уменьшает капиллярный подсос воды. Наиболее выраженный эффект отмечается при комплексной обработке, когда открытые поры сокращаются до 3–5 мкм, а поверхность становится плотной, микропленочной и более пригодной для формирования прочной контактной зоны.

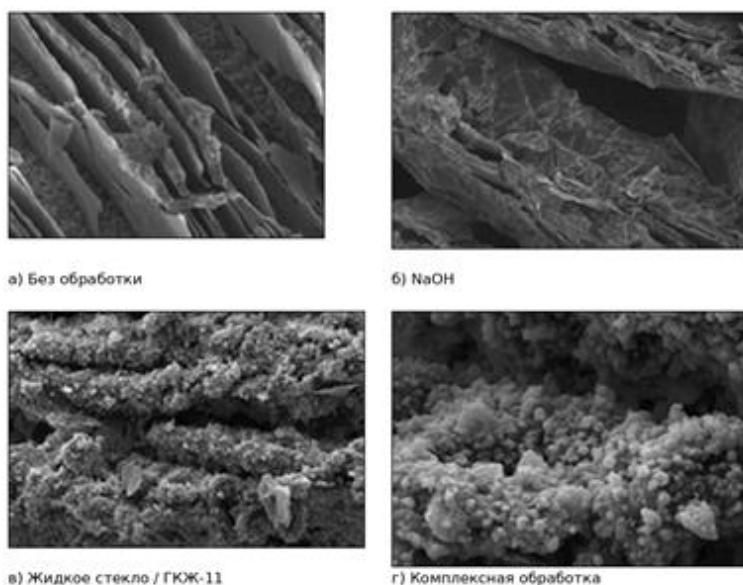


Рисунок 3.13. Фрагменты поверхности вспученного вермикулита: а — без обработки; б — после NaOH; в — после силикатно-гидрофобной обработки; г — после комплексной обработки

Рисунок 3.13 визуально подтверждает морфологические изменения, отраженные в таблице 3.2. У исходного вермикулита наблюдаются раскрытые поры, трещины и слабосвязанные слоистые участки. Щелочная активация повышает шероховатость поверхности,

силикатно-гидрофобная обработка частично перекрывает открытые дефекты, а комплексная обработка формирует более плотный и стабильный поверхностный слой.

Таблица 3

Характеристика межфазной переходной зоны.

Вариант	Межфазная зона	Пористость	Гидратные фазы	Следствие
Без обработки	Прослойка до 40 мкм, разделение фаз	Высокая	Слабо развиты	Низкая адгезия
NaOH	Частично уплотненный контакт	Снижена	Локальное зарастание	Частичный рост
Жидкое стекло	Ровный пленочный интерфейс	Частично перекрыта	Силикатная пленка	Умеренное улучшение
ГКЖ-11	Стабилизированная зона	Капиллярность снижена	Удерживаются лучше	Устойчивая структура
Комплексная	Сплошная плотная зона без пустот	Минимальная	C-S-H мостики	Долговечность

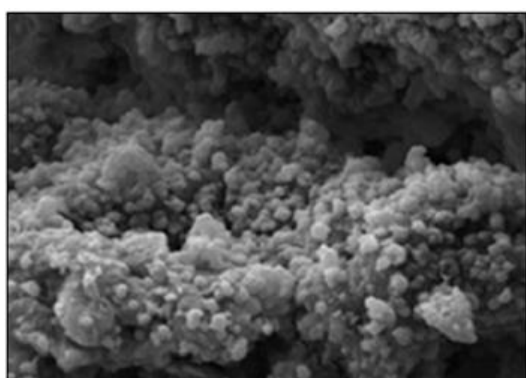


Рис. 3.14. Модифицированный вермикулит

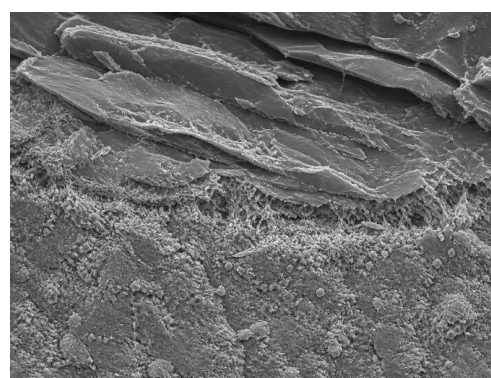


Рис. 3.15. КМВ + модифицированный вермикулит

Микроструктурный анализ рисунков 3.14 и 3.15 показывает, что химическая обработка вермикулита приводит к уплотнению поверхности, частичному перекрытию открытых дефектов и повышению устойчивости контактной зоны. Совместное использование

модифицированного вермикулита и уплотненной цементной матрицы обеспечивает более эффективную передачу нагрузки от матрицы к заполнителю, снижает вероятность разрушения по границе раздела фаз и повышает эксплуатационную надежность композита.

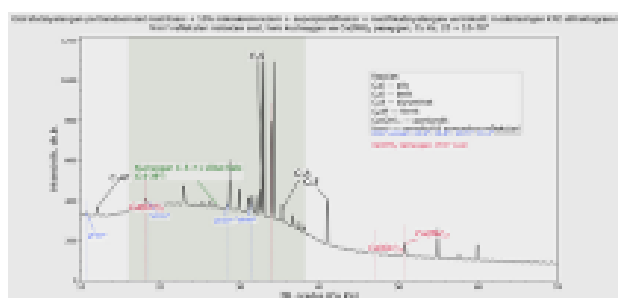


Рис. 3.16. КМВ + модифицированный вермикулит

Рисунок 3.16 подтверждает влияние комплексной модификации на фазовый состав и структуру композита. После обработки вермикулита и применения модифицированного вяжущего уменьшается доля свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$, усиливается формирование C-S-H и C-A-S-H-фаз, а межфазная переходная зона приобретает более плотный характер. Основной структурный

эффект заключается не в образовании крупных кристаллических новообразований, а в увеличении количества слабокристаллических гидратных фаз, которые уплотняют цементный камень и повышают адгезию с вермикулитовым заполнителем.



4. ВЫВОДЫ

1. Установлено, что повышение прочности теплоизоляционно-конструкционных блоков на основе вспученного вермикулита должно основываться на комплексном управлении структурой цементной матрицы и межфазной переходной зоны. Одностороннее увеличение расхода цемента не является рациональным решением, поскольку может ухудшить технико-экономические показатели материала.

2. Модификация цементного вяжущего микрокремнезёмом, золой-уноса и суперпластификатором способствует снижению капиллярной пористости, повышению плотности цементного камня и развитию дополнительных гидросиликатных фаз. Наиболее выраженный вклад в прирост прочности вносит микрокремнезём, тогда как зола-уноса и суперпластификатор обеспечивают дополнительное уплотнение и технологическую стабильность смеси.

3. Комплексная обработка вермикулитового заполнителя по схеме NaOH → жидкое стекло → ГКЖ-11 уменьшает открытую пористость поверхности, повышает гидрофобность и усиливает адгезионное взаимодействие с цементной матрицей. Совмещение модифицированного вяжущего и обработанного заполнителя позволяет сохранить теплоизоляционные преимущества вермикулитовых блоков и одновременно повысить их прочность и долговечность.

4. Полученные результаты подтверждают, что предлагаемая технология может быть использована при разработке энергоэффективных легких стеновых материалов, в которых прочность обеспечивается не только составом вяжущего, но и целенаправленным управлением структурой поверхности пористого заполнителя.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Neville A.M. *Properties of Concrete*. 5th ed. London: Pearson Education, 2011. 872 p.
- [2] Mehta P.K., Monteiro P.J.M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [3] Scrivener K., Snellings R., Lothenbach B. (eds.). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [4] Assis Neto P.C., Raupp-Pereira F., Hotza D., Segadães A.M. Expanded Vermiculite: A Short Review about Its Production, Characteristics, and Effects on the Properties of Lightweight Mortars // *Buildings*. 2023. Vol. 13(3). Article 823.

[5] Koksall F., Gencil O., Kaya M. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 88. P. 175–187.

[6] Mo K.H., Lee H.J., Liu M.Y.J., Ling T.-C. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 179. P. 302–306.

[7] Bentz D.P., Jensen O.M., Coats A.M., Glasser F.P. Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials I. Experimental and computer modeling studies on cement pastes // *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30. P. 953–962.

[8] Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R.D. Supplementary cementitious materials // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41(12). P. 1244–1256.

[9] ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

[10] ГОСТ 12730.3-2020. Бетоны. Метод определения водопоглощения.

[11] ГОСТ 25820-2014. Бетоны легкие. Технические условия.

[12] ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS/ ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тургаев Жамбул Адилбаевич Заведующий кафедры градостроительства и хозяйства Каракалпакского государственного университета
E-mail: jambulturgaev46@gmail.com
Tel.: +998973550840
<https://orcid.org/0000-0003-2483-9727>

Тахиржанов Нурсултан Кайратович Базовый докторант кафедры "Строительство зданий и промышленных сооружений" Ташкентского государственного транспортного университета,
E-mail: taxirjanovnursultan@gmail.com
Tel.: +998973554498
<https://orcid.org/0009-0004-4251-7101>



Study of the Effect of Hydrophobic Modifiers on the Properties of Cement Mixtures

U.J. Turgunbaev¹^a, Y.O. Murodillaev¹^b, D.T. Sharipova¹
¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Annotation: This article comparatively studies the effect of zinc stearate and polyhydroxysiloxane 136-41 hydrophobic modifiers on the structural and operational properties of cement-sand mixtures. The experiments were conducted on the basis of cement from Ohangaronsement JSC and sand from the Chinoz mine, with a water-cement (Water/Cement) ratio ranging from 0.4 to 0.7. It was found that zinc stearate (1% by weight of cement) did not reduce the compressive strength of cement stone at all test periods, but rather increased it by 13.3–60.7% compared to control samples. According to the water absorption reduction efficiency factor (Pw), zinc stearate reduced capillary absorption by 2.51–3.03 times in the initial period to result twice as high as conventional polyhydrosiloxane. The results obtained prove that the use of zinc stearate is highly effective in ensuring the long-term durability of plaster coatings in the sharply continental climate of Uzbekistan.

Keywords: Hydrophobic additives, admixture, cement, zinc stearate, polyhydrosiloxane, hydrophobization, compressive strength, water absorption, durability

Gidrofob Modifikatorlarning Sement Qorishmalari Xususiyatlariga Ta'sirini Tadqiq Etish

Turgunbayev U.J.¹^a, Murodillayev Y.O.¹^b, Sharipova D.T.¹
¹Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent, O'zbekiston

Annotatsiya: Ushbu maqolada sement-qum qorishmalarining strukturaviy va ekspluatatsion xususiyatlariga rux stearati va poligidrosiloksan 136-41 gidrofob modifikatorlarining ta'siri qiyosiy o'rganilgan. Tajribalar «Ohangaronsement» AJ sementi va Chinoz koni qumi asosida, suv-sement (Suv/Sem) nisbatining 0,4 dan 0,7 gacha bo'lgan oraliqlarida o'tkazilgan. Rux stearati (sement massasidan 1%) barcha sinov muddatlarida sement toshining siqilishga mustahkamligini pasaytirmasdan, aksincha, nazorat namunalari nisbatan 13,3–60,7% gacha oshirishi aniqlandi. Suv yutishni kamaytirish samaradorligi ko'rsatkichi (Pw) bo'yicha rux stearati boshlang'ich davrda kapillar so'rilishni 2,51–3,03 martagacha kamaytirib, an'anaviy poligidrosiloksanga qaraganda ikki baravar yuqori natija ko'rsatdi. Olingan natijalar O'zbekistonning keskin kontinental iqlimi sharoitida suvoq qoplamlarining uzoqqa chidamliligini ta'minlashda rux stearatidan foydalanish yuqori samara berishini isbotlaydi.

Kalit so'zlar: Gidrofoblovchi qo'shimchalar, qorishma, sement, rux stearati, poligidrosiloksan, gidrofobizatsiya, siqilishga mustahkamlik, suv yutish, uzoqqa chidamlilik

1. KIRISH


Mavzuning dolzarbligi

Suvoq qoplamlarining uzoqqa chidamliligi qurilish obektlarining asosiy texnik-iqtisodiy ko'rsatkichidir. Tashqi qatlamlar asosan namlanish-qurish va muzlash-erish jarayonlarida yemiriladi. Sement toshining g'ovaklarida suv muzlaganda ichki bosim va kuchlanishlar ortadi. Bu holat konstruksiyalarda

nuqsonlar to'planishiga va yakunda parchalanishga olib keladi. Materialning uzoqqa chidamliligini oshirishda suv shimishni kamaytirish hal qiluvchi omildir.

Muammoning qo'yilishi. Portlandsement asosidagi kompozitlarni himoya qilishda an'anaviy Poligidrosiloksan 136-41 qo'shimchalari qo'llaniladi. Biroq, ularning hozirgi dozalari barqaror gidrofob effektini to'liq ta'minlamaydi. Shu sababli,

^a <https://orcid.org/0000-0003-1993-8165>

^b <https://orcid.org/0009-0008-7972-3223>



samaraliroq metall stearatlari, xususan sink stearatidan foydalanish istiqbolli hisoblanadi.

Tadqiqot maqsadi. Kimyoviy tuzilishi turlicha bo'lgan rux stearati va poligidrosiloksan qo'shimchalarining sement-qum qorishmalari xususiyatlariga ta'sirini qiyosiy baholash.

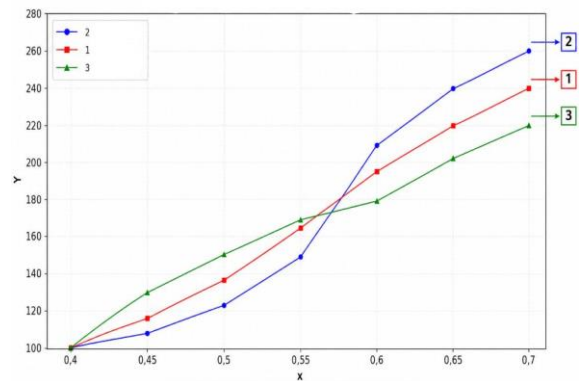
2. ASOSIY QISMI

Suvoq qoplamalarining uzoqqa chidamliligi asosiy texnik-iqtisodiy ko'rsatkich hisoblanadi. Suvoq qatlamlarining yemirilishi asosan ikki mexanizm bilan bog'liq: siklik namlanish va qurish, shuningdek, kriogen ta'sir. Buzilish sement toshining g'ovaklarida muzlash-erish jarayonida suvning fazaviy o'zgarishlari tufayli yuzaga keladigan kuchlanishlar natijasida shikastlanishlarning to'planishi oqibatida sodir bo'ladi. Bundan tashqari, kuchlanishlar suvli muhit va atmosfera havosining galma-gal ta'sirida notekis cho'kish va bo'kish deformatsiyalari natijasida vujudga keladi. Har ikki holatda ham materialning suv shimish qobiliyati uning uzoqqa chidamliligini belgilovchi asosiy omil bo'lib xizmat qiladi.

Portlandsementdan tayyorlangan qurilish materiallarining uzoqqa chidamliligini oshirish uchun Poligidrosiloksan 136-41 [1,2] kabi gidrofoblashtiruvchi qo'shimchalardan foydalaniladi. Hozirgi vaqtda bozorda yangi gidrofobizatorlar: sink, kalsiy, magniy, marganets stearatlari va natriy oleati mavjud.

Shuni ta'kidlash joizki, qo'shimchani hozirgi dozasi barqaror va uzoq muddatli suv qaytaruvchi samaraga erishish uchun yetarli emas. Shu munosabat bilan [3]-ishda mineral-shlakli kompozitsion materiallar yordamida tajribalar o'tkazilgan va ularning natijasida sink hamda kalsiy stearatlari o'rganilgan metall stearatlari orasida eng samaralisi ekanligi aniqlangan. Ushbu natijalarni inobatga olgan holda, tadqiqotimizning ikkinchi bosqichida kimyoviy tuzilishi har xil bo'lgan ikkita gidrofoblashtiruvchi qo'shimchani – sink stearati (kimyoviy formulasi: $Zn(C_{17}H_{35}COO)_2$) va poligidrosiloksanlarning gidrofobizator sifatidagi qiyosiy samaradorligini aniqlashga e'tibor qaratdik.

Tadqiqotdan maqsad sink stearati (sement massasining 1%) va poligidrosiloksan 136-41 (sement massasining 0,15%) qo'shimchalarining qurilish qorishmalari konsistensiyasiga ta'sirini aniqlashdan iborat edi. Qorishmalar "Ohangaronsement" D20 markali sement va Chinoz koni qumidan ($Mkr = 1,5$) sement:qum nisbati 1:3 qilib tayyorlandi. Konsistensiya GOST 310.4 bo'yicha har xil suv-sement nisbatlarida (0,4 dan 0,7 gacha) tebratish stolidan foydalangan holda aniqlandi. Sement-qum aralashmasi konsistensiyasining ushbu qo'shimchalar bilan suv-sement nisbatiga bog'liqligini ko'rsatuvchi natijalar 3.1-rasmga keltirilgan.



3.1-rasm. Gidrofobizatorlar bilan modifikatsiyalangan sement-qum qorishmasining harakatchanligi (konsistensiyasi) suv-sement nisbatiga bog'liqligi

3.1-rasmga ko'rsatilganidek, suv-sement (S/S) nisbati 0,55 qiymatidan oshganda, poligidrosiloksan 136-41 qorishmaning zichligini oshishiga (quyuqlashishiga) olib keladi. Rux stearati esa, aksincha, konusning yoyilish ko'rsatkichiga deyarli ta'sir etmay, uni avvalgi darajada saqlab qoladi. Konsistensiyadagi bu o'zgarishlar ahamiyatsiz bo'lgani uchun ularni e'tiborga olmaslik mumkin. Biroq, qo'shilayotgan rux stearatining miqdori ortishi bilan quyuqlashish samarasi yanada yaqqolroq namoyon bo'ladi.

Gidrofoblovchi qo'shimchalar bilan modifikatsiyalangan qurilish qorishmalarining mustahkamligi to'g'risidagi turli vaqt oraliqlarida olingan ma'lumotlar 3.3-jadvalda keltirilgan. 3.4-jadval esa ushbu tarkiblarning suv yutuvchanligi ularning suv-sement nisbati bilan qanday bog'liqligini yaqqol ko'rsatib turibdi. Bizningcha, qo'shimchalarning qorishma mustahkamligiga ta'siri minimal darajada bo'lib, bunday tadqiqotlarga xos bo'lgan standart xatolikdan oshmasa kerak (3.3 jadval).

3.3-jadval

Tarkibida gidrofobizatsiyalovchi komponentlar bo'lgan qurilish qorishmalarining qotishining turli bosqichlarida mustahkamlikning o'zgarishi

T/r	S/S	Qo'shimchalar, %	Siqilishga mustahkamlik chegarasi, MPa			
			3 sut ka	7 sut ka	14 sut ka	28 sut ka
1	0,4	-	7,5	16	21,5	36,5
2	0,5	-	5,5	11	16,5	30
3	0,6	-	4,2	8,9	14,2	26,5
4	0,7	-	2,8	7,0	10,5	22,5



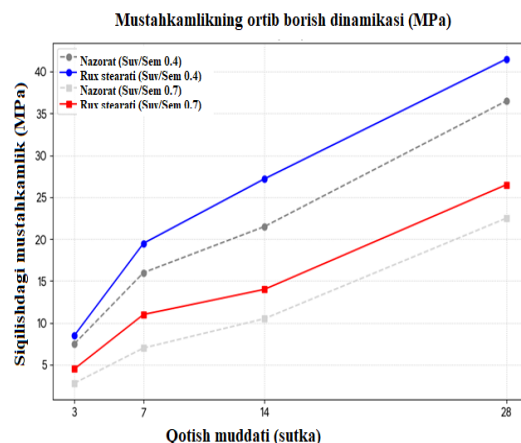
5	0,4	poligidrosiloksan 136-41	8,2	15,2	20,0	33,5
6	0,5		5,8	13,5	16,5	28,2
7	0,6		4,5	8,6	13,5	26,5
8	0,7		3,0	7,0	12,2	19,5
9	0,4	rux stearati	8,5	19,5	27,2	41,5
10	0,5		7,2	15,5	21,5	38,7
11	0,6		5,6	13,2	15,5	29,5
12	0,7		4,5	11	14	26,5

Tadqiqot shuni ko'rsatdiki, sement-qum qorishmasiga o'rganilgan barcha suv-sement nisbatlarida (0,4 dan 0,7 gacha) rux stearatini qo'shish uning mustahkamlik xususiyatlarini sezilarli darajada yaxshilaydi. Hidrofoblovchi qo'shimcha qotishning dastlabki va me'yoriy muddatlarida mustahkamlikni nafaqat pasaytirmaydi, balki nazorat namunalari nisbatan uning barqaror oshishini ham ta'minlaydi.

Tarkibida rux stearati bo'lgan namunalar sinovning barcha davrlarida o'qqa nisbatan siqilishga yuqori mustahkamlikka ega bo'ladi.

Oradan 3 sutka o'tgach, rux stearatli namunalarning mustahkamligi nazorat namunalari ko'rsatkichlaridan 13,3–60,7% ga (Suv/Sem nisbatiga qarab) oshadi. Eng yuqori nisbiy o'sish Suv/Sem nisbati 0,7 bo'lganda qayd etilgan (2,8 MPa nisbatan 4,5 MPa). Qotishning 28-sutkasida rux stearatli qorishmaning mustahkamligi 41,5 MPa (Suv/Sem 0,4 da) dan 26,5 MPa (Suv/Sem 0,7 da) gacha bo'lgan qiymatni tashkil etadi. Taqqoslash uchun, 136-41 markali poligidrosiloksan qo'llanganda bu ko'rsatkichlar ancha past bo'lib, 33,5 dan 19,5 MPa gacha oraliqda o'zgaradi.

Suv/Sem nisbati 0,5 bo'lganda, rux stearati bilan gidrofoblangan tarkibning mustahkamligi 28 kundan so'ng 38,7 MPa ni tashkil etadi. Bu qo'shimchalarsiz nazorat namunasining mustahkamligidan (30 MPa) 1,29 baravar va poligidrosiloksanli tarkib natijasidan (28,2 MPa) ancha yuqoridir. Quyida eng xos nisbatlar (Suv/Sem 0,4 va Suv/Sem 0,7) uchun mustahkamlikning vaqt o'tishi bilan qanday o'zgarishini yaqqol ko'rsatuvchi grafik keltirilgan (3.2-rasm).



3.2-rasm. Eng xos nisbatlar (Suv/Sem 0,4 va Suv/Sem 0,7) uchun mustahkamlikning vaqt bo'yicha o'zgarishi

Shunday qilib, rux stearatidan foydalanish qorishmaga nafaqat suv itaruvchi xususiyatlarni beradi, balki an'anaviy qo'shimchalarga nisbatan uning mustahkamlik markasini ham sezilarli darajada oshirish imkonini beradi.

Qo'shimchalarning gidrofoblashtiruvchi samaradorligini o'rganish GOST 12730.3-78 [4] da bayon etilgan uslubiyot bo'yicha sement-qum qorishmasining suv yutishini kamayishini aniqlash orqali o'tkazildi. Kamayish qiymati quyidagi formula bo'yicha hisoblandi:

$$P_w = \frac{W_k}{W_r} \quad (1)$$

bu yerda W_k – nazorat namunasining suv yutishi, W_r esa gidrofoblangan namunaning suv yutishidir.

Barcha tadqiq etilgan tarkiblar uchun suv yutishining kamayish darajasi suv bilan to'yinish vaqtiga bog'liqligi natijalari 3.4-jadvalda keltirilgan.

3.4-jadval

Suv yutishining kamayish ko'rsatkichi (P_w)
Suv/Sem nisbati va to'yinish vaqtiga bog'liqligi

Qo'shimcha	To'yinish vaqti, soat.	S/S =0,4	S/S =0,5	S/S =0,6	S/S =0,7
poligidrosiloksanlar 136-41	0,25	1,37	1,44	1,49	1,57
	1	1,33	1,39	1,44	1,52
	3	1,29	1,33	1,39	1,49
	6	1,25	1,28	1,34	1,41
rux stearati	0,25	2,57	2,68	2,82	3,03
	1	2,51	2,62	2,71	2,89
	3	2,39	2,48	2,53	2,79
	6	1,86	1,87	1,91	2,38
	24	1,48	1,51	1,54	1,78

3.4-jadvalda gidrofoblashtiruvchi qo'shimchalar (poligidrosiloksanlar 136-41 va rux stearati)



qo'shilgan sement-qum qorishmalarining suv yutishi suv bilan to'yintirishning turli muddatlarida suv-ement nisbatiga (S/S) bog'liqligi ko'rsatilgan.

To'yinishning dastlabki davrida (0,25–1 soat) sink stearati a'lo darajadagi gidrofoblovchi xususiyatlarni namoyon etadi. Uning uchun P_w ko'rsatkichi 2,51–3,03 oralig'ida bo'lsa, 136-41 poligidrosiloksani uchun bu ko'rsatkich ancha past — 1,33 dan 1,57 gacha. Bu holat sink stearatining namlik bilan aloqaning birinchi soatlarida kapillyar so'rilishni samaraliroq to'sish qobiliyatiga ega ekanini ko'rsatadi.

To'yinish vaqti 24 soatgacha oshirilganda, barcha tarkiblar uchun P_w ko'rsatkichi qonuniy ravishda pasayishi kuzatiladi. Biroq, bir sutkadan keyin ham sink stearatli tarkiblar yuqoriroq samaradorlikni saqlab qoladi (1,48–1,78), 136-41 poligidrosiloksanning himoya ta'siri esa minimal qiymatlargacha (1,19–1,29) tushib ketadi.

To'g'ridan-to'g'ri korrelyatsiya qayd etildi: V/S nisbati oshishi bilan har ikkala qo'shimchanning samaradorligi ham ortadi. Gidrofobizatsiyaning eng yaxshi ko'rsatkichlari $V/S = 0,7$ bo'lganda qayd etilgan. Xususan, 6 soatlik to'yinishdan so'ng V/S nisbati 0,7 bo'lgan sink stearati uchun P_w ko'rsatkichi 2,38 ni tashkil etadi, bu esa V/S nisbati pastroq bo'lgan holatlarga (1,86–1,91) qaraganda ancha yuqoridir.

Sink stearati barcha nazorat nuqtalarida (0,25 dan 24 soatgacha) 136-41 poligidrosiloksanning ko'rsatkichlaridan doimiy ravishda yuqori natijalarni ko'rsatadi. Bu uning materialni uzoq muddatli himoya bilan ta'minlovchi samaraliroq gidrofoblovchi komponent sifatida qo'llanilishi maqsadga muvofiq ekanligini tasdiqlaydi.

Shunday qilib, **ruх stearati 136-41 poligidrosiloksaniga** nisbatan ancha samaraliroq gidrofobizator hisoblanadi. U dastlabki bosqichda (1 soatgacha) namlikni to'sishda deyarli **ikki baravar ustunlikni** ta'minlaydi va uzoq vaqt davomida to'yintirilganda (24 soat) o'xshashiga qaraganda **25–38% yuqoriroq** himoya xususiyatlarini saqlab qoladi. Qo'shimchanning asosiy xususiyati turli suv-ement nisbatlarida ham yuqori samaradorligini saqlab qolishidir, bu esa uni sement tizimlarini uzoq muddatli gidrofobizatsiyalash uchun eng maqbul tanlovga aylantiradi.

3. XULOSA

1. Suv/Sem nisbati 0,55 dan oshganda poligidrosiloksan qorishmani quyuqlashtiradi. Rux stearati esa konus yoyilishiga deyarli salbiy ta'sir ko'rsatmaydi.

2. Rux stearati sement tizimlarida mustahkamlikning pasayishini oldini oladi. Va barcha muddatlarda nazorat namunalariga nisbatan barqaror o'sishni ta'minlaydi. 3 sutkada mustahkamlik o'sishi

Suv/Sem nisbatiga qarab 13,3% dan 60,7% gacha yetadi.

3. Suv/Sem = 0,5 bo'lganda rux stearatli tarkibning 28 kunlik mustahkamligi 38,7 MPa ni taminladi. Bu ko'rsatkich nazorat variantidan (30 MPa) 1,29 baravar yuqoridir.

4. To'yinishning dastlabki soatlarida rux stearati kapillyar so'rilishni 2,51–3,03 marta kamaytiradi. Bu poligidrosiloksanga (1,33–1,57) nisbatan qariyb ikki baravar yuqori samaradir. 24 soatlik to'liq to'yinishdan keyin ham rux stearati o'zining yuqori himoya xususiyatini (1,48–1,78) saqlab qoldi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR / REFERENCES

- [1] Батраков В.Г. *Модифицированные бетоны*. Москва, 2000.
- [2] Кунцевич О.В., Миссюль Н.В. Поверхностная гидрофобизация цементного камня мономерными кремнийорганическими соединениями // Роль структурной механики в повышении прочности и подвижности транспортных сооружений. Санкт-Петербург: Сб. тр. Изд. ПГУПС, 1995. С. 50–54.
- [3] Диссертация к.т.н. Мороз М.Н. *Высокогидрофобные композиционные материалы*.
- [4] ГОСТ 12730.3-78. *Бетоны. Метод определения водопоглощения*.
- [5] Turgunbayev U., Sharipova D. Dry mixes in modern construction using local raw materials and polymer additives // *IPFA 2023, E3S Web of Conferences*. 452 (12), 2023.

MUALLIFLAR TO'G'RISIDA MA'LUMOTLAR

Turgunbayev Urinbek Jamolovich	Bino va sanoat inshootlar qurilishi, Toshkent davlat transport universiteti E-mail: urinbekdj@mail.ru
Sharipova Dilafuz Toufukovna	Bino va sanoat inshootlar qurilishi, Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent E-mail: dilafuz1407@gmail.com
Murodillayev Yashnarbek Otamurod o'g'li	Bino va sanoat inshootlar qurilishi, Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent E-mail: murodillayevyashnarbek@gmail.com



Modification of the Cementitious System As A Method For Densifying the Inter-Pore Walls of Fiber-Reinforced Foam Concrete

V. Soy¹^a, G. Nuriddinova¹^b, J. A. Turgayev²^c, A.O. Jumageldiev¹^d

¹Tashkent State Transport University, Uzbekistan

²Karakalpak state university Karakalpakstan, Uzbekistan

Annotation This study investigates the effect of complex modification of a cementitious system on hardening behavior and strength formation in cement paste designed for the production of fiber-reinforced foam concrete. Microcalcite, microsilica, and a polycarboxylate-based superplasticizer were used as modifying components. The experimental program included a comparison between a reference mixture without additives and a modified mixture incorporating 5% microcalcite, 5% microsilica, and 1% superplasticizer by mass of cement. Compressive strength was evaluated after 3, 7, and 28 days of curing, and the phase composition of the cement matrix was analyzed by X-ray diffraction. The results showed that the complex additive did not lead to a significant increase in early-age strength, but contributed to the development of structure-forming processes by 28 days. X-ray diffraction analysis confirmed the presence of portlandite, calcite, residual clinker minerals, and an amorphous region related to calcium silicate hydrate phases. These findings indicate that the combined use of microcalcite, microsilica, and superplasticizer promotes densification of the cement matrix and can be applied to modify the cementitious binder for fiber-reinforced foam concrete

Keywords: Fiber-reinforced Foam Concrete; Cementitious System; Microcalcite; Microsilica; Polycarboxylate Superplasticizer; X-Ray Diffraction; Compressive Strength

1. INTRODUCTION

In modern construction, there is an increasing demand for lightweight and energy-efficient materials characterized by reduced density, sufficient strength, and stable performance properties. One of the promising materials in this field is non-autoclaved fiber-reinforced foam concrete, which combines the advantages of a cellular structure and dispersed reinforcement. Due to the presence of artificially formed air pores, this material is characterized by low average density and reduced thermal conductivity, which makes it suitable for use in enclosing, partition, and thermal-insulating structural elements of buildings [1, 2].


However, producing low-density fiber-reinforced foam concrete with sufficiently high strength remains a challenging technological task. As density decreases, the volume of pore space increases, the thickness of the inter-pore walls decreases, and the probability of forming a defective cement matrix increases. As a result, the material may exhibit reduced strength, increased water absorption, shrinkage deformations, and a tendency toward microcracking [3, 4]. Therefore, improving the quality of the cementitious system is one of the key approaches to enhancing the properties of non-autoclaved fiber-reinforced foam concrete.

The condition of the cement matrix forming the inter-pore walls is of particular importance. These structural regions carry the main mechanical load and determine the compressive strength of the material. If the cement matrix is characterized by increased capillary porosity, insufficient density of hydration products, or a large amount of weakly bound phases, the strength of foam concrete decreases even when the pore structure is relatively uniform. In this regard, modification of the cementitious system should be aimed not only at improving the workability of the mixture, but also at controlling the hydration and phase formation processes of cement paste.


A promising approach to increasing the density and strength of the cement matrix is the combined incorporation of mineral and chemical modifiers. In this study, a modifying system consisting of 1% polycarboxylate-based superplasticizer, 5% microcalcite, and 5% microsilica is considered. It is assumed that the superplasticizer ensures dispersion of cement particles and reduces water demand, microcalcite acts as a microfiller and crystallization center, while microsilica contributes to the binding of calcium hydroxide and the formation of additional calcium silicate hydrates.

The aim of this study is to investigate the effect of complex modification of the cementitious system, including 1% polycarboxylate-based superplasticizer,

^a <https://orcid.org/0009-0009-7560-2691>

^b <https://orcid.org/0009-0005-4832-4623>

^c <https://orcid.org/0000-0003-2483-9727>

^d <https://orcid.org/0009-0004-3686-5695>



5% microcalcite, and 5% microsilica, on phase transformations and the strength of fiber-reinforced foam concrete. To achieve this aim, a reference composition without modifying additives and a modified composition were compared. The effectiveness of modification was evaluated based on the results of compressive strength testing and X-ray diffraction analysis of the cement matrix.

Literary analysis

The production and application of foam concrete have been widely discussed in the scientific literature. In the work of K. Ramamurthy, E.K. Kunhanandan Nambiar, and G.I.S. Ranjani, studies devoted to the composition, production technology, properties of fresh mixtures, and characteristics of hardened foam concrete are systematized [1]. The authors note that the properties of foam concrete depend on the type of binder, mixture composition, foam stability, water-to-solid ratio, and curing conditions. At the same time, not only the total porosity but also the quality of the formed pore structure plays an important role.

A number of studies show that the strength of foam concrete is closely related to its porosity. E.P. Kearsley and P.J. Wainwright established a relationship between the volume of pore space and the compressive strength of foam concrete [3]. As porosity increases, the strength of the material naturally decreases; however, the nature of this decrease depends on the condition of the cement matrix and the pore distribution. This means that the strength improvement of low-density foam concrete cannot be achieved only by changing the number of pores; it is also necessary to improve the quality of the inter-pore walls.

E.K.K. Nambiar and K. Ramamurthy investigated the influence of pore structure on the permeability and performance properties of foam concrete [4]. The authors emphasize that the size, shape, distribution, and degree of connectivity of pores significantly affect the water absorption and durability of the material. For non-autoclaved fiber-reinforced foam concrete, this conclusion is of particular importance, since instability of the pore system can lead to increased open porosity, reduced strength, and deterioration of performance characteristics.

Fine mineral additives are widely used to improve the structure of the cement matrix. One of the most effective active additives is microsilica. Its effect is associated with its high fineness and high content of amorphous silicon dioxide, which reacts with calcium hydroxide formed during cement hydration. As a result, an additional amount of calcium silicate hydrates is formed, contributing to the densification of cement paste, reduction of porosity, and increase in strength [5, 6]. However, the effectiveness of microsilica depends on its uniform distribution in the cementitious system and on a rational water-to-cement ratio.

Along with active siliceous additives, limestone powder, or microcalcite, is widely used in cement-based materials. According to the review by D. Wang et al., limestone powder can affect cementitious systems through several mechanisms, including the filler effect, nucleation effect, dilution effect, and chemical interaction [7]. When used at a rational dosage, microcalcite contributes to microstructural densification, reduction of porosity, and acceleration of clinker mineral hydration. Under the conditions of fiber-reinforced foam concrete, this may promote the formation of a denser cement matrix and strengthen the inter-pore walls.

An important component of the modified cementitious system is a polycarboxylate-based superplasticizer. Modern polycarboxylate admixtures possess high water-reducing capacity and provide effective dispersion of cement particles. Their action is associated with adsorption on the surface of cement particles, electrostatic repulsion, and steric hindrance between particles [8]. This makes it possible to reduce the water demand of the mixture without impairing its flowability, which is especially important for foam concrete, since an excessive amount of water may cause segregation, settlement, and disruption of the pore structure.

The analysis of literature sources shows that the effects of microsilica, microcalcite, and superplasticizers on cement-based materials have been studied quite extensively. At the same time, most studies consider the action of these components separately or in relation to conventional cement concrete. The complex influence of the combined use of microsilica, microcalcite, and a polycarboxylate-based superplasticizer on phase transformations in the cementitious system and the strength of non-autoclaved fiber-reinforced foam concrete remains insufficiently studied. Therefore, a comparative study of reference and modified compositions using X-ray diffraction analysis is of both scientific and practical interest.

2. MATERIALS AND METHODS

The modified cementitious binder was prepared using cement, finely dispersed mineral additives, and a chemical modifier. The main characteristics of the materials used in the study are presented in Table 1.

After the selection of the raw materials, two cementitious system compositions were prepared: the reference composition R and the modified composition M. The reference composition R did not contain mineral or chemical modifying additives and was used for comparative evaluation. The modified composition MK1 included a complex of additives: 5% microcalcite, 5% microsilica, and 1% polycarboxylate-based superplasticizer by mass of cement.



Table 1

Characteristics of the materials used for the production of fiber-reinforced foam concrete

Material	Origin	Material characteristics	Function in the modified system
Portland cement CEM II/A-K 42.5 N	JSC “Akhangarancement”, Republic of Uzbekistan	Cement containing a mineral carbonate additive; strength class 42.5; used as the main hydraulic binder	Main component of the cementitious system; ensures the formation of cement paste and the strength-bearing matrix of fiber-reinforced foam concrete
Microsilica	By-product of metallurgical production of JSC “Uzmetkombinat”	Highly dispersed siliceous additive with SiO ₂ content of more than 92%; particle size less than 1 μm	Active mineral additive; participates in the pozzolanic reaction with Ca(OH) ₂ and contributes to the formation of additional C–S–H phases
Microcalcite (CaCO ₃)	Product of carbonate raw material grinding / waste from marble processing	Finely dispersed carbonate filler based on CaCO ₃ ; characterized by high fineness, with a specific surface area of 8735 cm ² /g, and a filler-structuring effect	Acts as a microfiller; improves particle packing, reduces defects in the cement matrix, and promotes nucleation of hydration products
Polycarboxylate superplasticizer “Master Glenium”	Industrial chemical admixture for cementitious systems	New-generation water-reducing admixture; dosage in the modified composition — 1% by mass of cement	Improves the dispersion of cement and mineral particles, reduces the water demand of the mixture, and increases the homogeneity of the cement suspension
Mixing water	Tap water complying with the requirements for water used in concrete mixtures	Used for cement hydration, preparation of the cement suspension, and preparation of the foaming-agent solution	Ensures cement hydration processes and provides the required working consistency of the mixture

Cube specimens with dimensions of 20 × 20 × 20 mm were molded from the prepared mixtures. After molding, the specimens were kept in the molds until demolding and then placed in a standard curing chamber. Curing was carried out at a temperature of 20 ± 2 °C and a relative humidity of not less than 95%. Tests were performed at the ages of 3, 7, and 28 days.

Compressive strength was determined using a hydraulic press in accordance with the requirements of GOST 310.4-81 “Cements. Methods for determination of flexural and compressive strength” and GOST 10180-2012 “Concretes. Methods for strength determination using reference specimens.” At each curing age, specimens of both the reference and modified compositions were tested.

X-ray diffraction analysis of the hardened cement paste was performed at the ages of 3, 7, and 28 days. The analysis was carried out to evaluate the phase changes occurring during the hardening of the reference and modified cementitious systems. The obtained XRD results were compared with the compressive strength test data.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The experimental results demonstrated that complex modification of the cementitious system significantly influenced the strength development of hardened cement paste. At all curing ages studied, the modified composition M, incorporating 5% microcalcite, 5% microsilica, and 1% polycarboxylate-based superplasticizer by mass of cement, showed higher compressive strength than the reference composition R.



Table 3

Compressive strength of the reference and modified compositions

Composi-tion	Cement content, %	Mineral and chemical additives, wt.% of cement			W/C ratio	Age, days	Compressive strength, MPa
		CaCO ₃	SP «Master Glenium»	Microsilica			
R	100	-	-	-		3	63,4
						7	74,3
						28	74,3
MK1	90	5	1	5		3	63,06
						7	67,73
						28	78,30

As shown in Table 3, at the age of 3 days, the strength values of the reference and modified compositions were almost identical, amounting to 63.40 and 63.06 MPa, respectively. This indicates that the replacement of 10% of cement with microcalcite and microsilica did not cause a noticeable reduction in the early strength of the cementitious system.

At the age of 7 days, the strength of composition MK1 was 67.73 MPa, which was 8.8% lower than that of the reference composition R. This may be attributed to the reduced cement content in the mixture, as well as to the fact that the pozzolanic activity of microsilica does not manifest immediately, but develops gradually as calcium hydroxide accumulates during hardening.

By 28 days, the modified composition reached a compressive strength of 78.30 MPa, whereas the strength of the reference composition remained at 74.30 MPa. Thus, at the design age, MK1 exceeded R in strength by 5.4%. This result indicates the positive effect of complex modification on the strength development of the cementitious system at later curing ages.

The increase in the strength of composition MK1 by 28 days is associated with the combined action of microcalcite, microsilica, and the superplasticizer. Microcalcite contributes to microfilling of the structure, microsilica participates in the pozzolanic reaction with the formation of additional calcium silicate hydrates, and the superplasticizer improves particle dispersion. As a result, a denser cement matrix is formed, which ensures the strength gain of the modified composition.

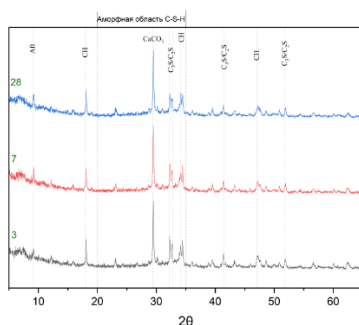


Fig. 1. XRD patterns of the modified composition MK1 at 3, 7, and 28 days

To assess phase changes during hardening, X-ray diffraction analysis of the modified composition MK1 was performed at the ages of 3, 7, and 28 days. The diffraction patterns are presented in Fig. 1.

In the diffraction patterns of composition MK1, reflections of portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, calcite CaCO_3 , and residual unhydrated clinker minerals C_3S and C_2S were recorded at all curing ages. The presence of a pronounced CaCO_3 peak is associated with the incorporation of microcalcite, as well as with the carbonate component present in the cementitious system. The carbonate phase acts as a finely dispersed filler and contributes to the densification of the hardened cement paste structure.

An amorphous region characteristic of poorly crystalline calcium silicate hydrates, C-S-H, is observed in the low-angle range. This phase is the main strength-forming component of hardened cement paste; however, due to its poorly crystalline structure, it does not appear in the diffraction patterns as sharp intense peaks. The formation of the C-S-H phase is associated both with the hydration of cement clinker minerals and with the possible pozzolanic reaction of microsilica with calcium hydroxide.

As the curing age increased from 3 to 28 days, gradual development of the phase composition of the modified cementitious system was observed. The persistence of C_3S and C_2S reflections indicates ongoing hydration processes, while the presence of portlandite confirms the hydration of the silicate phases of cement. At the same time, microsilica may partially bind $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to form additional calcium silicate hydrates, contributing to the densification of the cement matrix.

The obtained XRD data are consistent with the compressive strength test results. Although the strength of composition MK1 at 7 days was lower than that of the reference composition, by 28 days the modified composition reached 78.30 MPa and exceeded the reference composition by 5.4%. This indicates that the main effect of complex modification becomes more pronounced at later curing ages, when the combined action of microcalcite and microsilica contributes to the formation of a denser cementitious structure.

4. CONCLUSION

The conducted studies showed that complex modification of the cementitious system with microcalcite, microsilica, and a polycarboxylate-based superplasticizer changes the hardening behavior of hardened cement paste intended for the production of fiber-reinforced foam concrete.

It was established that the modified composition did not provide a pronounced increase in strength at early curing ages. The main effect of the complex additive became evident by 28 days, which is associated with the gradual development of structure-forming processes in the cementitious system.

The results of X-ray diffraction analysis confirmed the presence of portlandite, calcite, residual clinker minerals, and an amorphous region corresponding to calcium silicate hydrates in the modified composition. The presence of calcite is associated with the incorporation of microcalcite, while the formation of calcium silicate hydrates is caused by cement hydration and the possible participation of microsilica in the pozzolanic reaction.

The combined action of microcalcite, microsilica, and the superplasticizer contributes to the densification of the cement matrix due to microfilling, improved particle dispersion, and the formation of additional hydrate phases. This creates prerequisites for increasing the strength of the inter-pore walls of fiber-reinforced foam concrete.

Thus, the application of the proposed additive system can be considered an effective approach to the targeted modification of cementitious binder for fiber-reinforced foam concrete.

REFERENCES

- [1] Ramamurthy, K., Kunhanandan Nambiar, E.K., Indu Siva Ranjani, G. A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2009, Vol. 31, No. 6, pp. 388–396. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>
- [2] Hilal, A.A., Thom, N.H., Dawson, A.R. On entrained pore size distribution of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 2015, Vol. 75, pp. 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.117>
- [3] Kearsley, E.P., Wainwright, P.J. The effect of porosity on the strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, 2002, Vol. 32, No. 2, pp. 233–239. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00665-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00665-2)
- [4] Hilal, A.A., Thom, N.H., Dawson, A.R. Pore structure and permeation characteristics of foamed concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2014, Vol. 12, No. 12, pp. 535–544. <https://doi.org/10.3151/jact.12.535>
- [5] Bentz, D.P. Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials. I. Experimental

and computer modeling studies on cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol. 30, No. 6, pp. 953–962. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00264-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00264-7)

[6] Hamada, H.M., Abed, F., Binti Katman, H.Y., Humada, A.M., Al Jawahery, M.S., Majdi, A., Yousif, S.T., Thomas, B.S. Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, Vol. 24, pp. 8887–8908. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.147>

[7] Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., Ou, Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 181, pp. 659–672. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075>

[8] Gao, Y., Zhang, Y., Li, J., Wang, X. Interaction between polycarboxylate superplasticizer and cement particles: A review. *Materials*, 2025, Vol. 18, No. 11, Article 2662. <https://doi.org/10.3390/ma18112662>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

<p>Soy Vladimir Mixaylovich</p>	<p>Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Building Construction and Industrial Structures, Tashkent State Transport University. E-mail: volodya_tsoy@inbox.ru Phone: +998909521576 https://orcid.org/0009-0009-7560-2691</p>
<p>Nuriddinova Gavkhar Sadulla kizi</p>	<p>PhD student at the Department of Building Construction and Industrial Structures, Tashkent State Transport University. E-mail: nuriddinova_gavhar@mail.ru Тел.: +998959801077 https://orcid.org/0009-0005-4832-4623</p>
<p>Turgayev Janbul Adilbaevich</p>	<p>Doctor PhD in technical science, professor of Karakalpak state university E-mail: jambulturgayev46@gmail.com https://orcid.org/0000-0003-2483-9727</p>
<p>Jumageldiev Aziz Olimovich</p>	<p>Master's student at the Department of Building Construction and Industrial Structures, Tashkent State Transport University E-mail: jumageldiyevaziz@gmail.com https://orcid.org/0009-0004-3686-5695</p>



Physicochemical Fundamentals and Technological Efficiency of Non-Steam Production of Dispersed Reinforced Composites

A.I. Adylkhodjaev¹^a, A.F. Babajanov¹^b

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The article examines aspects of the energy intensity of precast concrete production and the negative influence of steam curing on the formation of concrete structure. Based on the thermodynamic approach and the theory of heterogeneous nucleation, the possibility of transitioning to non-steam curing technology is considered. A mathematical model of strength development kinetics based on the Arrhenius equation is presented, and the role of carbonate microfillers in reducing the activation energy of the hydration reaction is demonstrated. Special attention is paid to the specifics of fiber reinforced concrete hardening: it is proven that the elimination of steam curing minimizes thermal deformations of polymer fibers, preserving the integrity of the adhesive bond.

Keywords: Non-steam technology, activation energy, hydration kinetics, nucleation, polycarboxylates, fiber reinforced concrete, energy efficiency

Физико-Химические Основы и Технологическая Эффективность Беспрогревного Производства Дисперсно-Армированных Композитов

Адилходжаев А.И.¹^a, Бабажанов А.Ф.¹^b

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В статье рассматриваются аспекты энергоёмкости производства сборного железобетона и негативного влияния тепловлажностной обработки (ТВО) на формирование структуры бетонов. На основе термодинамического подхода и теории гетерогенной нуклеации рассмотрена возможность перехода на беспрогревную технологию твердения. Представлена математическая модель кинетики набора прочности, базирующаяся на уравнении Аррениуса, и показана роль карбонатных микронаполнителей в снижении энергии активации реакции гидратации. Особое внимание уделено специфике твердения фибробетонов: доказано, что отказ от ТВО минимизирует термические деформации полимерной фибры, сохраняя целостность адгезионного контакта.

Keywords: Беспрогревная технология, энергия активации, кинетика гидратации, нуклеация, поликарбоксилаты, фибробетон, энергоэффективность

1. ВВЕДЕНИЕ


Существующая индустриальная модель производства сборного железобетона, сформировавшаяся в середине XX века, базируется на интенсивной тепловлажностной обработке (ТВО) изделий. Этот подход, обеспечивающий быстрый оборот металлоформ, характеризуется высокой энергоёмкостью: затраты на теплоносители достигают 40% в структуре себестоимости передела. Кроме того, как отмечали О.П. Мчедлов-Петросян и А.В. Ушеров-Маршак [1], [2], высокотемпературное воздействие нарушает естественную топологию

формирования гидратных фаз. «Тепловой удар» приводит к огрублению поровой структуры, росту внутренних напряжений и риску отложенного образования этtringита, что критически снижает долговечность конструкций из высокопрочных бетонов.

2. МЕТОДЫ

Для фибробетонов, армированных синтетическими волокнами, ТВО несёт дополнительные риски. Коэффициент линейного термического расширения полипропилена ($\alpha \approx 70 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$) на порядок превышает аналогичный

^a <https://orcid.org/0000-0001-5729-5178>

^b <https://orcid.org/0009-0002-7990-0206>



показатель цементного камня ($\alpha \approx 10 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$).

При нагреве до 80°C и последующем остывании волокно испытывает значительные объемные деформации, которые могут привести к разрыву адгезионного контакта еще до начала эксплуатации конструкции. Важно отметить, что применяемые модификаторы, относящиеся к добавкам первого класса, при дозировке от 2,5 до 3% применяются как ускорители твердения, а в количестве до 10% и выше – как противоморозные добавки [3], [4].

Альтернативой является использование внутренней химической энергии системы (экзотермии). Современная физико-химия бетона рассматривает процесс твердения как сложную гетерогенную реакцию, скорость которой (v) описывается уравнением химической кинетики. Согласно закону Аррениуса, константа скорости реакции (k) зависит от температуры и энергии активации:

$$k = A \cdot e^{\frac{E_a}{RT}}, \quad (1)$$

где A – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации процесса (Дж/моль); R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура (К).

Традиционная ТВО производится по пути увеличения температуры (T) [5]. Беспрогревная технология решает задачу путем снижения энергии активации (E_a) и увеличения плотности контактов между частицами. Это достигается за счет синергии двух факторов: физического сближения частиц (применение суперпластификаторов) и каталитического воздействия добавок-нуклеаторов.

Применение поликарбоксилатных эфиров (PCE) позволяет снизить водоцементное отношение до экстремально низких значений ($В/Ц < 0,3$). Это обеспечивает сближение зерен цемента, сокращая диффузионный путь ионов в поровом растворе. Однако ключевым элементом ускорения твердения без внешнего тепла является введение тонкомолотого карбонатного наполнителя (микрокальцита). Согласно теории Фольмера-Вебера, работа образования зародыша новой фазы (A_{het}) на подложке (частице наполнителя) меньше, чем в объеме жидкости (A_{hom}).

$$A_{het} = A_{hom} \cdot f(\theta), \quad (2)$$

где $f(\theta)$ – функция угла смачивания, значение которой всегда < 1 .

Частицы CaCO_3 выступают готовыми подложками для кристаллизации гидросиликатов кальция (C-S-H). Это снижает энергетический барьер начала кристаллизации, ускоряя переход от индукционного периода к периоду ускорения, что подтверждается данными дифференциальной микрокалориметрии [6] (рис. 1).

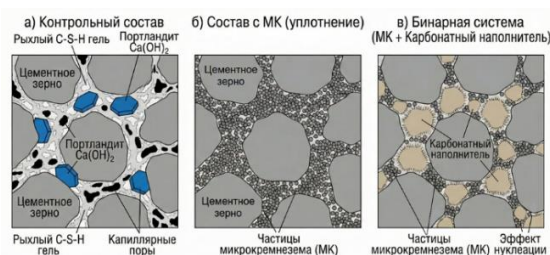


Рис. 1. Влияние карбонатных центров нуклеации на тепловыделение цемента: сдвиг пика гидратации на более ранние сроки при использовании микрокальцита

В условиях беспрогревной технологии формирование структуры фибробетона происходит в «мягком» температурном режиме (за счет собственной экзотермии температура в ядре сечения редко превышает $40-50^\circ\text{C}$). Это исключает возникновение деструктивных температурных градиентов. Более того, отсутствие ТВО позволяет сохранить высокую влажность внутри бетона, необходимую для полной гидратации цемента. Проведенные исследования [7], [8] показывают, что прочность сцепления полипропиленовой фибры с матрицей в бетонах естественного твердения на 15-20% выше, чем в пропаренных образцах, за счет формирования более плотной и менее дефектной межфазной зоны.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для выявления механизмов структурообразования комплексно-модифицированного цементного камня проведен рентгенофазовый анализ. Исследование было направлено на качественную и количественную оценку трансформации исходных клинкерных минералов в гидратные новообразования под воздействием бинарного микронаполнителя (микрокремнезем и мрамор) и полифункционального модификатора K1W. Оценивалось изменение соотношения кристаллической и аморфной фаз, а также кинетика синтеза основных продуктов гидратации: портландита, этtringита и гидросиликатов кальция (C-S-H).

В рамках эксперимента проанализированы дифрактограммы трех базовых систем: контрольного бездобавочного образца (рис. 2), композита с добавлением 0,9 % K1W (рис. 3) и комплексно-модифицированной матрицы (рис. 4).

Рентгенограмма эталонного цементного камня (рис. 2) на 28-е сутки твердения демонстрирует профиль, типичный для классической гидратации портландцемента. Доминирующей кристаллической фазой



выступает гидроксид кальция — портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (интенсивные рефлексы при $d = 4,897$ и $2,443 \text{ \AA}$), массово генерируемый при гидролизе алита и белита. Развитие процессов кристаллизационного структурообразования подтверждается наличием этtringита ($d = 9,690$; $5,576$; $4,241$; $2,622 \text{ \AA}$).

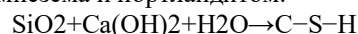
На дифрактограмме фиксируется значительное содержание негидратированных остатков клинкера: алита ($d = 3,381$; $3,100$; $2,316 \text{ \AA}$), белита ($d = 2,768$; $1,974 \text{ \AA}$) и смешанных фаз ($d = 2,180$; $1,922 \text{ \AA}$), что свидетельствует о незавершенности гидратации к 28-м суткам. Естественная карбонизация образца выражается в присутствии кальцита CaCO_3 ($d = 3,856$; $3,027 \text{ \AA}$). Гидросиликаты кальция ($d = 7,272 \text{ \AA}$) характеризуются низкой интенсивностью дифракционных максимумов и идентифицируются преимущественно по диффузному гало в диапазоне углов $2\theta = 25\text{--}35^\circ$, что указывает на их низкопорядоченное, гелеобразное состояние.

Модификация системы добавкой K1W (рис. 3) существенно интенсифицирует гидратационные процессы. Отмечается снижение пиковой интенсивности портландита, что указывает на его активное вовлечение во вторичное структурообразование. Параллельно возрастает интенсивность рефлексов этtringита (в частности, при $d = 9,681$; $5,581$; $4,670$; $2,741 \text{ \AA}$), подтверждая ускоренную гидратацию алюминатов на ранних стадиях.

Снижение доли свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ сопровождается ростом диффузного фона ($2\theta =$

$28\text{--}35^\circ$), что свидетельствует о генерации дополнительного объема аморфной гидросиликатной фазы. Закономерно снижается интенсивность пиков алита и белита. Данные структурные изменения подтверждают каталитическую функцию K1W в повышении степени конверсии клинкера, что коррелирует с ранее установленным ростом физико-механических характеристик цементного камня.

Наиболее глубокая трансформация фазового состава наблюдается в матрице, содержащей бинарный микронаполнитель в сочетании с K1W (рис. 4). Ключевым маркером синергетического эффекта является появление дифракционных отражений низкоосновных гидросиликатов кальция (C–S–H-фаз) при $d = 3,337$ и $2,741 \text{ \AA}$. Их кристаллизация инициирована пуццолоановой реакцией между высокоактивным диоксидом кремния микрокремнезема и портландитом:



Вследствие активного протекания данной реакции рефлексы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ практически нивелируются по сравнению с эталонными сериями. Присутствие мраморного микронаполнителя детерминируется четкими пиками кальцита ($d = 3,859$; $3,026$; $2,280 \text{ \AA}$).

В данной полидисперсной системе карбонат кальция выполняет двойную функцию: действует как уплотняющий микрозаполнитель и служит центрами нуклеации для направленного роста гидратных новообразований.

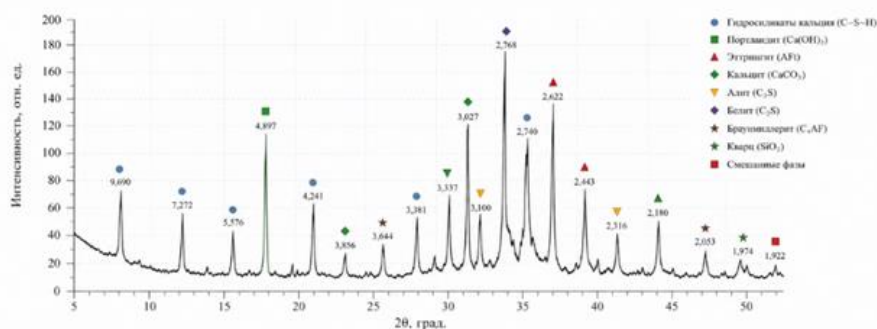


Таблица – Результаты рентгенофазового анализа цементного камня

№	2θ, град.	d, Å	Минерал	Фаза	№	2θ, град.	d, Å	Минерал	Фаза	№	2θ, град.	d, Å	Минерал	Фаза
1	9,12	9,690	Этtringит	AFt	8	26,37	3,381	Алит	C_3S	15	34,41	2,602	Этtringит	AFt
2	12,17	7,272	Гидросиликаты кальция	C–S–H	9	26,68	3,337	Кварц	SiO_2	16	36,73	2,443	Портландит	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
3	15,89	5,576	Этtringит	AFt	10	29,47	3,027	Кальцит	CaCO_3	17	38,97	2,316	Алит	C_3S
4	18,09	4,897	Портландит	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	11	28,85	3,100	Алит	C_3S	18	41,35	2,180	Алит + Белит	$\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S}$
5	20,93	4,241	Этtringит	AFt	12	32,18	2,768	Белит	C_2S	19	43,95	2,053	Бруцитсерит	C_4AF
6	22,99	3,856	Кальцит	CaCO_3	13	32,73	2,740	Гидросиликаты кальция	C–S–H	20	46,32	1,974	Белит	C_2S
7	24,47	3,644	Бруцитсерит	C_4AF	14	34,47	2,626	Этtringит	AFt	21	48,68	1,922	Портландит + Алит	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{C}_3\text{S}$

Рис. 2. Рентгенограмма контрольного цементного камня в возрасте 28 суток твердения



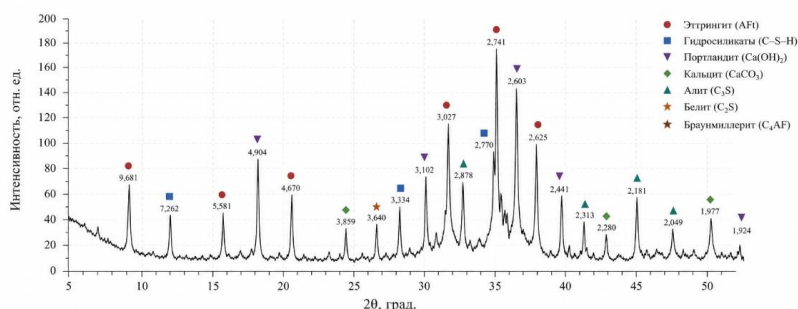


Таблица – Результаты рентгенофазового анализа цементного камня

№	2θ, град.	d, Å	Минерал	Фаза	№	2θ, град.	d, Å	Минерал	Фаза	№	2θ, град.	d, Å	Минерал	Фаза
1	9,681	9,681	Эттрингит	AFI	8	26,74	3,334	Гидросиликаты	C-S-H	15	36,75	2,441	Портландит	Ca(OH) ₂
2	11,90	7,262	Гидросиликаты	C-S-H	9	28,70	3,102	Портландит	Ca(OH) ₂	16	38,90	2,313	Алит	C ₂ S
3	15,80	5,581	Эттрингит	AFI	10	30,10	3,027	Кальцит	CaCO ₃	17	39,45	2,280	Кальцит + Белит	CaCO ₃ + C ₂ S
4	18,08	4,904	Портландит	Ca(OH) ₂	11	30,60	2,878	Белит	C ₂ S	18	41,20	2,181	Алит + Белит	C ₂ S + C ₂ S
5	19,00	4,670	Эттрингит	AFI	12	32,20	2,770	Гидросиликаты	C-S-H	19	43,50	2,049	Браунмиллерит + Белит	C ₄ AF + C ₂ S
6	23,07	3,859	Кальцит	CaCO ₃	13	32,82	2,741	Эттрингит	AFI	20	46,00	1,977	Белит	C ₂ S
7	24,48	3,640	Белит	C ₂ S	14	34,40	2,625	Эттрингит	AFI	21	48,25	1,924	Портландит + Алит	Ca(OH) ₂ + C ₂ S

Рис. 3. Рентгенограмма цементного камня с ПФД в возрасте 28 суток твердения

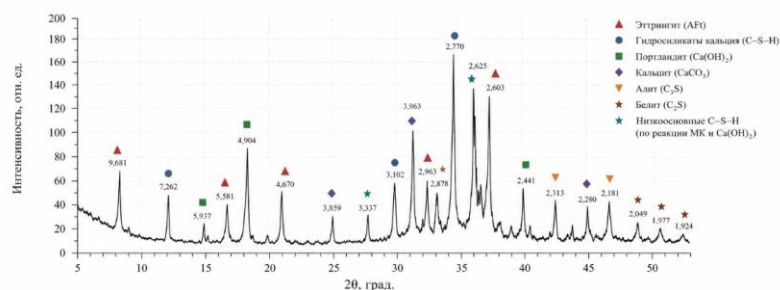


Таблица – Результаты рентгенофазового анализа цементного камня

№	2θ, град.	d, Å	Минерал	Фаза	№	2θ, град.	d, Å	Минерал	Фаза	№	2θ, град.	d, Å	Минерал	Фаза
1	9,681	9,681	Эттрингит	AFI	9	25,68	3,102	Гидросиликаты кальция	C-S-H	17	36,75	2,441	Портландит	Ca(OH) ₂
2	11,90	7,262	Гидросиликаты кальция	C-S-H	10	26,74	3,026	Кальцит	CaCO ₃	18	38,90	2,313	Алит	C ₂ S
3	14,98	5,937	Гидросиликаты кальция	C-S-H	11	27,80	2,963	Эттрингит	AFI	19	39,45	2,280	Кальцит + Белит	CaCO ₃ + C ₂ S
4	15,81	5,581	Эттрингит	AFI	12	28,70	2,878	Белит	C ₂ S	20	41,20	2,181	Алит	C ₂ S
5	18,08	4,904	Портландит	Ca(OH) ₂	13	32,20	2,770	Гидросиликаты кальция	C-S-H	21	43,50	2,049	Белит	C ₂ S
6	19,00	4,670	Эттрингит	AFI	14	32,72	2,741	Низкоосновные C-S-H (по реакции МК и Ca(OH) ₂)	C-S-H (по реакции МК и Ca(OH) ₂)	22	46,00	1,977	Белит	C ₂ S
7	20,57	3,859	Кальцит	CaCO ₃	15	34,10	2,625	Эттрингит	AFI	23	48,25	1,924	Портландит + Алит	Ca(OH) ₂ + C ₂ S
8	24,02	3,337	Низкоосновные C-S-H	C-S-H (по реакции МК и Ca(OH) ₂)	16	34,44	2,603	Эттрингит	AFI	24	49,50	—	Аморфная фаза	—

Рис. 4. Рентгенограмма комплексно-модифицированного цементного камня с бинарным микронаполнителем (МК 10 % + МА 15 %) и полифункциональной добавкой K1W (0,9 %) в возрасте 28 суток твердения

Это способствует значительному росту интенсивности пиков эттрингита и формированию плотной кристаллогидратной сетки. Остаточное содержание негидратированных силикатов (алита и белита) в этом составе минимально, что свидетельствует о предельно высокой степени гидратации цемента. Таким образом, РФА подтверждает комплексный механизм оптимизации структуры: микрокремнезем химически трансформирует нестабильный портландит в прочный C-S-H гель, мрамор обеспечивает микроупаковку матрицы, а K1W катализирует кинетику реакций. Совокупность этих факторов обуславливает формирование сверхплотной композитной структуры, что полностью валидирует результаты механических испытаний образцов.

4. ВЫВОДЫ

Результаты рентгенофазового анализа подтвердили, что комплексное модифицирование способствует снижению содержания свободного портландита, образованию дополнительных низкоосновных гидросиликатов кальция. Формирование данных новообразований обусловлено взаимодействием микрокремнезёма с гидроксидом кальция и является основной причиной уплотнения структуры цементного камня и повышения его прочностных характеристик.

Беспрогревная технология производства фибробетона, основанная на управлении кинетикой гидратации через снижение энергии активации и гетерогенную нуклеацию, является научно обоснованным ответом на вызовы



современной экономики. Она позволяет реализовать потенциал композиционных вяжущих и синтетической фибры, обеспечивая создание долговечных материалов с минимальным углеродным следом.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

[1] Мчедлов-Петросян О.П., Ушеров-Маршак А.В., Урженко А.М. *Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов*. — М.: Стройиздат, 1984.

[2] Ушеров-Маршак А.В. *Калориметрия цемента и бетона*. — Харьков: Колорит, 2002.

[3] ГОСТ 24211-2008. *Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия*.

[4] Plank J., Sakai E. et al. Chemical admixtures — Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability // *Cement and Concrete Research*. — 2015. — Vol. 78.

[5] Lothenbach B., Le Saout G. et al. Influence of limestone on the hydration of Portland cement // *Cement and Concrete Research*. — 2008. — Vol. 38. — P. 848–860.

[6] Scrivener K.L., Juilland P., Monteiro P.J.M. Advances in understanding hydration of Portland cement // *Cement and Concrete Research*. — 2015. — Vol. 78. — P. 38–56.

[7] Дворкин Л.И., Кизима С.С. *Эффективные литые бетоны на основе отходов промышленности*. — Львов: Вища школа, 1986.

[8] Zhu H. et al. The effect of thermal history on the properties of steel fiber reinforced concrete // *Cement and Concrete Composites*. — 2020.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS/ ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Адилходжаев Анвар Ишанович Советник ректора, д.т.н., профессор, Ташкентский государственный транспортный университет
E-mail: anvar_1950@mail.ru
Tel.: +998933981926
<https://orcid.org/0000-0001-5729-5178>

Бабажанов Азиз Файзитдинович докторант кафедры «Строительство зданий и промышленных сооружений», Ташкентский государственный транспортный университет
E-mail: babajanov.aziz@gmail.com
Tel.: +998909542901
<https://orcid.org/0009-0002-7990-0206>



Analysis of Modern Research on the Impact of Desert Winds and Sand Processes on Railway Tracks

A.Yu. Mamadaliev¹^a, S. S. Jabbarova²^b

¹Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan

²Tashkent State Transport University

Abstract: The article provides an analytical review of modern domestic and foreign research dedicated to the impact of desert winds and sand processes on railway infrastructure. The climatic and aerodynamic features of arid regions, the mechanisms of sand drift formation, and their impact on the elements of the road's upper structure have been examined. A comparative analysis of modern engineering solutions for protecting railways from wind and sand impacts has been conducted. It has been established that foreign research is primarily focused on the application of CFD modeling, digital monitoring, and aerodynamic analysis of sand flows, while domestic research focuses on increasing the operational stability of the upper track structure and improving sand protection structures. The main scientific problems have been identified and promising areas for further research in the field of increasing the stability of railway infrastructure in desert regions have been identified.

Keywords: Railway track, desert winds, sand drift, aerodynamics, arid regions, ballast layer, CFD modeling, engineering protection, operational stability

Анализ Современных Исследований Воздействия Пустынных Ветров и Песчаных Процессов на Железнодорожные Пути

А.Ю. Мамадалиев¹^a, С. С. Жаббарова²^b

¹Министерство высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан

²Ташкентский государственный транспортный университет

Аннотация: В статье выполнен аналитический обзор современных отечественных и зарубежных исследований, посвящённых воздействию пустынных ветров и песчаных процессов на железнодорожную инфраструктуру. Рассмотрены климатические и аэродинамические особенности аридных регионов, механизмы формирования песчаных заносов и их влияние на элементы верхнего строения пути. Выполнен сравнительный анализ современных инженерных решений по защите железных дорог от ветро-песчаных воздействий. Установлено, что зарубежные исследования преимущественно ориентированы на применение CFD-моделирования, цифрового мониторинга и аэродинамического анализа песчаных потоков, тогда как отечественные исследования сосредоточены на повышении эксплуатационной устойчивости верхнего строения пути и совершенствовании пескозащитных сооружений. Выявлены основные научные проблемы и определены перспективные направления дальнейших исследований в области повышения устойчивости железнодорожной инфраструктуры в условиях пустынных регионов.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, пустынные ветры, песчаные заносы, аэродинамика, аридные регионы, балластный слой, CFD-моделирование, инженерная защита, эксплуатационная устойчивость


1. ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация железных дорог в условиях пустынных территорий сопровождается воздействием сложных природно-климатических факторов, среди которых особую опасность представляют регулярные пустынные ветры, песчаные бури и процессы эолового переноса

песка [1]. Под воздействием интенсивных воздушных потоков происходит перенос песчаных масс, приводящий к образованию песчаных заносов, загрязнению балластного слоя и ускоренному износу элементов верхнего строения пути [2].

Особую актуальность данная проблема приобретает для стран Центральной Азии,

^a <https://orcid.org/0009-0004-2390-6961>

^b <https://orcid.org/0000-0003-3691-1079>



Ближнего Востока, Китая и Северной Африки, где значительная часть железнодорожных линий проходит через аридные территории [3]. Для Республики Узбекистан вопросы обеспечения устойчивой эксплуатации железнодорожной инфраструктуры в условиях пустынь Кызылкум и Каракум имеют стратегическое значение в развитии международных транспортных коридоров и обеспечении транспортной безопасности [12].

Современные исследования показывают, что существующие методы защиты железнодорожной инфраструктуры не всегда обеспечивают необходимую эффективность в условиях усиления ветро-песчаных процессов и климатических изменений [3, 4]. Зарубежные исследования преимущественно ориентированы на применение CFD-моделирования, цифрового мониторинга и автоматизированного анализа песчаных потоков [3, 4, 10], тогда как отечественные исследования сосредоточены на повышении устойчивости верхнего строения пути и совершенствовании пескозащитных сооружений [12–16].

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых воздействию пустынных ветров на железнодорожную инфраструктуру, вопросы комплексного учёта аэродинамических, геотехнических и эксплуатационных факторов остаются недостаточно изученными.

В существующих исследованиях недостаточно внимания уделяется интеграции аэродинамического моделирования, мониторинга состояния балластного слоя и ресурсосберегающих инженерных решений применительно к условиям аридных регионов Центральной Азии.

В связи с этим возникает необходимость систематизации современных научных исследований, выявления существующих научных проблем и определения перспективных направлений совершенствования инженерных решений по защите железнодорожных путей от воздействия пустынных ветров и песчаных процессов.

2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является аналитический обзор современных отечественных и зарубежных исследований воздействия пустынных ветров и песчаных процессов на железнодорожные пути, а также выявление основных научных проблем и перспективных направлений совершенствования инженерных решений в условиях аридных регионов.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- выполнить анализ современных исследований воздействия пустынных ветров на железнодорожную инфраструктуру.

- исследовать климатические и аэродинамические особенности пустынных регионов.

- проанализировать влияние песчаных заносов на элементы верхнего строения пути.

- выполнить сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта эксплуатации железных дорог в пустынных районах.

- выявить основные недостатки существующих инженерных решений.

- Определить перспективные направления дальнейших научных исследований.

Анализ воздействия пустынных ветров на железнодорожный путь

Пустынные ветры являются одним из наиболее опасных природно-климатических факторов, негативно влияющих на железнодорожную инфраструктуру аридных регионов. Под воздействием интенсивных воздушных потоков происходит перенос песчаных масс, образование песчаных заносов и загрязнение элементов верхнего строения пути [1].

Таблица 1

Основные последствия воздействия пустынных ветров

№	Фактор воздействия	Влияние на железнодорожный путь	Основные последствия
1	Перенос песчаных масс	Засыпание рельсов и балластного слоя	Нарушение движения поездов
2	Абразивное воздействие песка	Износ рельсов, креплений и стрелочных переводов	Снижение срока службы элементов пути
3	Высокая скорость ветра	Дестабилизация земляного полотна	Деформация железнодорожного пути
4	Песчаные бури	Ограничение видимости на железной дороге	Снижение безопасности движения
5	Загрязнение балластного слоя	Ухудшение дренажных свойств балласта	Снижение несущей способности и пути



6	Эоловые процессы	Формирование песчаных дюн и заносов	Увеличение эксплуатационных расходов
7	Температурные колебания	Воздействие на элементы верхнего строения пути	Появление деформаций и трещин
8	Накопление песка на инфраструктуре	Нарушение работы систем сигнализации и связи	Повышение риска аварийных ситуаций

Фундаментальные исследования процессов ветрового переноса песка были выполнены R.A. Bagnold, который установил, что интенсивность песчаных процессов определяется скоростью ветра, гранулометрическим составом песка и аэродинамическими особенностями поверхности [1]. Исследования Kok J.F. и соавторов показали, что интенсивность переноса песчаных частиц зависит от турбулентности воздушного потока, размеров песчаных частиц и состояния поверхности грунта [2].

Зарубежные исследования преимущественно ориентированы на изучение аэродинамических процессов формирования песчаных заносов вблизи железнодорожной инфраструктуры. Bruno L., Horvat M. и Raffaele L. установили, что железнодорожные насыпи изменяют структуру воздушного потока, вызывая локальное накопление песка вблизи железнодорожного полотна [3]. Авторы отмечают, что наиболее опасными зонами являются насыпи и стрелочные переводы, где происходит изменение аэродинамического режима движения воздушных потоков.



Рис. 1. Воздействие пустынных ветров на железнодорожный путь

Исследования Li X., Liu Y. и Zhang N. показали, что применение наклонных

аэродинамических барьеров позволяет снизить объем песчаных заносов до 42 % [4]. Saraireh H. и соавторы установили, что железнодорожное полотно в пустынных районах способствует интенсивному осаждению песка на поверхности пути [5].

Отечественные исследования преимущественно направлены на изучение устойчивости верхнего строения пути и совершенствование пескозащитных сооружений для условий пустынь Кызылкум и Каракум.

Исследования Т.И. Фазилова, М.М. Мирахмедова, А.М. Абдукаримова, Ш.Ш. Абдукамилова, С.Т. Джаббарова и М.К. Музаффаровой показали, что загрязнение балластного слоя песком приводит к снижению его несущей способности, ухудшению дренажных свойств и ускоренному развитию остаточных деформаций пути [12–16].

Климатические и аэродинамические особенности пустынных регионов

Пустынные регионы характеризуются высокой скоростью ветра, низкой влажностью воздуха, резкими температурными колебаниями и активными эоловыми процессами, что является основной причиной формирования песчаных заносов на железнодорожных путях [1].

Исследования Bruno L., Horvat M. и Raffaele L. показали, что железнодорожные насыпи изменяют структуру воздушного потока

и способствуют локальному накоплению песка вдоль железнодорожного полотна [3]. Наиболее опасными зонами являются насыпи, искусственные сооружения и стрелочные переводы.

Современные зарубежные исследования подтверждают высокую эффективность применения CFD-моделирования для прогнозирования движения песчаных потоков и оценки аэродинамических параметров пескозащитных сооружений [3, 4]. В частности, исследования Li X. и соавторов показали, что применение аэродинамических барьеров позволяет существенно снизить интенсивность песчаных заносов [4].

В отечественных исследованиях основное внимание уделяется изучению особенностей ветрового режима пустынь Кызылкум и Каракум, а также вопросам адаптации инженерных решений к природно-климатическим условиям Центральной Азии [12–16]. Вместе с тем вопросы цифрового мониторинга и математического прогнозирования песчаных процессов остаются недостаточно изученными.



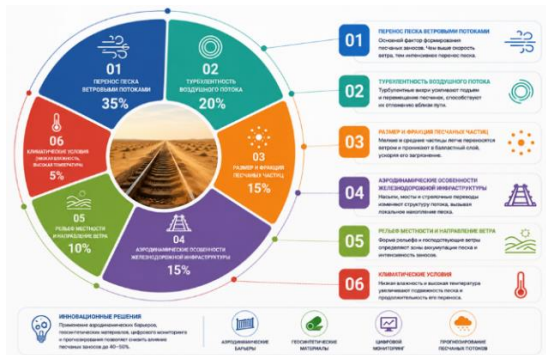


Рис. 2. Диаграмма основных факторов воздействия влияющих на формирование песчаных заносов и состояние пути

Влияние песчаных заносов на элементы верхнего строения пути

Песчаные заносы являются одним из наиболее опасных факторов, влияющих на техническое состояние верхнего строения железнодорожного пути в пустынных регионах. Под воздействием ветро-песчаных потоков происходит загрязнение балластного слоя, абразивный износ рельсов и креплений, нарушение работы стрелочных переводов и снижение устойчивости пути [6–9].

Исследования Г.М. Шахунянца показали, что балластный слой выполняет функцию распределения нагрузок и обеспечения устойчивости рельсошпальной решётки [7]. Автор установил, что загрязнение балласта мелкими песчаными частицами приводит к ухудшению дренажных свойств и снижению несущей способности пути.

Е.С. Ашпиз доказал, что проникновение песка в поровое пространство балласта приводит к уменьшению коэффициента фильтрации и ускоренному развитию остаточных деформаций пути [6]. Исследования Колос А.Ф. и Николаитис Д.С. показали, что загрязнение балласта песком вызывает рост динамических напряжений в рельсошпальной решётке и приводит к неравномерной осадке железнодорожного пути [9].

Зарубежные исследования также подтверждают значительное влияние песчаных заносов на железнодорожную инфраструктуру. Bruno L. и соавторы установили, что накопление песка в зоне рельсов и стрелочных переводов нарушает работу систем сигнализации, снижает устойчивость движения поездов и увеличивает риск аварийных ситуаций [3].

Таблица 2

Основные последствия воздействия песчаных заносов на элементы верхнего строения пути

Элемент верхнего строения пути	Воздействие песчаных заносов	Основные последствия
--------------------------------	------------------------------	----------------------

Рельсы	Абразивный износ поверхности	Ускоренное развитие дефектов
Балластный слой	Загрязнение песком	Снижение дренажных свойств
Шпалы	Накопление песка и влаги	Ухудшение устойчивости пути
Скрепления	Износ и засорение	Ослабление крепления рельсов
Стрелочные переводы	Засыпание песком	Нарушение работы переводов
Земляное полотно	Эоловая эрозия	Деформация и осадка пути

Эксплуатационные проблемы железных дорог в условиях пустынь

Эксплуатация железных дорог в пустынных районах сопровождается воздействием ветро-песчаных потоков, высоких температур и интенсивных эоловых процессов. Основными эксплуатационными проблемами являются песчаные заносы пути, загрязнение балластного слоя, абразивный износ элементов верхнего строения пути и нарушение работы устройств сигнализации [3, 10, 11].

Исследования Cheng J. и Saraireh H. показали, что сильные ветры и высокая подвижность песчаных частиц в районах Гоби, Синьцзяна и Ближнего Востока вызывают регулярные песчаные заносы и повышение эксплуатационных затрат железных дорог [5, 10].

Исследования Fathali M. и соавторов подтверждают, что для эффективной эксплуатации железных дорог в пустынных условиях необходимы специальные инженерные решения и комплексные системы защиты железнодорожной инфраструктуры [11].

Проведённый анализ показывает, что существующие методы защиты железных дорог преимущественно ориентированы на локальные инженерные решения и не обеспечивают комплексного учёта аэродинамических, геотехнических и эксплуатационных факторов.

Исследования J. Cheng и H. Saraireh показали, что сильные ветры и высокая подвижность песчаных частиц в районах Гоби, Синьцзяна и Ближнего Востока вызывают регулярные песчаные заносы и повышают эксплуатационные затраты железных дорог.



Таблица 3
Эксплуатационные последствия воздействия
песчаных процессов на железнодорожную
инфраструктуру

№	Эксплуатационная проблема	Причина возникновения	Влияние на железнодорожную инфраструктуру	Основные последствия
1	Песчаные заносы пути	Перенос песка ветром	Засыпание рельсов и стрелочных переводов	Ограничение движения поездов
2	Загрязнение балластного слоя	Проникновение песчаных частиц в балласт	Ухудшение дренажных свойств	Снижение несущей способности пути
3	Абразивный износ элементов пути	Воздействие песчаных потоков	Износ рельсов, скреплений и оборудования	Сокращение срока службы инфраструктуры
4	Нарушение работы стрелочных переводов	Накопление песка в подвижных элементах	Сбои в работе переводов	Повышение риска аварийных ситуаций
5	Воздействие на системы сигнализации	Засорение датчиков и оборудования песком	Нарушение работы автоматики и связи	Снижение безопасности движения
6	Деформация земляного полотна	Эоловые процессы и ослабление грунта	Неравномерные осадки и деформации пути	Потеря устойчивости земляного полотна
7	Рост эксплуатационных затрат	Постоянная	Увеличение	Повышение

	американские затраты	очистка и ремонт пути	объём профилактических работ	стоимости содержания железной дороги
8	Снижение скорости движения поездов	Песчаные заносы и ухудшение состояния пути	Ограничение эксплуатационных режимов	Снижение пропускной способности линии

3. АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В ПУСТЫННЫХ РАЙОНАХ

Сравнительный анализ современных исследований показывает, что зарубежные научные работы преимущественно ориентированы на применение цифровых технологий, CFD-моделирования, автоматизированного мониторинга и аэродинамического прогнозирования песчаных процессов [3–5, 10].

В исследованиях зарубежных учёных основное внимание уделяется моделированию воздушных потоков, оценке движения песчаных частиц и разработке аэродинамических барьеров. Значительное развитие получили технологии цифрового мониторинга и GIS-анализа процессов накопления песка.

Отечественные исследования преимущественно сосредоточены на повышении устойчивости верхнего строения пути, совершенствовании пескозащитных сооружений и разработке организационно-технологических методов эксплуатации железных дорог в условиях пустынных территорий [12–16].

Таблица 4
Анализ научных результатов исследований по
песчаным заносам и методам защиты
железных дорог

№	Учёный	Период исследований	Основные научные результаты	Предложения и рекомендации
1	С.Н. Попов	1950 – 1970	Обоснование закономерности работы балластного слоя под	Нормирование допустимых напряжений в балласте



			динамическими нагрузками	
2	Е.С. Варызгин	1960 – 1980	Оценил эксплуатационную надёжность балластного слоя	Комплексная оценка устойчивости пути
3	Ю.П. Смолинский	1960 – 1985	Разработал методы расчёта конструктивной нагрузки	Оптимизация параметров в верхнем строении пути
4	Г.М. Шахунянц	1960 – 1980	Обосновал систему «рельс–шпала–балласт» как единую инженерную систему	Комплексный расчёт балластной призмы и земляного полотна
5	Ю.В. Ефремов	1970 – 1990	Исследовал деформацию балластного слоя	Предложил меры по укреплению балласта
6	Г.Н. Жинкин	1970 – 1990	Исследовал инженерные сооружения для защиты от песка	Механические барьеры и пескоулавливающие конструкции
7	А.И. Кистанов	1970 – 1990	Оценил деформацию балласта под воздействием мелких частиц	Система эксплуатационной оценки балласта
8	И.В. Прокудин	1970 – 1995	Проанализировал факторы деформации земляного полотна	Технологии укрепления земляного полотна

9	М.А. Раскин	1970 – 1995	Исследовал причины деформаций железнодорожного пути	Усиление эксплуатационного контроля
10	Л.К. Громов	1970 – 1990	Проанализировал влияние эоловых процессов на транспорт	Разработка защитных мероприятий на основе ветрового режима
11	Тупе Шарль	1970 – 2000	Исследовал эффективность механических пескоулавливающих барьеров	Размещение защитных барьеров по направлению песчаных потоков
12	Чему Жильбер	1970 – 2000	Разработал методы защиты в пустынных районах	Внедрение пескоулавливающих технологий
13	Т.И. Фазиллов	1970 – 2000	Развил теорию защиты железных дорог в условиях Кызылкума	Механические барьеры и пескоулавливающие сооружения
14	А.Н. Маргольев	1980 – 2000	Исследовал влияние мелких частиц на балласт	Совершенствование системы очистки балласта
15	М. Курель	1980 – 2010	Изучил движение песчаных потоков и барханов	Математическая оценка движения песка
16	Р.С. Закиров	1980 – 2010	Обосновал количественную оценку песчаных процессов	Прогнозирование ветровых и песчаных процессов



17	Е.С. Ашпиз	1980 – 2015	Исследовал снижение пористости и дренажа балласта	Регулярная очистка и мониторинг балласта
18	Г.Г. Коншин	1980 – 2000	Изучил эксплуатацию железных дорог в песчаных районах	Усиление профилактического обслуживания
19	Л.С. Липидус	1980 – 2005	Исследовал устойчивость земляного полотна	Геотехнический мониторинг
20	Н. Матсуо	1990 – 2010	Разработал аэродинамические модели движения песка	CFD-моделирование и прогнозирование ветровых потоков
21	А.Ф. Колос	1990 – 2010	Исследовал динамику загрязнения балласта	Эксплуатационная оценка балластного слоя
22	Д.С. Николайтис	1990 – 2010	Оценил срок службы балластного слоя	Оптимизация балластных материалов
23	М.М. Мирахмедов	1990 – 2020	Разработал организационно-технологическую систему защиты железных дорог	Ресурсосберегающие технологии и профилактический мониторинг
24	Й. Ашкенязи	2000 – 2020	Моделировал движение песка на основе GIS и спутниковых данных	Дистанционный мониторинг и прогнозирование

25	А.М. Абдукаримов	2000 – 2020	Оценил устойчивость земляного полотна в песчаных районах	Меры по защите земляного полотна
26	Ш.Ш. Абдукаримов	2000 – 2020	Исследовал эффективность пескоулавливающих сооружений	Адаптация защитных барьеров к местному ветровому режиму
27	С.Т. Джаббаров	2005 – н.в.	Оценил несущую способность загрязнённого балласта	Расчёт напряжённых зон и мониторинг
28	М.К. Музафарова	2010 – н.в.	Предложила малозатратные технологии и защиты от экзогенных процессов	Профилактическое обслуживание и ресурсосбережение
29	А.Ю. Мамадалиев	2011 – н.в.	Совершил организационно-технологические решения защиты железных дорог	Ресурсосберегающие методы защиты и профилактики

Несмотря на значительные достижения отечественных и зарубежных исследований, вопросы комплексной интеграции аэродинамического моделирования, цифрового мониторинга, геотехнического анализа и ресурсосберегающих технологий остаются недостаточно изученными.

Это подтверждает необходимость дальнейших исследований, направленных на разработку современных инженерных решений по снижению негативного воздействия пустынных ветров на железнодорожные пути.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый аналитический обзор современных



научных исследований показал, что воздействие пустынных ветров и песчаных процессов является одним из наиболее опасных факторов, влияющих на эксплуатационную устойчивость железнодорожной инфраструктуры в аридных регионах.

Установлено, что зарубежные исследования преимущественно ориентированы на применение CFD-моделирования, цифрового мониторинга и аэродинамического анализа песчаных потоков, тогда как отечественные исследования сосредоточены на вопросах повышения устойчивости верхнего строения пути и совершенствования пескозащитных сооружений.

Выявлено, что существующие инженерные решения не обеспечивают комплексного учёта аэродинамических, геотехнических и эксплуатационных факторов, что снижает эффективность защиты железнодорожной инфраструктуры в условиях пустынных регионов.

На основании выполненного анализа определены перспективные направления дальнейших исследований, включающие разработку комплексных аэродинамических моделей песчаных процессов, внедрение цифрового мониторинга состояния железнодорожного пути и совершенствование ресурсосберегающих пескозащитных сооружений для условий аридных регионов Центральной Азии.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

[1] Bagnold R.A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Methuen & Co Ltd, 1941. 265 p.

[2] Kok J.F., Parteli E.J.R., Michaels T.I., Karam D.B. The physics of wind-blown sand and dust // *Reports on Progress in Physics*. 2012. Vol. 75. No. 10. Article 106901. DOI: 10.1088/0034-4885/75/10/106901

[3] Bruno L., Horvat M., Raffaele L. Windblown sand along railway infrastructures: A review of challenges and mitigation measures // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018. Vol. 177. Pp. 340–365. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.04.009

[4] Li X., Liu Y., Zhang N. Aerodynamic performance of sand-control barriers for railway infrastructure in desert regions // *Aeolian Research*. 2022. Vol. 58. Article 100847. DOI: 10.1016/j.aeolia.2022.100847

[5] Saraireh H., Altarawneh M., Abu Rajab J. Sand accumulation mechanisms on railway tracks in arid regions // *Transportation Geotechnics*. 2022. Vol. 35. Article 100781. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100781

[6] Ashpiz E.S. Ballast layer contamination and railway track deformation mechanisms // *Procedia*

Engineering. 2017. Vol. 189. Pp. 754–760. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.119

[7] Шахунянц Г.М. *Железнодорожный путь*. Москва: Транспорт, 1987. 479 с.

[8] Попов С.Н. *Основы механики железнодорожного пути*. Москва: Транспорт, 1965. 368 с.

[9] Kolos A.F., Nikolaitis D.S. Influence of ballast contamination on railway track stability // *Vestnik Transporta*. 2010. No. 4. Pp. 25–31.

[10] Cheng J., Dong Z., Li S. Wind-sand flow structure and its influence on railway engineering in desert regions // *Aeolian Research*. 2021. Vol. 49. Article 100662. DOI: 10.1016/j.aeolia.2020.100662

[11] Fathali M., Amini A., Zare S. Railway maintenance challenges under desert environmental conditions // *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 115. Article 104611. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104611

[12] Фазиллов Т.И. *Защита железных дорог от песчаных заносов в условиях пустынь Средней Азии*. Ташкент: Фан, 1982. 214 с.

[13] Закиров Р.С. Исследование ветро-песчаных процессов в пустынных районах Узбекистана // *Проблемы транспорта и логистики*. 2015. №2. С. 44–51.

[14] Мирахмедов М.М. Организационно-технологические методы защиты железных дорог от песчаных заносов // *Транспорт Евразии*. 2018. №3. С. 28–36.

[15] Абдукаримов А.М., Абдукамилов Ш.Ш. Повышение устойчивости железнодорожного пути в условиях песчаных процессов // *Вестник ТашГУТ*. 2021. №1. С. 55–63.

[16] Djabbarov S.T., Muzaffarova M.K., Mamadaliev A.Yu. Assessment of ballast contamination under wind-sand impacts in arid railway regions // *Transport Problems*. 2023. Vol. 18. No. 2. Pp. 119–128. DOI: 10.21307/tp-2023-011.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS/ ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

А.Ю. Мамадалиев PhD, доцент, Министерство высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан
E-mail: aziz_mamadaliyev@mail.ru
Тел: +998 90 136 49 49

С. С. Жаббарова Магистрант, Ташкентский государственный транспортный университет
E-mail: sjabbarova@mail.ru



Improving Saline Soils with a Fiberglass Reinforcing Layer

Z. Kakharov¹^a, I. Purtseladze¹^b

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This article examines the problems of saline soils, which lead to a decrease in their stability due to wetting and drying, using the addition of fiberglass. When fiberglass was added to soils in both dry and wet conditions, soil settlement and dynamic parameters significantly increased with increasing fiber content. Furthermore, settlement, velocity, and soil displacement decreased with the addition of fiberglass, while acceleration increased. The stability parameters of soil treated with fiberglass at any percentage significantly improve with increasing fiberglass content. The practical benefit of these results in engineering applications lies in their ability to construct buildings on challenging soils.

Keywords: Soils, saline soils, collapsible soils, nylon composite, fiberglass, sand layer, reinforcement

Улучшение Засоленных Грунтов с Помощью Армирующего Слоя из Стекловолокна

З. Кахаров¹^a, И. Пурцеладзе¹^b

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В данной статье приведены проблемы засоленных грунтов, приводящие к снижению их устойчивости из-за замачивания и высыхания, с помощью добавления стекловолокна. При добавлении стекловолокна в грунт в сухом и влажном состоянии осадка грунта и динамические параметры значительно возрастали с увеличением доли волокна. При этом осадка, скорость и смещение грунта уменьшались при добавлении стекловолокна, а ускорение увеличивалось. Параметры стабильности грунта, обработанного стекловолокном в любом процентном соотношении, значительно улучшатся с увеличением доли стекловолокна. Практическая польза этих результатов в инженерных приложениях заключается в том, что они позволяют строителям возводить здания на сложных грунтах.


Ключевые слова: Грунты, засоленные грунты, проваливаемые грунты, нейлоновое концентрация, стекловолокно, песчаный слой, армирование

1. ВВЕДЕНИЕ

Проваливаемые грунты встречаются в большинстве стран мира, в основном в засушливых или полусушливых регионах. Этот тип грунта (засоленный грунт) похож на проваливаемый грунт тем, что оба типа теряют свою устойчивость под воздействием нагрузок или воды, что создает ощущение непосредственной опасности для построенных на нем сооружений, как только он намокает. В сухом состоянии и в своей нормальной форме грунт обладает высокой поверхностной прочностью на сдвиг и жесткостью; в насыщенном состоянии он может демонстрировать значительное уменьшение объема (проваливание, гидроконсолидация, гидрокомпрессия), а также падение прочности на сдвиг. Проваливаемые грунты — это те, которые проявляют это явление при низких уровнях напряжения. Источники воды

могут быть искусственными, такими как протечки водопроводных и канализационных труб и чрезмерное орошение, или природными, такими как изменения уровня грунтовых вод и количество осадков. Совместное воздействие веса и насыщения может привести к обрушению, или же вода сама по себе может нанести ему ущерб. Однако тщательное изучение этих грунтов стало возможным благодаря расширению современной инфраструктуры в засушливых регионах, что сопровождается масштабным использованием воды и проблемами, связанными со строительством. Обрушение грунта, вызванное увлажнением, может привести к потере от 2,0% до 6,0% его толщины. Образование пустот между частицами грунта приводит к изменению молекулярного состава грунтового скелета, что вызывает реорганизацию частиц грунта и снижает несущую способность грунта для зданий, построенных на нем. Это ускоряет скорость

^a <https://orcid.org/0000-0001-5965-3231>

^b <https://orcid.org/0000-0003-2229-3302>



снижения прочности грунта на сдвиг и вызывает резкое и непредвиденное проседание, что приводит к структурным проблемам для зданий и сооружений, на которых они построены. Для типичных зданий рекомендуется использовать плитные фундаменты, чтобы избежать этих проблем, но они дороги. Засоленные почвы состоят из гидратированных минералов гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, SiO_2 , кальцита CaCO_3 или пищевой соли (NaCl), покрывающих поверхность земли. Уровень грунтовых вод повышается в результате капиллярного действия и нагрева грунта, и соленость воды в этих почвах возрастает. Эти факторы также увеличили количество осаждения солей такого типа по мере испарения воды, что делает уровень грунтовых вод важнейшим компонентом засоленной почвы.

Использование стекловолокна в армированном грунте является старой и древней концепцией, согласно этому исследованию. Грунт подвергается ряду испытаний, включая уплотнение, анализ практического размера частиц и калифорнийский коэффициент несущей способности (КННС), с различным содержанием стекловолокна (0,4%, 0,8%, 1,2%, 1,6%, 2%, 2,5% и 3%). Уплотнение, тест на КННС и плотность грунта в городе улучшились на 1,2% и 1,6% соответственно, согласно данным.

Добавление стекловолокна влияет на прочность на сдвиг и деформационные характеристики глинистой и песчаной почвы. Результаты показали, что добавление стекловолокна в песчаную почву с плотностью от 35% до 85% значительно улучшает ее деформацию по сравнению с глинистой почвой.

Целесообразность использования извести в качестве стабилизирующего агента. Для большинства геотехнических проектов это экономически выгодно. Кроме того, они продемонстрировали, что, поскольку полимеры быстро затвердевают, их использование рекомендуется только в определенных случаях.

2. МЕТОДЫ

Путем подготовки и тестирования образцов почвы с различным содержанием стекловолокна (1%, 2%, 3%, 4% и 5% от сухого веса почвы) при сохранении неизменными остальных параметров почвы можно определить идеальную концентрацию нейлонового (стекловолоконного) волокна. Сравнение основано на динамических параметрах и осадке почвы как во влажных, так и в сухих условиях. Использование более чем 2% является экономически целесообразным и дает результаты, приближающиеся к 2%.

Для достижения статической относительной плотности всех слоев песчаной почвы в исследуемом контейнере почва подготавливается

с использованием метода дождевой обработки. Создание песчаной почвы в этом эксперименте и достижение равномерного почвенного слоя с необходимой плотностью зависят от скорости падения песчинок и объема выгрузки. При высоте падения 65 см для исследования требуется относительная плотность 50%. При высоте падения 65 см контейнер с песком заполняется слоями по 10 см на каждые 10 см высоты контейнера. После заполнения первого слоя используется подъемный каток, который поднимает земляной конус на 10 см, чтобы заполнить второй слой и поддерживать высоту падения на том же уровне. Как показано на рис. 2, это обеспечивает относительную плотность 50%.

Электронное измерительное устройство, известное как линейный дифференциальный преобразователь (ЛДП), может точно определять линейное перемещение. Это устройство состоит из трансформатора с внешней катушкой и центральным сердечником, который можно заменять. Центральный сердечник смещается внутри внешней катушки из-за структурных изменений, генерируя электрический сигнал, который может дистанционно и непрерывно записываться как в статическом, так и в динамическом режиме. Например, максимальное наблюдаемое смещение может зависеть от длины сердечника LVDT, которая может варьироваться от 10 до 50 мм. LVDT, который в данный момент отслеживает и записывает горизонтальное смещение, был затем подключен к регистратору данных. Характеристики LVDT включают идеальную чувствительность 2 мВ/В, максимальную скорость перемещения 10 м/с и самоопределяющуюся линейность 0,1 процента. Движения вперед и назад оцениваются на расстоянии 25 мм от земли. Они показаны на рис. 1.

Для определения динамической реакции фундамента проводятся эксперименты с использованием виброметров, измеряющих ускорение, скорость и амплитуду смещения. Он подключен к одноканальному цифровому виброметру (модель HG 6360) с точностью 0,001-4,0 мм. В зависимости от предустановленной функции его можно подключить к компьютеру для просмотра динамической реакции. Виброметр используется для измерения вибрационной реакции, как показано на рис. 1 и 2.





Рис. 1. Линейно-дифференциальный преобразователь перемещения LVDT



Рис. 2. Виброметр модель HG 6360

Испытание можно проводить в сухом и влажном состоянии в соответствии со следующими этапами:

Для проведения испытания модели использовался стальной контейнер размером (50 x 50) см и высотой 55 см. Для предотвращения отскока волны внутри контейнера на стенки контейнера был наложен слой резины толщиной 1 сантиметр. В контейнере должен находиться пять слоев песчаного грунта, каждый весом 42,6 кг. Общий вес грунта составлял 213 кг. Используя технологию дождевой подготовки грунта, армирующий материал укладывался на расстоянии 1 В размер 50 x 50 см в зависимости от процента армирования (1%, 2%, 3%, 4% и 5%). После завершения подготовки модели контейнер помещался в стальное основание, а в центре контейнера на земле устанавливался фундамент машины. Затем с помощью держателя грузов на основании машины устанавливались постоянные нагрузки. Вес машины составляет пять килограммов, а вес собственного веса — пять килограммов. Виброметр измеряет смещение, ускорение и скорость, а цифровой тахометр — частоту. Для измерения осадки фундамента используется линейный преобразователь перемещения (LVDT). При включении двигатель перемещается вниз и перпендикулярно земле. На выполнение этих испытаний требуется 30 минут, и каждые две минуты собираются показания

смещения, скорости, ускорения и осадки. Испытания проводятся с частотой 20 Гц, а этапы выполняются по аналогичной методике в сухих и влажных условиях.

При коэффициенте армирования 1% приведет к увеличению смещения на 25%, что указывает на меньшую жесткость. Однако более высокие коэффициенты армирования приводят к значительному уменьшению смещения; уменьшение на 40% наблюдается при 2% и 3%, на 65% при 4% и на 70% при 5%, что указывает на повышение жесткости и устойчивости конструкции.

3. ВЫВОД

Осадка засоленных грунтов уменьшается при использовании всех процентов стекловолокна (40%-75%) в сухом и увлажненном состоянии. Этот результат полезен при строительстве зданий на грунтах такого типа. Прогиб грунта в увлажненном состоянии увеличится больше, чем в сухом, но в целом армирование очень хорошо улучшает засоленные грунты, но сопряжено с высоким риском из-за присутствия (NACL) между частицами. Рекомендуется использовать 2% стекловолокна из-за положительного воздействия на грунт и низкой стоимости.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Б. Б. Бакенов, Н.В. Бойко, У.Р. Джумашев. Основания и фундаменты на засоленных грунтах. М.: Стройиздат, 1988.
- [2] Г.М. Айининуола, Л.О. Балогун. Исследование потенциала стекловолокна в стабилизации грунта. Int. J. Eng. Adv. Technol., том 7, 2018.
- [3] Kakharov Z. Mechanisms of the processes of shear, slice, general compression and expansion of mass // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 402. – С. 12007.
- [4] Kakharov Z., Yavkacheva Z. Determination of the bearing capacity of a building and structures of energy facilities // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 371.
- [5] Кахаров З. В., Эшонов Ф. Ф. Изменение состава веществ (материалов) в производстве // Научный журнал. – 2019. – №. 3 (37). – С. 22-23.
- [6] Кахаров З. В., Мирханова М. М. Переход жидких, пластичных, сыпучих тел в твердое состояние // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего. – 2019. – С. 164-166.
- [7] Кахаров З. В. Земляные работы при возведении земляного полотна железных дорог // Вопросы технических наук в свете современных исследований. – 2017. – С. 39-43.



[8] Кахаров З. В., Кодиров Н. Б. Методы укрепления оснований зданий и сооружения // Системная трансформация-основа устойчивого инновационного развития. – 2021. – С. 18-37.

[9] Кахаров З. В., Пурцеладзе И. Б. Сырьевые материалы, применяемые при производстве цемента // Вестник науки. – 2023. – №. 60. – С. 321-327.

[10] Кахаров З. В. и др. Устройство основания сооружений в слабых грунтах // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. – 2020. – С. 63-65.

[11] Кахаров З. В., Мирханова М. М. Методы искусственного закрепления грунта оснований зданий и сооружений // Вестник науки. – 2022. – Т. 4. – №. 11 (56). – С. 336-340.

[12] А.В. Новикова. Исследования засоленных и солонцовых почв: генезис, мелиорация, экология. Избранные труды. — Х.: КП «Друкарня 13», 2009. — 720 с.

В.П. Петрухин. Строительные свойства засоленных и заглипсованных грунтов Москва. Стройиздат. 1980. 120 с.

[13] С.К. Патель и Б. Сингх. Реакция прочности на сдвиг армированного стекловолокном песка с различной относительной плотностью уплотнения. Международный журнал

геотехники и инженерии, том 13, № 4, стр. 339-351, 2019.

[14] С.Б. Ухов и др., «Механика грунтов, основания и фундаменты» / Учебное пособие: - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS/ ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кахаров
Зайтжан
Васидович /
Kakharov
Zaitjan**

Ташкентский государственный транспортный университет
Доцент кафедры «Инженерия железных дорог»
E-mail: zumia525@mail.ru
Tel.: +998 99 855 32 34
<https://orcid.org/0000-0001-5965-3231>

**Пурцеладзе
Ирина
Борисовна /
Purtseladze
Irina**

Ташкентский государственный транспортный университет
Старший преподаватель кафедры
E-mail: ipurseladze022@gmail.com
Tel.: +998 93 534 94 21
<https://orcid.org/0000-0003-2229-3302>



Assessment of the Effect of Geomats on Reducing the Intensity of Deflation of Sandy Soils on Railway Embankment Slopes

K.S. Lesov¹^a, A.Sh. Uralov¹^b

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The article examines the effect of geomats on reducing the intensity of sandy soil deflation on railway subgrade slopes. The relevance of the study is обусловлено by the fact that in sandy and desert regions, wind erosion leads to the removal of soil particles, deformation of slope profiles, contamination of the ballast layer, and a decrease in the operational reliability of railway tracks. Geomats are considered as geosynthetic protective materials forming a spatial structure on the slope surface, which limits the movement of sand particles and reduces the impact of wind-sand flow. The theoretical basis of the study is the classical relationship proposed by R.A. Bagnold, describing wind-driven sand transport considering wind dynamic velocity and particle characteristics. It is shown that, for railway subgrade slopes, deflation assessment should take into account not only wind impact parameters, but also soil properties, moisture content, surface condition, and the presence of a protective cover. In this regard, the necessity of considering the coefficient C_g , characterizing the retaining capacity of geomats, is substantiated. The use of this coefficient provides a methodological basis for mathematical modeling of anti-deflation slope protection and for evaluating the effectiveness of geomat application in sandy soils.

Keywords: Geomat, deflation, sandy soil, railway subgrade slope, railway track, wind erosion, anti-deflation protection, coefficient C_g , wind-sand flow, geosynthetic materials

Оценка Влияния Геоматов на Снижение Интенсивности Дефляции Песчаных Грунтов на Откосах Железнодорожного Земляного Полотна

Лесов К.С.¹^a, Уралов А.Ш.¹^b

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В статье рассматривается влияние геоматов на снижение интенсивности дефляции песчаных грунтов на откосах железнодорожного земляного полотна. Актуальность исследования обусловлена тем, что в песчаных и пустынных районах ветровая эрозия приводит к выносу грунтовых частиц, нарушению профиля откосов, загрязнению балластного слоя и снижению эксплуатационной надёжности железнодорожного пути. Геоматы рассматриваются как геосинтетический защитный материал, формирующий на поверхности откоса пространственную структуру, которая ограничивает перемещение песчаных частиц и снижает воздействие ветропесчаного потока. Теоретической основой исследования служит классическая зависимость Р.А. Багнолда, описывающая ветровой перенос песка с учётом динамической скорости ветра и характеристик частиц. Показано, что применительно к откосам железнодорожного земляного полотна оценка дефляции должна учитывать не только параметры ветрового воздействия, но и свойства грунта, его влажность, состояние поверхности и наличие защитного покрытия. В связи с этим обоснована необходимость учёта коэффициента C_g , характеризующего удерживающую способность геомата. Использование данного коэффициента создаёт методическую основу для математического моделирования противодефляционной защиты откосов и оценки эффективности применения геоматов в песчаных грунтах.


Ключевые слова: Геомат, дефляция, песчаный грунт, откос земляного полотна, железнодорожный путь, ветровая эрозия, противодефляционная защита, коэффициент C_g , ветропесчаный поток, геосинтетические материалы

1. ВВЕДЕНИЕ

В песчаных и пустынных районах откосы железнодорожного земляного полотна подвергаются интенсивному воздействию

ветровой эрозии, дефляции и ветропесчаного потока. Вынос мелких грунтовых частиц с поверхности откосов приводит к нарушению их проектного профиля, ослаблению поверхностного

^a <https://orcid.org/0000-0002-9434-0713>

^b <https://orcid.org/0000-0002-6124-5250>



слоя, загрязнению балластной призмы и снижению эксплуатационной надёжности железнодорожного пути. В связи с этим разработка эффективных способов противодефляционной защиты откосов является актуальной инженерной и научной задачей [9–11].

Теоретические основы ветрового переноса песка заложены в классических исследованиях Р. А. Багнолда, где интенсивность переноса песчаных частиц связывается с динамической скоростью ветра, плотностью воздуха, ускорением свободного падения и размером частиц [12]. В дальнейшем данные представления получили развитие в моделях ветровой эрозии, где дополнительно учитываются свойства грунта, шероховатость поверхности, влажность, длина открытого участка и наличие защитного покрытия [13, 15]. Однако применение этих подходов к откосам железнодорожного земляного полотна требует уточнения, поскольку дефляция в данном случае развивается в условиях сложной геометрии откоса, взаимодействия с балластным слоем и эксплуатационного воздействия железнодорожной инфраструктуры [1–4].

Одним из перспективных решений данной задачи является применение геосинтетических материалов, в том числе геоматов. Геоматы формируют на поверхности откоса пространственную защитную структуру, которая снижает прямое воздействие ветропесчаного потока на грунт, ограничивает перемещение песчаных частиц и способствует сохранению устойчивости поверхностного слоя. Эффективность применения геосинтетических материалов при защите откосов и земляного полотна от эрозионных процессов подтверждается отечественными и зарубежными исследованиями [5–8, 14].

Вместе с тем для научного обоснования противодефляционной эффективности геоматов важно не только описать их защитное действие, но и выразить его количественно. В связи с этим в статье рассматривается необходимость учёта коэффициента C_g , характеризующего удерживающую способность геомата. Введение данного коэффициента позволяет адаптировать общие положения теории ветрового переноса песка к условиям железнодорожного земляного полотна и использовать их при дальнейшем математическом моделировании противодефляционной защиты откосов.

Актуальность исследования определяется необходимостью повышения устойчивости откосов железнодорожного земляного полотна в песчаных районах за счёт применения геоматов и разработки методического подхода к оценке их влияния на снижение интенсивности дефляции.

Предмет исследования – влияние геоматов на интенсивность дефляции песчаных грунтов на откосах железнодорожного земляного полотна.

Цель исследования – оценить влияние геоматов на снижение интенсивности дефляции песчаных грунтов на откосах железнодорожного земляного полотна и обосновать использование коэффициента C_g , характеризующего удерживающую способность геомата.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать теоретические основы ветрового переноса песчаных частиц и факторы, определяющие развитие дефляции на откосах железнодорожного земляного полотна.
2. Обосновать роль геоматов как геосинтетического защитного материала, снижающего интенсивность перемещения песчаных частиц под воздействием ветра.
3. Сформировать методический подход к учёту коэффициента C_g при оценке противодефляционной эффективности геоматов и последующем математическом моделировании защиты откосов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются откосы железнодорожного земляного полотна, сложенные песчаными грунтами и эксплуатируемые в условиях воздействия ветровой эрозии, дефляции и ветропесчаного потока. В таких условиях поверхностный слой откоса подвергается выносу мелких частиц, что приводит к ослаблению грунта, нарушению проектного профиля, накоплению песчаного материала в зоне балластной призмы и снижению эксплуатационной надёжности железнодорожного пути [9–11].

В качестве защитного материала рассматривается геомат – пространственный геосинтетический материал, формирующий на поверхности откоса армирующе-защитный слой. Его применение позволяет снизить прямое воздействие ветропесчаного потока на грунт, ограничить перемещение песчаных частиц и повысить устойчивость поверхностного слоя откоса. Эффективность геосинтетических материалов при укреплении откосов и защите земляного полотна от эрозионных процессов подтверждена рядом исследований [5–8, 14].

Для обоснования применимости геоматов в песчаных грунтах систематизированы их основные преимущества и ограничения. Это позволяет определить не только противодефляционный эффект геомата, но и условия, при которых его применение требует дополнительного инженерного обоснования (табл. 1).



Таблица 1

Преимущества и ограничения применения геоматов в песчаных грунтах

Показатель	Преимущества	Ограничения
Конструктивные свойства	Лёгкость, гибкость, пространственная структура, возможность плотного прилегания к поверхности откоса	Требуется качественная укладка и надёжное закрепление на откосе
Противодефляционное действие	Ограничение перемещения песчаных частиц, снижение воздействия ветропесчаного потока	Эффективность зависит от скорости ветра, гранулометрического состава грунта и состояния поверхности
Противоэрозийное действие	Снижение размыва поверхности откоса и уменьшение выноса грунтовых частиц	При интенсивном поверхностном стоке требуется сочетание с водоотводными мероприятиями
Влияние на устойчивость откоса	Повышение устойчивости поверхностного слоя и сохранение проектного профиля откоса	Не заменяет конструктивное укрепление при глубинных деформациях откоса
Эксплуатационная применимость	Возможность применения на песчаных и слабосвязанных грунтах, в том числе в аридных районах	Требуется учёт природно-климатических условий и режима эксплуатации участка
Методическая значимость	Позволяет оценивать снижение дефляции через сравнение защищённой и незащищённой поверхности	Для количественного расчёта необходимо введение дополнительных параметров, включая коэффициент C_g

Как видно из табл. 1, геомат обладает рядом преимуществ при защите песчаных откосов от дефляции. Вместе с тем его эффективность зависит от условий работы защитного слоя. Поэтому в настоящем исследовании геомат рассматривается не только как конструктивный материал, но и как фактор, влияющий на интенсивность выноса песчаных частиц. Это

требует перехода от качественного описания защитного действия геомата к его количественной оценке.

Механизм влияния геомата на снижение дефляции песчаных грунтов на откосе железнодорожного земляного полотна представлен на рис. 1.



Рис. 1 – Схема влияния геомата на снижение дефляции песчаных грунтов на откосе железнодорожного земляного полотна



Как видно из рис. 1, применение геомата изменяет характер взаимодействия ветропесчаного потока с поверхностью откоса. Пространственная структура материала удерживает песчаные частицы, снижает интенсивность дефляции и повышает устойчивость поверхностного слоя. Данное защитное действие в статье предлагается учитывать через коэффициент C_g .

Теоретической основой исследования являются положения о ветровом переносе песка, заложенные в работах Р. А. Багнолда. В классическом подходе интенсивность переноса песчаных частиц связывается с динамической скоростью ветра, плотностью воздуха, ускорением свободного падения и размером частиц [12]. Дальнейшее развитие эти представления получили в моделях ветровой эрозии WEQ и RWEQ, где дополнительно учитываются свойства грунта, шероховатость поверхности, влажность, длина открытого участка и наличие защитного покрытия [13, 15]. Это позволяет рассматривать дефляцию как процесс, зависящий не только от параметров ветрового воздействия, но и от физико-механических характеристик грунта, состояния поверхности и наличия защитного слоя.

Методический подход основан на сравнении двух состояний откоса: незащищённой поверхности и поверхности, защищённой геоматом. Такое сопоставление позволяет определить степень снижения интенсивности выноса песчаных частиц при применении геомата. В качестве основного показателя используется интенсивность выноса грунта с единицы площади откоса за определённый промежуток времени:

$$I_e = \frac{\Delta m}{Ft} \quad (1)$$

где I_e – интенсивность выноса грунтовых частиц, кг/(м²·ч);

Δm – масса вынесенного грунта, кг;

F – площадь исследуемой поверхности откоса, м²;

t – продолжительность воздействия, ч.

Для количественной оценки защитного эффекта геомата интенсивность выноса частиц с незащищённой поверхности сопоставляется с интенсивностью выноса с поверхности, укреплённой геоматом. Эффективность снижения дефляции определяется по выражению:

$$\eta_e = \frac{I_{e0} - I_{eg}}{I_{e0}} * 100\% \quad (2)$$

где η_e – эффективность снижения дефляции, %;

I_{e0} – интенсивность выноса грунтовых частиц с незащищённого откоса, кг/(м²·ч);

I_{eg} – интенсивность выноса грунтовых частиц с откоса, защищённого геоматом, кг/(м²·ч).

Данный показатель отражает относительное уменьшение потерь грунта при использовании геомата и позволяет перейти от качественного описания его защитного действия к количественной оценке. При этом геомат рассматривается не только как физическое покрытие, но и как фактор, изменяющий условия взаимодействия ветропесчаного потока с поверхностью откоса.

С учётом теории ветрового переноса песка, положений моделей WEQ/RWEQ и инженерных особенностей железнодорожного земляного полотна процесс перемещения песчаных частиц на откосах предлагается представить в виде обобщённой функциональной зависимости:

$$Q_s = f(v, d, \rho, W, C_g) \quad (3)$$

где Q_s – поток песчаных частиц, переносимых ветром; v – скорость ветра, м/с;

d – средний диаметр частиц грунта, мм;

ρ – плотность грунта, кг/м³;

W – влажность грунта, %;

C_g – коэффициент, характеризующий удерживающую способность геомата.

В данной зависимости параметры v и d отражают факторы, усиливающие дефляцию, поскольку скорость ветра и гранулометрический состав непосредственно влияют на подвижность песчаных частиц. Параметры ρ и W характеризуют физическое состояние грунта и его сопротивляемость выносу. Коэффициент C_g вводится для учёта защитного действия геомата и отражает его способность удерживать песчаные частицы на поверхности откоса.

Предложенный методический подход позволяет оценить влияние геоматов на снижение интенсивности дефляции путём сравнения защищённой и незащищённой поверхностей. Введение коэффициента C_g создаёт основу для дальнейшего математического моделирования противодефляционной защиты откосов железнодорожного земляного полотна.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты теоретико-методического анализа показывают, что применение геоматов на откосах железнодорожного земляного полотна снижает интенсивность дефляции песчаных грунтов за счёт изменения условий взаимодействия ветропесчаного потока с поверхностью. На незащищённом откосе воздушный поток непосредственно воздействует на грунтовые частицы, вызывает их отрыв, перемещение и вынос. Это приводит к ослаблению поверхностного слоя, нарушению проектного профиля и накоплению песчаного материала в зоне балластной призмы.



При устройстве геомата формируется пространственная армирующе-защитная структура, частично воспринимающая воздействие ветропесчаного потока. Она снижает подвижность песчаных частиц, ограничивает их вынос и повышает устойчивость поверхностного слоя. Защитный эффект проявляется в механическом удержании частиц, уменьшении прямого аэродинамического воздействия на грунт и сохранении проектных очертаний откоса.

Сопоставление незащищённой и защищённой поверхностей позволяет количественно оценить противодефляционный эффект. Основным критерием является уменьшение интенсивности выноса грунтовых частиц после устройства защитного слоя. Чем больше разница между показателями для двух состояний откоса, тем выше эффективность геомата. Следовательно, снижение интенсивности выноса на защищённом участке служит количественным признаком ограничения перемещения песчаных частиц и ослабления дефляционного процесса.

Особое значение имеет коэффициент C_g , характеризующий удерживающую способность геомата. Его учёт позволяет отразить влияние защитного слоя на ветровой перенос песчаных частиц и рассматривать геомат не только как конструктивное покрытие, но и как фактор, изменяющий условия развития дефляции. В обобщённой функциональной зависимости скорость ветра, размер частиц, плотность и влажность грунта отражают основные условия формирования дефляционного процесса, а коэффициент C_g показывает влияние защитного слоя на снижение подвижности частиц.

Физический смысл коэффициента C_g состоит в учёте дополнительного сопротивления выносу частиц, создаваемого пространственной структурой геомата. Его применение позволяет количественно оценить защитное действие материала и использовать этот показатель при моделировании противодефляционной защиты откосов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что геоматы могут эффективно применяться для противодефляционной защиты откосов железнодорожного земляного полотна, сложенных песчаными грунтами. Формируя пространственный армирующе-защитный слой, геомат снижает воздействие ветропесчаного потока на поверхность откоса, ограничивает подвижность частиц и способствует сохранению проектного профиля.

Противодефляционный эффект геомата целесообразно оценивать путём сопоставления интенсивности выноса грунтовых частиц с

незащищённой и защищённой поверхностей. Такой подход позволяет количественно определить снижение дефляции и перейти от описательной характеристики защитного действия к его расчётной оценке.

Обоснована необходимость введения коэффициента C_g , характеризующего удерживающую способность геомата. Его учёт в обобщённой функциональной зависимости позволяет отразить влияние защитного слоя на процесс ветрового переноса песчаных частиц с учётом скорости ветра, гранулометрического состава, плотности и влажности грунта.

Предложенный подход создаёт методическую основу для математического моделирования противодефляционной защиты откосов железнодорожного земляного полотна. Коэффициент C_g позволяет рассматривать геомат не только как конструктивный материал, но и как расчётный параметр, отражающий его вклад в снижение интенсивности дефляции песчаных грунтов.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Демьяненко А. Ф. О критической скорости ветра при развевании песка // Научные решения актуальных задач транспорта. – Вып. 874. – Москва : МИИТ, 1993. – С. 12–20.
- [2] Закиров Р. С., Омаров А. Д. Организация сооружения земляного полотна при строительстве дорог в аридных регионах. – Алматы, 2001. – 156 с.
- [3] Закиров Р. С., Омаров А. Д. Противодеформационное укрепление земляного полотна из песчаного грунта в Казахстане. – Алматы : Ғылым, 1999. – 164 с.
- [4] Каменев А. М., Селиверстов А. Г. Исследование эффективности применения синтетических материалов для защиты откосов песчаных насыпей от водной и ветровой эрозии в условиях Казахстана // Синтетические текстильные материалы в конструкциях автомобильных дорог : сб. науч. тр. Союздорнии. – Москва, 1983. – С. 89–99.
- [5] Лесов К. С. Технология усиления насыпи земляного полотна железных дорог из песчаных грунтов с применением геосинтетических материалов // Вестник ТашИИТа. – 2019. – № 2. – С. 11–16.
- [6] Лесов К. С., Мехмонов М. Х., Кенжалиев М. К., Уралов А. Ш. Экспериментальные исследования по защите откосов земляного полотна от эрозии: использование геосинтетических материалов // Транспортное строительство. – 2025. – № 2. – С. 10–12.
- [7] Лесов К. С., Уралов А. Ш., Юлдашалиев Ж. Б. Экспериментальные исследования по защите



откосов земляного полотна от процесса эрозии с применением геосинтетических материалов // Journal of Transport. – 2025. – Vol. 2, Issue 2. – С. 5–8. DOI: 10.56143/2181-2438-2025-2-5-8.

[8] Лесов К. С., Уралов А. Ш., Яхьяева М. Т. Конструктивно-технологические решения на основе климатического районирования железнодорожной линии Бухара–Мискин // Journal of Transport. – 2025. – Vol. 2, Issue 2. – С. 159–163.

[9] Мирахмедов М. М. Песчаные заносы: опыт борьбы и современные варианты технологий // Железнодорожный транспорт. – 2001. – № 8. – С. 66–68.

[10] Мирахмедов М. М. Основы методологии организации пескозакрепительных работ и защита природно-технических объектов от песчаных заносов. – Ташкент : Фан ва технологиялар, 2008. – 248 с.

[11] Мирахмедов М. М. Ресурсосберегающие организационно-технологические решения борьбы с проявлениями экзогенных процессов на железных дорогах. – Ташкент : Та’лим, 2016. – 424 с.

[12] Bagnold R. A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. – London : Methuen, 1941. – 265 p.

[13] Kok J. F., Parteli E. J. R., Michaels T. I., Karam D. B. The physics of wind-blown sand and dust // *Reports on Progress in Physics*. – 2012. – Vol. 75. – 106901.

[14] Lesov K., Sarsenbayev B., Kenjaliyev M., Begmatov N., Uralov A. Engineering protection of the subgrade from sand drifts using geomaterials, as exemplified by the Bukhara–Miskin railway line // *Vibroengineering Procedia*. – 2025. – Vol. 60. – P. 522–526. DOI: 10.21595/vp.2025.25323.

[15] Woodruff N. P., Siddoway F. H. A Wind Erosion Equation // *Soil Science Society of America Proceedings*. – 1965. – Vol. 29, No. 5. – P. 602–608.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS/ ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесов Кувандик Сагинович Кандидат технических наук, профессор кафедры «Инженерия железных дорог», Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).
E-mail: kuvandik@mail.ru
Tel.: +998998761963
<https://orcid.org/0000-0002-9434-0713>

Уралов Акмал Шакар угли Базовый докторант кафедры «Инженерия железных дорог», Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ).
E-mail: akmaljonoralov1928@gmail.com
Tel.: +998998174312
<https://orcid.org/0000-0002-6124-5250>



A Technical and Engineering Analysis of the Parameters for Protective Forest Plantations Along Railways in Areas with Shifting Sands

K.S. Lesov^a, M.K. Kenjaliev^b, A.Kh. Mavlanov^c

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The article presents a computational and technological substantiation of the parameters of protective forest plantations along railways under conditions of mobile sands. It is established that the stability of railway infrastructure in arid regions is determined by the intensity of deflation processes, wind regime characteristics, and the condition of the railway right-of-way. Based on the analysis of natural and climatic factors, sand transport calculations, and assessment of the aerodynamic effect of protective forest belts, rational parameters for their placement and structural design are determined. It is shown that protective plantations with a height of 4–5 m form an aerodynamic influence zone extending over 60–100 m, while a 30–40% reduction in wind speed can reduce the volume of sand transport by approximately 75–80%. The results confirm the effectiveness of using protective forest plantations in combination with engineering measures to reduce deflation load and improve the stability of railway ecotechnical systems.

Key words: Protective forest plantations, protective forest belts, railways, mobile sands, sand transport, deflation, railway right-of-way, aerodynamic effect, arid conditions, stability of ecotechnical systems

Расчётно-Технологическое Обоснование Параметров Защитных Лесных Насаждений Вдоль Железных Дорог В Условиях Подвижных Песков

К.С. Лесов^a, М.К. Кенжалиев^b, А.Х. Мавланов^c

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: Статья посвящена расчётно-технологическому обоснованию параметров защитных лесных насаждений вдоль железных дорог в условиях подвижных песков. Установлено, что устойчивость железнодорожной инфраструктуры в аридных районах определяется интенсивностью дефляционных процессов, параметрами ветрового режима и состоянием полосы отвода. На основе анализа природно-климатических факторов, расчёта пескопереноса и оценки аэродинамического эффекта защитных лесных полос определены рациональные параметры их размещения и конструкции. Показано, что при высоте защитных насаждений 4–5 м формируется зона аэродинамического влияния протяжённостью 60–100 м, а снижение скорости ветра на 30–40 % обеспечивает сокращение объёма пескопереноса примерно на 75–80 %. Полученные результаты подтверждают эффективность применения защитных лесных насаждений в сочетании с инженерными мероприятиями для снижения дефляционной нагрузки и повышения устойчивости экотехнических систем железных дорог.

Ключевые слова: Защитные лесные насаждения, защитные лесные полосы, железные дороги, подвижные пески, пескоперенос, дефляция, полоса отвода, аэродинамический эффект, аридные условия, устойчивость экотехнических систем

1. ВВЕДЕНИЕ

Подвижные пески являются одним из наиболее опасных природных факторов, осложняющих эксплуатацию железных дорог в аридных и полуаридных районах. Ветровая эрозия, дефляция и миграция песчаных масс вызывают заносимость пути, ухудшение состояния земляного полотна, нарушение работы объектов полосы отвода и увеличение эксплуатационных затрат. Для пустынных территорий, включая район Кызылкума, вовлечение песчаных частиц в движение начинается уже при скорости ветра 4–6 м/с, а при скоростях 10–15 м/с процессы

пескопереноса приобретают интенсивный характер [1, 2].

В мировой научной литературе проблема эоловых процессов и защиты инфраструктуры от песчаных заносов рассматривается достаточно широко. Современные исследования подтверждают, что интенсивность пескопереноса определяется сочетанием ветрового режима, свойств песчаных грунтов, рельефа и состояния растительного покрова [11–14]. В прикладных работах показано, что наибольший эффект достигается при сочетании инженерных и биологических решений, включая применение

^a <https://orcid.org/0000-0002-9434-0713>

^b <https://orcid.org/0000-0003-4622-5937>



защитных лесных полос как долговременного средства снижения скорости ветра и уменьшения объёма переносимого песка [3, 11, 14]. По опубликованным данным, защитные лесные полосы способны снижать скорость ветра на 30–60 % и существенно уменьшать интенсивность ветровой эрозии [3, 11, 13].

Для условий Узбекистана вопросы защиты железных дорог от подвижных песков и ветровой эрозии нашли отражение в работах [2, 4–9], посвящённых изучению эоловых процессов, инженерной защите полосы отвода и совершенствованию конструктивно-технологических решений на железных дорогах пустынных районов. Вместе с тем недостаточно полно раскрыты вопросы расчётно-технологического обоснования параметров защитных лесных насаждений именно вдоль железных дорог, где эффективность защиты определяется не только видом насаждений, но и их высотой, шириной, конструкцией, просветностью и размещением относительно оси пути [2, 3, 6, 8, 14]. Для неблагоприятных участков железнодорожных линий расчётный объём пескопереноса при отсутствии защитных мероприятий может достигать 55–60 м³/км·год [2, 6, 8].

Актуальность исследования определяется необходимостью повышения устойчивости железнодорожной инфраструктуры в зонах распространения подвижных песков и разработки научно обоснованных параметров защитных лесных насаждений, обеспечивающих снижение дефляционной нагрузки на полосу отвода и железнодорожный путь [2, 3, 8].

Предмет исследования – расчётные и технологические основы обоснования параметров защитных лесных насаждений, влияющих на снижение пескопереноса и повышение устойчивости железнодорожной инфраструктуры в условиях подвижных песков.

Цель исследования – выполнить расчётно-технологическое обоснование параметров защитных лесных насаждений вдоль железных дорог в условиях подвижных песков.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: проанализировать природно-климатические и ветровые факторы, определяющие интенсивность пескопереноса и заносимость железнодорожного пути; выполнить расчётное обоснование параметров защитных лесных насаждений с учётом интенсивности дефляционных процессов, аэродинамического эффекта и требуемой ширины защитной зоны; определить рациональные конструктивные и пространственные параметры защитных лесных насаждений, обеспечивающие снижение дефляционной нагрузки и повышение

устойчивости железнодорожной экотехнической системы.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено на основе комплексного расчётно-аналитического и инженерно-технологического подхода, в рамках которого защитные лесные насаждения вдоль железных дорог рассматривались как элемент экотехнической системы «железная дорога – полоса отвода – подвижные пески – защитные насаждения» [2, 3, 6, 11–14].

Методика исследования защитных лесных насаждений включала шесть последовательно реализуемых этапов, что отражено на рисунке 1.

На рисунке 1 представлена последовательность выполнения исследования – от анализа природных условий до оценки эффективности защитных лесных насаждений.

На первом этапе анализировались природно-климатические условия района исследования, ветровой режим и интенсивность пескопереноса на открытых барханных участках железнодорожной линии Бухара–Мискин–Ургенч–Хива. В качестве исходных ориентиров принимались: требуемое снижение скорости ветра в приземном слое на 30–60 %, потенциальный объём пескопереноса без защитных мероприятий до 55–60 м³/км·год, допустимый эксплуатационный уровень заносимости порядка 20 м³/км·год и средняя проектная высота защитных насаждений 4–5 м [2, 6, 8].

На втором этапе выполнялось исследование характеристик песчаных грунтов, оказывающих влияние на развитие дефляционных процессов и устойчивость защитных мероприятий. При этом учитывались гранулометрический состав, степень подвижности песков, особенности поверхностного слоя и условия закрепления песчаной поверхности.

На третьем этапе изучались параметры защитных лесных насаждений, включая их высоту, конструкцию, просветность, породный состав и особенности размещения в полосе отвода. Для аэродинамического описания изменения скорости ветра за защитной полосой использовалась зависимость:

$$U_x = U_0(1 - e^{-x/H}),$$

где U_0 – исходная скорость ветра; U_x – скорость ветра на расстоянии x от защитной полосы; H – высота насаждений; x – расстояние от полосы по направлению воздушного потока; α – коэффициент аэродинамической эффективности, зависящий от плотности, рядности и просветности насаждений.

В расчётной интерпретации выделялись зона максимального торможения – до 5–7H и зона устойчивого аэродинамического влияния – до 15–



20Н. При высоте насаждений 4–5 м это соответствует защитной зоне порядка 60–100 м. Расчётная зависимость длины защитной зоны от высоты насаждений приведена в таблице 1.

Из данных таблицы 1 следует, что при высоте защитных насаждений 4–5 м формируется зона защитного влияния протяжённостью 60–100 м.

На четвёртом этапе выполнялось измерение скорости ветра и интенсивности пескопереноса, что позволило оценить фактическое изменение параметров воздушного потока и дефляционной нагрузки в зоне действия защитных мероприятий.

На пятом этапе осуществлялась обработка экспериментальных данных, включавшая их систематизацию, сопоставление с расчётными

параметрами и обобщение результатов по отдельным элементам защитной системы.

Таблица 1

Зависимость длины защитной зоны от высоты защитных насаждений

Высота защитных насаждений, м	Зона максимального торможения, м (5–7Н)	Зона устойчивого аэродинамического влияния, м (15–20Н)	Общая защитная зона, м
3	15–21	45–60	45–60
4	20–28	60–80	60–80
5	25–35	75–100	75–100
6	30–42	90–120	90–120

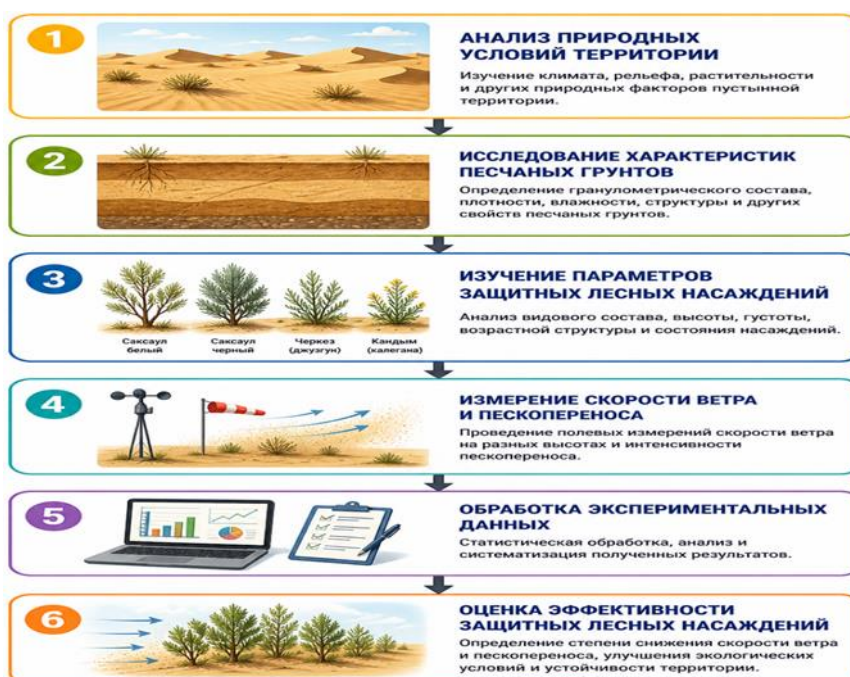


Рис.1. Схема методики исследования защитных лесных насаждений

На шестом этапе проводилась оценка эффективности защитных лесных насаждений и сопутствующих инженерных мероприятий. На этой основе обосновывалась многоступенчатая схема размещения защитных мероприятий: ажурная ветроослабляющая полоса – на расстоянии 50–100 м от оси пути; плотная

пескозащитная полоса – на расстоянии 15–40 м; клеточные механические защиты – в пределах 10–20 м; локальные почвоукрепительные насаждения – на участках вторичной дефляции и откосах [2, 6, 8]. Схема размещения защитных насаждений и зон их аэродинамического влияния приведена на рисунке 2, а пространственное размещение элементов защитной системы – в таблице 2.

Таблица 2

Пространственное размещение элементов защитной системы в полосе отвода

Элемент защитной системы	Расстояние от оси пути, м	Основное назначение
Ажурная ветроослабляющая полоса	50–100	Предварительное снижение скорости ветра и уменьшение турбулентности
Плотная пескозащитная полоса	15–40	Основной барьер осаждения и аккумуляции песка
Клеточные механические защиты	10–20	Временная стабилизация песчаной поверхности



Элемент защитной системы	Расстояние от оси пути, м	Основное назначение
Почвоукрепительные насаждения	Локально	Закрепление откосов и участков вторичной дефляции

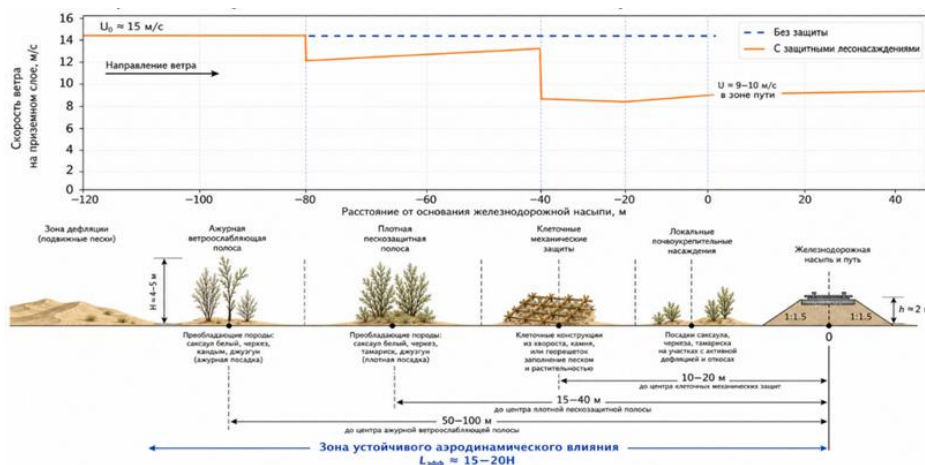


Рис.2. Схема размещения защитных лесных насаждений и зон их аэродинамического влияния вдоль железной дороги

На рисунке 2 показана многоступенчатая схема размещения защитных мероприятий и соответствующие зоны аэродинамического воздействия по отношению к железнодорожной насыпи.

Таблица 2 отражает поэтапное размещение защитных мероприятий по мере приближения к железнодорожному пути.

Дополнительно для участков различной степени дефляционной опасности определялись конструктивные параметры полос. Для расчётов использовались следующие интервалы: просветность – 15–35 %; число рядов – 5–8 для участков высокой заносимости, 3–5 – для средней и 2–3 – для локальной дефляции; шаг посадки в ряду – 1,0–2,0 м; междурядья – 2–5 м. Конструктивные параметры защитных лесных насаждений по категориям дефляционной опасности приведены в таблице 3.

Таблица 3

Конструктивные параметры защитных лесных насаждений по категориям дефляционной опасности

Категория участка	Просветность, %	Число рядов	Шаг посадки в ряду, м	Между рядья, м	Конструктивная особенность
Высокая заносимость	15–25	5–8	1,0–1,5	3–5	Плотная многоярусная полоса
Средняя	20–35	3–5	1,5–2,0	2–4	Ажурная ветроослабляющая

Категория участка	Просветность, %	Число рядов	Шаг посадки в ряду, м	Между рядья, м	Конструктивная особенность
заносимость					яющая полоса
Локальная дефляция	20–30	2–3	1,0–1,5	2–3	Почвоукрепительные насаждения

Таблица 3 показывает дифференцированный выбор конструкции защитных насаждений в зависимости от степени дефляционной опасности участка.

Таким образом, методика исследования включала шесть взаимосвязанных этапов: анализ природных условий территории, исследование характеристик песчаных грунтов, изучение параметров защитных лесных насаждений, измерение скорости ветра и пескопереноса, обработку экспериментальных данных и оценку эффективности защитных лесных насаждений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполненного расчётно-технологического анализа установлено, что для открытых барханных участков железнодорожной линии Бухара–Мискин–Ургенч–Хива требуется снижение скорости ветра в приземном слое должно составлять 30–60 %. Именно такой диапазон позволяет перевести процесс переноса песка из режима интенсивной сальтации в состояние, при котором объём заносов не



превышает допустимых эксплуатационных значений для железнодорожного пути [2, 6].

Расчётное аэродинамическое моделирование показало, что при высоте защитных насаждений 4–5 м формируются две характерные зоны воздействия: зона максимального торможения на расстоянии 5–7Н и зона устойчивого влияния на расстоянии 15–20Н. В инженерной интерпретации это соответствует активной защитной зоне порядка 60–100 м [3, 6].

Для расчётного штормового эпизода при скорости ветра $U_{10} = 15$ м/с установлено, что снижение скорости потока на 40 % уменьшает её значение в защищённой зоне до 9 м/с. Уменьшение скорости до $0,6U_0$ приводит к сокращению объёма переноса примерно до 0,216 от исходного значения, то есть обеспечивает снижение пескопереноса примерно на 75–80 %. При исходной расчётной дефляционной нагрузке 55–60 м³/км·год это даёт уменьшение объёма заносов до 13–15 м³/км·год, что соответствует эксплуатационно допустимому уровню около 20 м³/км·год [2, 6, 8].

Показано, что наибольшую эффективность обеспечивает многоступенчатая система защиты, включающая ажурную ветроослабляющую полосу, плотную пескозащитную полосу, клеточные механические защиты и локальные почвоукрепительные насаждения. Основные параметры размещения элементов защитной системы вдоль железной дороги, их функциональное назначение и ожидаемый инженерный эффект приведены в таблице 4.

Таблица 4
Основные параметры размещения элементов защитной системы вдоль железной дороги и их функциональное назначение

Элемент защитной системы	Основные параметры размещения	Функциональное назначение	Ожидаемый инженерный эффект
Ажурная ветроослабляющая полоса	Расстояние до полосы 50–100 м; $N = 4-5$ м; ажурная конструкция	Снижение скорости ветра, уменьшение турбулентности	Ослабление дефляционного потока на подступах
Плотная пескозащитная полоса	Расстояние до полосы 15–40 м; $N = 4-5$ м; плотная	Перехват и аккумуляция песка	Основное снижение пескопереноса

	конструкция		
Клеточные механические защиты	Расстояние до защит 10–20 м	Стабилизация поверхности	Подавление локальной подвижности песка
Почвоукрепительные насаждения	Локально (откосы, дефляционные зоны)	Закрепление грунта	Повышение устойчивости откосов
Защитная система в целом	4–6 рядов; 8–12 м между полосами; зона 60–100 м; $\Delta U = 35-60$ %	Комплексная защита пути	Снижение заносов и дефляционной нагрузки

Таблица 4 объединяет расчётные параметры размещения элементов защитной системы, их функцию и ожидаемый инженерный результат.

При оценке конструктивных параметров установлено, что для участков высокой заносимости наиболее рациональны многорядные многоярусные полосы с просветностью 15–25 %, числом рядов 5–8, шагом посадки 1,0–1,5 м и междурядьями 3–5 м. Для участков средней заносимости целесообразны ажурные полосы с просветностью 20–35 % и числом рядов 3–5. Для зон локальной дефляции рациональны почвоукрепительные насаждения с просветностью 20–30 % и числом рядов 2–3 [3, 6, 14].

Полученные результаты согласуются с данными других авторов и подтверждают высокую эффективность защитных лесных полос в снижении скорости ветра и интенсивности ветровой эрозии [3, 11, 13, 14].

Результаты показывают, что защита железных дорог в условиях подвижных песков должна рассматриваться как единая расчётно организованная система регулирования дефляционных процессов в полосе отвода. Такой подход особенно важен для аридных территорий, где ветровой режим, слабая закреплённость песчаной поверхности и высокая подвижность песчаных частиц формируют устойчивую дефляционную нагрузку на железнодорожную инфраструктуру [1, 2, 7, 8].

Ключевым условием эффективности защитных лесных насаждений является обоснованный выбор их параметров – высоты, ширины, просветности, рядности и пространственного размещения относительно оси пути. Именно сочетание этих характеристик определяет аэродинамическое воздействие полосы на ветропесчаный поток и её



реальную защитную способность. В этом состоит отличие настоящего исследования от работ, в которых защитные лесные полосы рассматриваются преимущественно как общее средство снижения скорости ветра без детальной увязки с расчётной интенсивностью пескопереноса и условиями функционирования железнодорожной полосы отвода [3, 11, 13, 14].

С теоретической точки зрения результаты подтверждают нелинейный характер эолового транспорта песка. Расчёты показали, что даже сравнительно умеренное снижение скорости ветра на 30–40 % обеспечивает сокращение дефляционной нагрузки примерно на 75–80 %, что позволяет перевести участок из состояния высокой заносимости в эксплуатационно допустимое состояние [2, 6, 8, 11–14].

Сопоставление с данными других авторов показывает содержательную согласованность полученных результатов. В отечественных и зарубежных исследованиях указывается, что защитные лесные полосы способны снижать скорость ветра на 30–60 %, а интенсивность ветровой эрозии – в несколько раз [3, 11, 13, 14]. Вместе с тем предложенный подход отличается большей инженерной конкретизацией применительно к железнодорожной инфраструктуре, поскольку учитывает не только общий ветроослабляющий эффект, но и параметры размещения элементов защитной системы, их функциональное назначение и ожидаемый инженерный эффект, представленные в таблице 4.

Принципиально важным является и то, что защитные лесные насаждения рассматриваются в сочетании с инженерными средствами защиты. Такой подход соответствует как региональному опыту, так и современным зарубежным исследованиям, в которых подчёркивается, что наибольшая эффективность достигается при комбинированном применении биологических и инженерных решений [4, 5, 11–14]. Для железных дорог это особенно существенно, поскольку на начальном этапе формирования насаждений требуется дополнительная стабилизация песчаной поверхности, а в наиболее чувствительной зоне полосы отвода целесообразно использовать механические или геосинтетические элементы.

С практической точки зрения предложенное расчётно-технологическое обоснование имеет прикладное значение для железных дорог, проходящих по территориям с активными эоловыми процессами, прежде всего в условиях Узбекистана. Обоснованные параметры размещения защитных мероприятий позволяют перейти от общих рекомендаций к проектно ориентированным решениям, учитывающим реальный уровень дефляционной опасности участка. Вместе с тем результаты имеют

преимущественно расчётно-аналитический характер и требуют дальнейшей натурной проверки на конкретных участках железных дорог.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье выполнено расчётно-технологическое обоснование параметров защитных лесных насаждений вдоль железных дорог в условиях подвижных песков. Установлено, что эффективность такой защиты определяется не только наличием лесонасаждений, но прежде всего их обоснованными аэродинамическими, конструктивными и пространственными параметрами.

Показано, что при высоте защитных насаждений 4–5 м формируется зона аэродинамического влияния протяжённостью 60–100 м, а снижение скорости ветра на 30–40 % обеспечивает уменьшение объёма пескопереноса примерно на 75–80 %. Обосновано, что наибольшую результативность обеспечивает многоступенчатая система защиты, включающая ажурную ветроослабляющую полосу, плотную пескозащитную полосу, клеточные механические защиты и локальные почвоукрепительные насаждения.

Полученные результаты согласуются с современными представлениями о ветроослабляющем и пескозадерживающем действии защитных лесных полос, но отличаются большей инженерной конкретизацией применительно к железнодорожной инфраструктуре. Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенных положений при проектировании и совершенствовании систем защиты железных дорог на участках, подверженных воздействию подвижных песков.

Таким образом, защитные лесные насаждения следует рассматривать как базовый долговременный элемент защиты железных дорог от песчаных заносов, а их расчётно-технологическое обоснование – как необходимое условие повышения устойчивости железнодорожной инфраструктуры в условиях активных эоловых процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- [1] Закиров, Р.С. Железные дороги в песчаных пустынях / Р.С. Закиров. – Москва: Транспорт, 1980. – 221 с.
- [2] Закиров, Р.С. Теория и практика защиты железных дорог от песчаных заносов / Р.С. Закиров. – Ташкент : Фан, 1987. – 128 с.



[3] Кириллов, С. Н. Применение защитных лесных насаждений вдоль железных дорог для повышения устойчивости экотехнических систем /С.Н. Кириллов, А.А. Матвеева //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 5-2. – С. 188–190.

[4] Лесов, К.С. Применение геосинтетических материалов для укрепления земляного полотна железных дорог / К.С. Лесов, А.Х. Мавланов, Ш.А. Таджибаев. – Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2021. – 128 с.

[5] Лесов, К.С. Технология укрепления откосов земляного полотна железных дорог из песчаных грунтов с применением геосинтетических материалов /К.С. Лесов, Ш.А. Таджибаев, М.К. Кенжалиев //Проблемы архитектуры и строительства. – 2019. – № 3. – С. 52–56.

[6] Лесов, К.С. Конструктивно-технологические решения на основе климатического районирования железнодорожной линии Бухара–Мискин /К.С. Лесов, А.Ш. Уралов, М.Т. Яхьяева // Journal of Transport. – 2025. – Т. 2, № 2. – С. 159–163.

[7] Мирахмедов, М. Основы методологии организации пескозакрепительных работ и защита природно-технических объектов от песчаных заносов / М. Мирахмедов. – Ташкент: Фан ва технологиялар, 2008. – 248 с.

[8] Мирахмедов, М. М. Ресурсосберегающие организационно-технологические решения борьбы с проявлениями экзогенных процессов на железных дорогах / М.М. Мирахмедов. – Ташкент : ТА’ЛИМ, 2016. – 424 с.

[9] Мирахмедов, М.М. Комплексная система подготовки производства пескозакрепительных работ и её результативность /М.М. Мирахмедов //Проблемы механики. – 2002. – № 2. – С. 12–16.

[10] Шахунянц, Г.М. Железнодорожный путь /Г.М. Шахунянц. – Москва: Транспорт, 1987. – 479 с.

[11] Bruno, L. Windblown sand along railway infrastructures: A review of challenges and mitigation measures / L. Bruno, M. Horvat, L. Raffaele // Journal of Arid Environments. – 2018. – Vol. 152. – P. 1–23.

[12] Fathali, M. Aeolian sand challenges in desert rail infrastructures: overview of Iran’s experience and advancement / M. Fathali, M. M. Kabiri Nasrabad, H. R. Abbasi, A. Amrollahi, M. Soleymani // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 438. – Art. 136953.

[13] Huang, N. Spatial Characteristics of Aeolian Sand Transport Affected by Surface Vegetation along the Oshang Railway / N. Huang, Y. Song, X. Li, B. Han, L. Xu, J. Zhang // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, no. 10. – Art. 3940.

[14] Zhang, K. Protective Efficiency of Railway Arbor-Shrub Windbreak Forest Belts in Gobi Regions: Numerical Simulation and Wind Tunnel Tests / K. Zhang, J. Qu, X. Zhang, L. Zhao, S. Li // Frontiers in Environmental Science. – 2022. – Vol. 10. – Art. 885070.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесов Кувандык Сагинович / Lesov Kuvandik Saginovich
Ташкентский государственный транспортный университет, Кандидат технических наук, профессор,
E-mail: kuvandikl@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9434-0713>

Кенжалиев Мухамедали Казбек угли / Kenjaliyev Muhamedali Kazbek o'g'li
Ташкентский государственный транспортный университет, PhD, и.о. доцента,
E-mail: mkenjaliyev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4622-5937>

Мавланов Ахмаджан Хакимджанович / Mavlanov Axmadjan Hakimdjanovich
Ташкентский государственный транспортный университет, PhD, и.о. доцента,
E-mail: max23011970@mail.ru



Assessment of Erosion Reduction on Railway Slopes Using Geomats

A.Sh. Uralov¹^a, D.K. Kenjalieva¹^b

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The article examines protective forest plantations as a factor contributing to the stability of railway ecotechnical systems under conditions of mobile sands. It is established that, in arid regions, the stability of railway infrastructure is largely determined by the intensity of deflation processes, the level of sand transport, and the degree of protection of the railway right-of-way. The study considers the role of protective forest plantations in reducing wind speed, decreasing deflation load, stabilizing sandy surfaces, and improving the operational stability of railway tracks. It is shown that the combined use of protective forest belts and engineering measures reduces sand accumulation on railway tracks and improves the reliability of railway operation under adverse natural and climatic conditions. The article concludes that protective forest plantations are an important factor in enhancing the stability of railway ecotechnical systems in areas affected by mobile sands.

Key words: Erosion, geomat, geosynthetic materials, RUSLE model, railway slopes, C-factor, P-factor, soil loss, slope stability, hydraulic stability

Temir Yo'l Qiyaliklarida Geomatlar Yordamida Eroziyani Kamaytirishni Baholash

O'ralov A.Sh.¹^a, Kenjaliyeva D.K.¹^b

¹Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent, O'zbekiston

Annotatsiya: Mazkur maqolada temir yo'l qiyaliklarida eroziya jarayonlarini kamaytirishda geomatlardan foydalanish samaradorligi RUSLE modeli asosida baholandi. Tadqiqotda yog'ingarchilikning eroziyaviy ta'siri, tuproqning eroziyaga moyilligi, qiyalik geometriyasi hamda qoplama-boshqaruv omillari tahlil qilindi. Asosiy e'tibor RUSLE tenglamasidagi C va P omillariga qaratildi. ASTM D6459 standart sinovlari hamda ilmiy tadqiqotlar natijalari asosida geomatlar va o'simlik qoplami qo'llanganda ushbu koeffitsientlar 0.4-0.6 oralig'igacha kamayishi aniqlangan. Natijada qiyaliklarda yillik tuproq yo'qotilishi sezilarli darajada kamayadi. Geomatlarning suv oqimi energiyasini pasaytirishi, tuproq zarrachalarining siljishini cheklashi va o'simlik ildiz tizimi bilan birgalikda gidravlik barqarorlikni oshirishi asoslab berildi. Tadqiqot natijalari geomatlarning temir yo'l yer polotnosi qiyaliklarini eroziyadan himoyalashda samarali geosintetik yechim ekanligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: Eroziya, geomat, geosintetik materiallar, RUSLE modeli, temir yo'l qiyaliklari, C-faktor, P-faktor, tuproq yo'qotilishi, qiyalik barqarorligi, gidravlik barqarorlik

1. KIRISH

O'zbekiston temir yo'llarining asosiy qismlari shamol yoki suv eroziyasiga moyil hududlarda joylashgan.

Yillik yog'in miqdori kam bo'lgan hududlarda asosan shamol ta'sirida eroziya jarayoni sodir bo'ladi. Buning natijasida turli xil infratuzilmalar (temir yo'llar, avtomobil yo'llari, sanoat va fuqarolik binolari), qishloq xo'jaligi yerlari, insonlar va hayvonot olami turli zararlarga uchrashi mumkin.

So'ngi vaqtlarda iqlim o'zgarishi natijasida yog'ingarchilik holati ancha o'zgarib bormoqda, ayniqsa yomg'irlarning chastotasi va intensivligi o'zgardi. Yomg'irlar avvallari yengil va uzoq davom etgan bo'lsa hozir qisqa muddatli lekin jala ko'rinishidagi yomg'irlar ko'proq kuzatilayapti. Shu sababli kam yog'ingarchilik bo'ladigan hududlarda ham qisqa ammo jadal yomg'irlar yomg'ir eroziyasini ham rivojlantirmoqda.


Eroziya jarayoni to'g'ri boshqarilmasa turli ko'chishlar va yuvilishlarga sabab bo'lib, qiyalikning yemirilishiga olib kelib, infratuzilma yaxlitligini buzadi, ta'mirlash xarajatlarining oshishi, infratuzilmadan foydalanishlarda uzilishlarga hamda foydalanuvchilar xavfsizligiga aloqador xavflarni ham yuzaga keltirishi mumkin [1].

Qiyaliklarda eroziya muammosini hal qilish eng to'g'ri muhandislik yechimlarini qabul qilishni talab etadi.

So'ngi yillarda butun dunyo qurilish amaliyotida zamonaviy qurilish materiallaridan foydalanilmoqda va ushbu materiallar ichida geosintetik materiallar eng keng tarqalayotganlaridan biri hisoblanadi [2].

Geosintetik materiallar – temir yo'l va avtomobil yo'llari qurilishi kabi turli sohalarida qo'llaniladigan sintetik mahsulotlarning umumiy klassifikatsion nomidir. Ular tarkibiga geotekstil materiallar,

^a <https://orcid.org/0000-0002-6124-5250>

^b <https://orcid.org/0000-0003-4622-5937>



geoto'rlar (geopanjara), geosetkalar, geomembranalar, geomatlar hamda geokompozitlar kiradi. Mazkur materiallar yuqori mustahkamlik, kimyoviy ta'sirlarga bardoshlilik, uzoq xizmat muddati (100 yilgacha), yuqori haroratga chidamlilik, kam material talab etishi va yengilligi kabi muhim xususiyatlari bilan ajralib turadi [3].

Eroziya jarayonlaridan qiyaliklarni himoyalab mustahkamlashda geosintetik materiallardan foydalanish bo'yicha loyihalash qoidalari hamda standartlari mavjud [4,5].

Temir yo'llar yer polotnosi qiyaligini eroziya jarayonidan himoyalashda geosintetik materiallardan hajmli geopanjara va geomatlardan foydalaniladi [2].

Geosintetik materiallarni ISO TR 18228-8 "Geosintetiklardan foydalangan holda loyihalash – 8-qism: Yuzaki eroziyani nazorat qilish" standartining loyihasi bo'lib, ushbu standartda yog'in ta'sirida yuzaga keladigan qiyalik eroziyasini cheklash uchun geosintetik yechimlarni loyihalash bo'yicha tavsiyalar va ko'rsatmalar keltirilgan [5].

Qo'llanilgan eroziyaga qarshi chora tadbirlarning qanchalik foydali ekanligini bilish muhim bosqich hisoblanadi. Qiyaliklarda sodir bo'ladigan eroziya jarayonida tuproq yo'qotilishini hisoblashning bir qancha usullari mavjud.

Geosintetik materiallarni eroziyaga qarshi qo'llangan holni RUSLE tenglamasida qarab chiqamiz.

2. TADQIQOT METODLARI

Wischmeier va Smith 1958-yilda yog'ingarchilik energiyasi va uning tuproq yuvilishiga ta'siri bo'yicha dastlabki tadqiqotlarni taqdim etdilar. "Universal Soil Loss Equation" (USLE) 1965-yilda AQSh Qishloq xo'jaligi qo'llanmasining 282-sonida chop etilgan. Keyingi yillarda model takomillashtirilib, 1978-yilda RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) shaklida nashr etildi. Renard va hammualliflar tomonidan ishlab chiqilgan ushbu modelda tenglamaning asosiy tuzilishi saqlab qolingan bo'lsa-da, ayrim koeffitsientlar yangi ilmiy tadqiqotlar asosida qayta ishlangan [6].

RUSLE modeli universal xususiyatga ega bo'lib, turli geografik va ijtimoiy-iqtisodiy sharoitlarda qo'llanishi mumkin, biroq buning uchun ishonchli statistik ma'lumotlar bazasi talab etiladi. Tenglamadagi omillar hududning iqlimi, tuproq xossalari, relyefi, yer qoplami, ekin turi va agrotexnik tadbirlarni tavsiflaydi [7].

Tuproq yo'qotilishining takomillashtirilgan universal tenglamasi – RUSLE

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Tenglamada:

A – o'rtacha yillik tuproq yo'qotilishi (tn/ga-yil);

R – yog'ingarchilikning eroziya hosil qilish koeffitsienti;

K – tuproqning eroziyaga moyillik koeffitsienti;

LS – qiyalik uzunligi va tikligi koeffitsienti;

C – yer qoplami va boshqaruv koeffitsienti;

P – eroziyaga qarshi himoya tadbirlari koeffitsienti [7].

RUSLE modeli qurilish maydonlarida yuzaga keladigan eroziyani prognozlashda ham qo'llaniladi. U eroziyaga eng moyil hududlarni aniqlash, mulchalash va himoya choralarning samaradorligini baholash hamda cho'kindi hovuzlariga tushadigan sediment hajmini taxmin qilish imkonini beradi [6].

(1) formuladagi yog'inning eroziyaviy omili (R omil) har bir hududdagi yog'inning eroziya keltirib chiqarish salohiyatini ifodalaydi. U yog'in intensivligi hamda uning tuproq zarrachalarini ajratib yuborish qobiliyatini tavsiflaydi. Muayyan hududdagi yog'inning energiyasi va intensivligini baholash orqali uning eroziyaviy ta'siri aniqlanadi [1].

R omili yog'in ma'lumotlari asosida hisoblanadi. Bunda yomg'irning kinetik energiyasi hamda ma'lum vaqt oralig'idagi maksimal intensivligi inobatga olinadi [1].

Yog'in hodisasining energiyasi quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$e_r = 0.29 \cdot [1 - 0.72e^{-0.05i_r}] \quad (2)$$

bu yerda: e_r – yog'inning energiyasi [MJ/ga]; i_r – ko'rib chiqilayotgan davrdagi yog'in intensivligi.

Shundan so'ng yog'inning eroziyaviy ko'rsatkichi quyidagi formula orqali hisoblanadi:

$$EI_{30} = \left(\sum_{r=1}^k e_r v_r \right) I_{30} \quad (3)$$

bu yerda: v_r – ko'rib chiqilayotgan davrdagi yog'in hajmi [mm/s]; I_{30} – yog'in hodisasining 30 daqiqalik maksimal intensivligi [1].

Yakunda o'rtacha yillik yog'in eroziya omili – R omili quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^m (E)(I_{30})_k \right] = \left(\sum_{k=1}^m e_r v_r \right) I_{30} \quad (4)$$

bu yerda: n – kuzatilgan yillar soni; m – j -yildagi yog'in hodisalari soni; k – alohida yog'in hodisasining eroziyaviy ko'rsatkichi EI_{30} .

K omili – tuproqning yog'in va yuzaki oqim ta'sirida eroziyaga uchrash darajasini baholovchi ko'rsatkichdir. U yog'in energiyasining har bir birligiga to'g'ri keladigan siljishi mumkin bo'lgan tuproq miqdorini ifodalaydi hamda tuproqning ichki xususiyatlarini, jumladan zarracha o'lchamlari taqsimoti, tuzilishi, suv o'tkazuvchanligi va organik modda miqdorini aks ettiradi [1].

K omili tuproqning granulometrik tarkibi – ya'ni zarracha o'lchamlari taqsimoti asosida aniqlanadi [1].



Zarrachalar taqsimotini tahlil qilish orqali zarrachalarning geometrik o'rtacha diametri D_g quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$D_g = \exp \left[0.01 \sum_{i=1}^N f_i \ln(d_i) \right] \quad (5)$$

bu yerda: f_i – i -elak fraksiyasining foiz miqdori; d_i – ushbu fraksiyaning o'rtacha diametri.

Zarrachalarning geometrik o'rtacha diametri aniqlangandan so'ng, tuproqning K omili hisoblanadi [6].

$$K = \left\{ 0.034 + 0.0405 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log(D_g) + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

Yog'in va tuproq bilan bog'liq omillardan tashqari, RUSLE modeli qiyalik geometriyasining tuproq eroziyasiga ta'sirini hisobga oluvchi ikkita o'zgaruvchini ham o'z ichiga oladi. Bular: qiyalik uzunligi omili (L); qiyalik tikligi omili (S). Mazkur omillar yer yuzasining fizik xususiyatlari eroziya jarayonlariga qanday ta'sir ko'rsatishini tushinishda muhim ahamiyatga ega [7].

Qiyalik uzunligi omili (L) qiyalik uzunligining tuproq eroziyasiga ta'sirini ifodalaydi va qiyalikning gorizontol uzunligi (λ) asosida hisoblanadi:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (7)$$

bu yerda m – o'lchovsiz ko'rsatkich bo'lib, u qiyalik tikligining funksiyasi hisoblanadi.

Qiyalik tikligi omili (S) qiyalik nishabligining eroziyaga ta'sirini hisobga oladi va qiyalik darajasiga bog'liq holda quyidagi formula orqali aniqlanadi [7]:

$$S = 0.065 + 0.0456s + 0.006541s^2 \quad (8)$$

bu yerda: s – qiyalikning foizdagi nishabligi.

Qiyalik tiklashgan sari suv oqimi tezlashadi, natijada ko'proq cho'kindi materiallar ko'chiriladi va eroziya jarayoni kuchayadi.

Amaliyot omili (P) va boshqaruv omili (M) loyiha doirasida qo'llaniladigan ekspluatatsiya va boshqaruv strategiyalari bilan bevosita bog'liqdir [9].

P omili suv oqimini boshqarish uchun konturli ishlov berish yoki turli to'siqlardan foydalanish kabi yordamchi tadbirlarning ta'sirini ifodalaydi. M omili esa umumiy yer boshqaruvini, jumladan agrotexnik tadbirlar yoki gidroseyka (hydroseeding) kabi usullarni qamrab oladi [1].

Biroq, ko'plab fuqarolik muhandisligi loyihalarida, ayniqsa yo'l ko'tarmalari yoki qiyaliklarini qurish jarayonida, ushbu omillar ko'pincha 1 ga teng deb qabul qilinadi, ya'ni ular neytral ta'sir ko'rsatadi deb hisoblanadi.

Buning sababi shundaki, ko'tarmalar sun'iy inshootlar bo'lib, odatda tabiiy qiyaliklardagidek rivojlangan o'simlik qoplami va tabiiy holatga ega bo'lmaydi. Shu sababli ularda shakllangan boshqaruv yoki himoya amaliyotlari mavjud emas [1].

C omili yoki qoplama-boshqaruv omili ma'lum bir qiyalikda o'simlik qoplami, tuproq qoplami yoki boshqa boshqaruv choralarining himoya darajasini ifodalaydi [7].

$C=1$ bo'lsa, tuproq himoyalangan yoki juda kam himoyalangan bo'lib, kuchli eroziyaga moyil hisoblanadi.

$C<1$ bo'lsa, tuproq himoyalangan deb qaraladi, masalan, o'simlik qoplami yoki geomatlar bilan qoplangan holatda.

C qiymati qanchalik kichik bo'lsa, qo'llangan eroziyaga qarshi himoya yechimi shunchalik samarali bo'ladi.

3. NATIJALAR VA MUHOKAMA

Geomat qoplamasining eroziyaga qarshi samaradorligi RUSLE tenglamasidagi C va P koeffitsientlari orqali baholandi. Ushbu omillar qiyalik yuzasining himoyalanganlik darajasini hamda eroziyaga qarshi qo'llanilgan muhandislik choralarining samaradorligini ifodalaydi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, temir yo'l qiyaliklarida geomatlardan foydalanish tuproq yuzasini mexanik jihatdan mustahkamlab, suv oqimining bevosita ta'sirini kamaytiradi va natijada tuproq yuvilishining oldini oladi [10].

C-faktorining qiymatlari ASTM D6459 standartiga muvofiq laboratoriya va dala sharoitlarida o'tkazilgan tajribalar asosida aniqlanadi. Mazkur standart geosintetik qoplamalarning yomg'ir ta'siridagi eroziyaga qarshi samaradorligini baholashga mo'ljallangan bo'lib, real sharoitga yaqin qiyaliklarda sun'iy yog'ingarchilik hosil qilish orqali tuproq yo'qotilishi miqdorini aniqlash imkonini beradi [8].

Tadqiqotlar natijasiga ko'ra, geomat va o'simlik qoplami mavjud holatda C va P koeffitsientlari quyidagi oraliqqacha kamayadi:

$$\frac{C_{geo}}{C_0} \in [0, 4 - 0, 6], \quad (9)$$

$$\frac{P_{geo}}{P_0} \in [0, 4 - 0, 6] \quad (10)$$

Mazkur natijalar geomatlar qo'llanganda qiyalik yuzasining himoyalanganlik darajasi sezilarli ortishini ko'rsatadi. Himoyalangan holatdagi yillik tuproq yo'qotilishi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$A_{geo} = A_0 \cdot \frac{C_{geo}}{C_0} \cdot \frac{P_{geo}}{P_0} \quad (11)$$

Tenglamadan ko'rinadiki, C va P koeffitsientlarining kamayishi yillik tuproq yo'qotilishining to'g'ridan-to'g'ri pasayishiga olib keladi. Tadqiqotlar geomat va o'simlik qoplami birgalikda qo'llanilganda eroziya intensivligi o'rtacha 40–60 % gacha kamayishini ko'rsatdi. Bu holat ayniqsa kuchli yog'ingarchilik va qisqa muddatli jala



yomg'irlari kuzatiladigan hududlarda muhim ahamiyatga ega [10].

Geomatlardan foydalanishning yana bir muhim afzalligi — suv oqimi energiyasini kamaytirishidir. Geomatning uch o'lchamli tolali tuzilishi suv oqimini mayda oqimchalarga ajratib yuboradi, natijada oqim tezligi hamda mahalliy yuvilish kuchi kamayadi. Shu bilan birga geomat tuproq zarrachalarining siljishini cheklab, yuzada qo'shimcha ishqalanish hosil qiladi. Bu esa tuproqning kritik kesuvchi kuchini oshiradi va qiyalikning gidravlik barqarorligini yaxshilaydi [10].

O'simlik qoplami bilan birgalikda qo'llanilgan geomatlar yanada yuqori samaradorlikni namoyon etadi. O'simlik ildizlari tuproq qatlamlarini bog'lab turadi, geomat esa ushbu ildiz tizimini mexanik himoya qiladi hamda urug'larning yuvilib ketishini oldini oladi. Natijada qiyalik yuzasida barqaror bioinjenerlik tizimi shakllanadi. Bu tizim nafaqat eroziya jarayonlarini kamaytiradi, balki qiyalikning uzoq muddatli ekspluatatsion barqarorligini ham ta'minlaydi.

RUSLE modelida C va P omillarining kamayishi geosintetik materiallarning eroziyaga qarshi samaradorligini miqdoriy baholash imkonini beradi. Shu sababli geomatlardan foydalanish temir yo'l yer polotnosi qiyaliklarini himoyalashda iqtisodiy va texnik jihatdan samarali yechim hisoblanadi [1]. Ayniqsa O'zbekistonning qurg'oqchil va yarim qurg'oqchil hududlarida qisqa muddatli kuchli yog'inlar ta'sirida yuzaga keladigan eroziya jarayonlarini kamaytirishda geomatlar muhim ahamiyat kasb etadi [2,3,10].

4. XULOSA

Temir yo'l qiyaliklarida eroziya jarayonlarini kamaytirishda geomatlardan foydalanish yuqori samaradorlikka ega ekanligi aniqlandi. RUSLE modelidagi C va P omillari orqali olib borilgan tahlillar geomat va o'simlik qoplami mavjud holatda yillik tuproq yo'qotilishi sezilarli darajada kamayishini ko'rsatdi. Geomatlarning uch o'lchamli tuzilishi suv oqimi energiyasini kamaytirib, tuproq zarrachalarining siljishiga qarshilik hosil qiladi hamda qiyalikning gidravlik barqarorligini oshiradi.

ASTM D6459 standart sinovlari va ilmiy tadqiqotlar natijalari geomatlar qo'llanganda eroziya intensivligi 40–60 % gacha kamayishini tasdiqlaydi. O'simlik qoplami bilan birgalikda qo'llanganda esa qiyalikning uzoq muddatli barqarorligi yanada ortadi. Shu sababli geomatlar temir yo'l yer polotnosi qiyaliklarini himoyalashda samarali, iqtisodiy va ekologik jihatdan maqsadga muvofiq geosintetik yechim hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR / REFERENCES

- [1] Filippo Maria Santoli, Giulia Lugli, and Fabrizia Trovato. Comprehensive overview of soil erosion control: design of anti-erosive geomats for effective slope stabilization. *EUROGEO 8. E3S Web of Conferences* 644, 04005 (2025). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202564404005>
- [2] Lesov K.S., O'ralov A.Sh., Yuldashaliyev J.B. Geosintetik materiallarni qo'llagan holda yer polotnosi qiyaliklarini eroziya jarayonidan himoyalash bo'yicha eksperimental tadqiqotlar. *Journal of Transport*. ISSN: 2181-2438. Volume: 2. 2025. 5–8 b. <https://doi.org/10.56143/2181-2438-2025-2-5-8>
- [3] Lesov K.S., O'ralov A.Sh., Yuldashaliyev J.B. Eroziya jarayoni va geosintetik materiallarni qo'llash tahlili. *Problems of Architecture and Construction (Scientific and Technical Journal)*. 30.03.2025. Issue 3. E-ISSN: 2901-7845, ISSN: 2091-9004, 40–47 b. <https://portal.issn.org/resource/ISSN/2091-5004>
- [4] СП 425.1325800.2018. *Инженерная защита территорий от эрозионных процессов. Правила проектирования*. Москва, 2018.
- [5] ISO/TR 18228-8. *Design Using Geosynthetics — Part 8: Surface Erosion Control*.
- [6] P. Rimoldi. *Design of Geosynthetics for Erosion Control on Slopes*. EuroGeo 6. 2016.
- [7] K.G. Renard, G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, D.C. Yoder. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Handbook 703, 1997. 404 pp.
- [8] ASTM D6459. *Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in Protecting Hillslopes from Rainfall-Induced Erosion*.
- [9] Alloys Luvai, John Obiero, and Christian Omuto. Soil Loss Assessment Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Model. *Applied and Environmental Soil Science*. Hindawi. Volume 2022, Article ID 2122554, 14 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/2122554>
- [10] Kuvandik Lesov, Akmal Uralov, Mukhamedali Kenjaliyev, Ulugbek Ergashev, Feng Huaiping. The importance of using geosynthetic materials in ensuring anti-erosion stability of railway embankments. *74th International Conference on Vibroengineering*, Tashkent, Uzbekistan, November 27–29, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21595/vp.2025.25326>



**INFORMATION ABOUT THE
AUTHORS / MUALLIFLAR
MA'LUMOTLARI**

**O'ralov
Akmal
Shakar
o'g'li** Toshkent davlat transport
universiteti (TDTrU) «Temir yo'l
muhandisligi» kafedrasida tayanch
doktoranti.
E-mail:
akmaljonorlov1928@gmail.com
Tel.:+998998174312
<https://orcid.org/0000-0002-6124-5250>

**Kenjaliyeva
Damira
Kuvandik
qizi** Toshkent davlat transport
universiteti (TDTrU) «Temir yo'l
muhandisligi» kafedrasida
tadqiqotchisi
E-mail:
kenjaliyeva_damira@gmail.com
Tel.:+998977841672
<https://orcid.org/0000-0003-4622-5937>



Predicting Railway Sand Drifts Using Meteorological Data

M.K. Muzaffarova¹ ^a

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This article investigates the patterns of sand drift formation on railway infrastructure located in arid zones. The study analyzes the dependence of track encroachment intensity on atmospheric process parameters, with a particular focus on moisture deficit in regions prevalent with dune sands. The research establishes a mathematical correlation between a decrease in annual precipitation and the maximization of sand accumulation on the track superstructure. Reduced moisture in the top sand layer causes a loss of cohesion, thereby intensifying deflation processes under wind loads. The findings enable the prediction of critical periods of track susceptibility to sand drifts and can be applied to optimize the design of protective structures and improve the scheduling of track clearing operations.

Keywords: Sand drifts, railway track, dune sands, atmospheric processes, annual precipitation, arid zone, encroachment dynamics, wind-sand flow

Прогнозирование Пескозаносимости Железнодорожных Путей По Метеорологическим Показателям

Музаффарова М.К.¹ ^a

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В статье исследуются закономерности формирования песчаных заносов на объектах железнодорожной инфраструктуры, расположенных в аридных зонах. Автором проанализирована зависимость интенсивности занесения путей от параметров атмосферных процессов, с особым акцентом на дефицит влаги в регионах распространения барханных песков. В ходе работы установлена математическая связь между снижением уровня годовых осадков и максимизацией объемов песчаных отложений на верхнем строении пути. Снижение влажности верхнего слоя песка приводит к потере его связности и интенсификации дефляционных процессов под воздействием ветровых нагрузок. Полученные результаты позволяют прогнозировать критические периоды заносимости дорог и могут быть использованы для оптимизации параметров защитных сооружений и планирования графиков очистки путей.

Ключевые слова: Песчаные заносы, железнодорожный путь, барханные пески, атмосферные процессы, годовые осадки, аридная зона, динамика заносимости, ветропесчаный поток

1. ВВЕДЕНИЕ

Опустынивание представляет собой глобальную экологическую проблему, вызванную масштабными климатическими изменениями. В аридных регионах дефицит увлажнения в сочетании с ветровой активностью определенной интенсивности выступает ключевым фактором формирования ветропесчаного потока, борьба с которыми является приоритетом для многих государств, включая Узбекистан [1, 2].

Для пустынного климата характерно аномально жаркое лето и концентрация осадков в зимне-весенний период.

Температурные амплитуды здесь экстремальны: от морозов ниже -35°C зимой до зноя выше $+50^{\circ}\text{C}$ летом. При этом уровень годовых осадков неравномерен: на равнинах он составляет всего 80–200 мм, в предгорьях возрастает до 300–400 мм [3, 4].

Климат пустынь признан самым жаркими и засушливыми. Осадки здесь носят случайный характер, а в отдельные годы могут полностью отсутствовать. Такие суровые условия формируются из-за континентальности климата [2, 4]. Суточные колебания температур крайне резки: дневной солнцепек раскаляет почву и губит семена растений, а ночью воздух и верхний слой песка стремительно остывают. Чтобы

^a  <https://orcid.org/0000-0002-0858-4704>



оперативно остановить выветривание (дефляцию) песков, биологическую рекультивацию эффективно сочетают с техническими методами [5–8].

В ранее выполненных исследованиях подчеркивается, что стабильность песчаных дюн напрямую определяется ветровым режимом и критическим разреживанием растительного покрова. Тем не менее, плотность растительного покрова на песчаных субстратах напрямую регулируется локальными гидротермическими факторами. В связи с этим мониторинг воздействия ветрового режима и атмосферных осадков на динамику эоловых форм рельефа необходим для среднесрочного прогнозирования подвижности песков и научно обоснованного планирования протипесчаных мероприятий [9, 10].

Движение песков несет серьезную угрозу экономике: ущерб складывается не только из заносов отдельных объектов, но и из постоянных расходов на очистку дорог, гидромелиоративных узлов и орошаемых земель. Ежегодно железнодорожные службы вынуждены расчищать от песчаных завалов в среднем около 200 км путей [8].

Защита транспортно-технической инфраструктуры становится критически важной из-за роста скоростей поездов и перехода железных дорог с дизельной тяги на электрическую. Внедрение высокоскоростного пассажирского сообщения на стратегическом направлении от Бухары до Мискена превратило борьбу с песчаными заносами в ключевой фактор обеспечения безопасности движения.

По этой причине развернуты масштабные работы по модернизации строительства и эксплуатации железных дорог в аридных зонах, направленные на обеспечение безопасности. Эти мероприятия требуют значительного финансирования. Согласно многолетним эмпирическим данным дистанций защитных лесонасаждений, в периоды повышенного количества атмосферных осадков интенсивность эолового переноса резко снижается. Таким образом, установление точной зависимости между интенсивностью песчаных заносов и объемом атмосферных осадков позволит оптимизировать планирование сезонных защитных работ, существенно сократить их объем или полностью исключить необходимость их проведения на отдельных этапах, что минимизирует финансовые затраты.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При участии инженерно-технического персонала дистанций пути Навоийского и Бухарского регионов осуществлен 10-летний мониторинг интенсивности песчаных заносов на исследуемых участках. На основе зарегистрированных уровней пескозаносимости железных дорог с использованием метода ранжирования М. М. Мирахмедова определена категориям заносимости участков (табл. 1).

На следующем этапе исследования проведен мониторинг параметров атмосферных процессов в аридных зонах по данным метеорологической сети рассматриваемых регионов за исследуемый период.

На основе полученных данных был выполнен сравнительный анализ корреляции между объемом годовых и сезонных атмосферных осадков, ветровым режимом и установленными категориями пескозаносимости железнодорожного пути.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетний мониторинг осуществлялся на территории Навоийской и Бухарской областей — регионов, характеризующихся широким распространением барханных песков. Результаты проведенных исследований в пределах Навоийской области систематизированы и представлены в табл. 1.

Таблица 1
Параметры осадков и категорий заносимости пути (по годам)

Годы	Январь-Февраль	Март-Май	Июнь-Июль	Сентябрь-Декбрь	За год	Категория заносимости участков
Навоийская область						
2014	22	46,8	0	0	68,8	I
2015	-	-	-	-	-	III
2016	0	2,6	0	45	47,6	I
2017	63	47	0	22,4	132	II
2018	25	16	0	30	84	I
2019	49	168	29	20,4	266	III
2020	91	116	2	19	228	III
2021	26	105	3	22	156	II
2022	55	123	3	37	218	III
2023	45	37	3	45	130	II
2024	78	137	6	66	287	III



Результаты исследований свидетельствуют о том, что максимальная интенсивность песчаных заносов (I категория) фиксируется в периоды, когда годовой объем атмосферных осадков не превышает 100 мм. Напротив, для лет с уровнем осадков более 220 мм характерны минимальные объемы песчаных отложений на путях.

Промежуточные значения годовых осадков в диапазоне от 100 до 220 мм обуславливают формирование II категории пескозаносимости, при которых интенсивность дефляционных процессов напрямую зависит от сезонного распределения влаги. Наиболее критическим фактором в данном контексте выступает объем осадков именно в весенний период. Как показывают многолетние наблюдения, достаточная влажность почвы весной служит пусковым механизмом для массового прорастания семян псаммофитов и фитомелиорантов, находящихся в верхнем слое субстрата.

Физическая природа выявленной закономерности объясняется двумя факторами. Во-первых, при уровне осадков более 220 мм естественное обводнение песчаного массива временно увеличивает силы сцепления между частицами песка, что резко повышает пороговую скорость ветра, необходимую для начала дефляции. Во-вторых, избыточное весеннее увлажнение инициирует процесс спонтанного самозарастания барханов. Формирующийся растительный покров, даже при минимальном проективном покрытии, снижает приземную скорость ветропесчаного потока и надежно фиксирует подвижные пески.

Напротив, в экстремально засушливые годы (менее 100 мм осадков) семена фитомелиорантов выгорают под воздействием интенсивной солнечной инсоляции, не выходя из состояния покоя. Полное отсутствие естественного растительного барьера в сочетании с потерей связности иссушенного песчаного грунта детерминирует максимальную интенсивность дефляции и отрыва частиц ветровым потоком. В такие периоды объемы заносов на верхнем строении пути достигают пиковых значений, переводя участки железной дороги в категорию повышенной опасности.

В результате проведенного анализа определены граничные значения осадков, разграничивающие уровни опасности

песчаных заносов на железнодорожных путях (табл. 2).

Таблица 2
Оценка влияния атмосферных осадков на динамику песчаных заносов

Осадки, мм		Категория пескозаносимости
В году	В том числе весной	
$D \geq 220$	$D \geq 110$	III
$150 < D < 220$	$50 < D < 110$	II
$D < 150$	$D \leq 50$	I

4. ВЫВОД

Ключевым фактором снижения интенсивности годовых песчаных заносов на железнодорожных путях является годовое количество осадков, обеспечивающее естественное зарастание песчаных массивов псаммофитной растительностью. В связи с этим, прогнозирование уровня пескозаносимости железных дорог предполагает проведение исследований, направленных на установление корреляции между объемом годовых осадков, динамикой развития растительного покрова и объемом аккумулярованного песка.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Мирахмедов М. М. Основы методологии организации пескозакрепительных работ и защита природно-технических объектов от песчаных заносов: Монография. — Ташкент: ТАСИ, 2008. — 248 с.
- [2] Jessyca Adelle Silva Santos, Queila Souza Garcia. Ethylene in the regulation of seed dormancy and germination: Biodiversity matters // *Seed Germination. The Crop Journal*, 2021. <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/seed-germination>
- [3] Фазилов Т. И., Фазилова З. Т. Борьба с подвижными песками. — Ташкент: ТашиИИТ, 2003. — 124 с.
- [4] Бабаев А.Г. Принципы и методы закрепления подвижных песков: Монография. Центр международных проектов ГКНТ. — Москва, 1986.
- [5] Адылходжаев А.И. Применение госсиполовой эмульсии в качестве вяжущего для закрепления подвижных песков: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Ташкент, 1978. — 241 с.



[6] Мирахмедов М., Ивушкина А.А. Прогнозирование строительно-технологических характеристик способов технической мелиорации песков // I Республиканская конференция магистров: Сборник докладов. Ч. 2. — Ташкент: ТГТУ, 2003. — С. 34–36.

[7] Закиров Р.С., Омаров А.Д. Организация сооружения земляного полотна при строительстве дорог в аридных регионах: Монография. — Алматы: Издательство «Бастау», КазАТК им. М. Тынышпаева, 2001. — 156 с.

[8] Muzaffarova M. Dilatation of the method of the fixation of moveable sands // *Transport Problems*. 2022. Vol. 17, No. 4. P. 79–89.

[9] Ashkenazy Y., Yizhaq H., Tsoar H. Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts // *Climatic Change*. 2012. Vol. 112. Issues 3–4. P. 901–923.

[10] L.Y. Liu, E. Skidmore, E. Hasi, L. Wagner, J. Tatarko. Dune sand transport as influenced by wind directions, speed and frequencies in the Ordos Plateau, China.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.10.005>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Музаффарова
Маужуда
Кадирбаевна**

Доцент кафедры «Инженерия железных дорог», Ташкентский государственный транспортный университет

E-mail: mauguda@mail.ru

Tel.: +99897130063

<https://orcid.org/0000-0002-0858-4704>



Application of Composite Sleepers on Railway Bridge Approaches

Z. Fazilova¹

¹Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

Abstract: Laying composite sleepers on the approach to the bridge is a scientifically based and proven method of dealing with transitional rigidity. The main effect is achieved by smoothing the jump in elasticity and increased damping, which prolongs the life of the entire structure. The assessment of cyclic strength, elastic and damping properties of composite sleepers under the influence of a variable load simulating the passage of wheelsets was carried out in the loading mode: 60-80 kN (span 20 kN) with frequencies of 5, 10 and 15 Hz. Number of cycles: up to 5000. The results showed that the material is subject to cyclic strengthening. Initial instability (0-200 cycles) is replaced by stable strengthening.

Keywords: Approaches to bridges, composite sleeper, cyclic tests, loading mode, frequency of action, damping properties, deformation, modulus of elasticity

Применение Композитных Шпал на Подходах к Железнодорожным Мостам

Фазилова З.¹

¹Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Укладка композитных шпал на подходе к мосту научно обоснованный и подтвержденный практикой метод борьбы с переходной жесткостью. Основной эффект достигается за счет сглаживания скачка упругости и повышенного демпфирования, что продлевает ресурс всей конструкции. Оценка циклической прочности, упругих и демпфирующих свойств композитных шпал при воздействии переменной нагрузки, моделирующей проход колесных пар, проводилась в режим нагружения: 60–80 кН (размах 20 кН) с частотами 5, 10 и 15 Гц. Количество циклов: до 5000. Результаты показали, что материал подвержен циклическому упрочнению. Начальная неустойчивость (0–200 циклов) сменяется устойчивым упрочнением.

Ключевые слова: Подходы к мостам, композитная шпала, циклические испытания, режим нагружения, частота воздействия, демпфирующие свойства, деформация, модуль упругости

1. ВВЕДЕНИЕ

Участки переменной жесткости на подходах к мостам представляют собой специальные инженерные конструкции, призванные решить проблему резкого перепада жесткости между относительно податливой насыпью и жестким мостовым сооружением. Такой перепад является основной причиной образования «предмостовых ям» и ускоренного износа пути [1]–[2].

На границе моста и земляного полотна возникает резкий скачок жесткости. При проходе поезда это вызывает неравномерные осадки и дополнительные динамические нагрузки, вибрацию, что приводит к ускоренному износу рельсов, шпал, балластного слоя. Испытания показывают, что модуль упругости пути на типовом железобетонном мосту примерно в 1,5 раза выше, чем на подходе к нему [3]–[4].

Конструкции переменной жесткости обеспечивают плавное, постепенное изменение

модуля упругости подрельсового основания на переходе от насыпи к мосту, чтобы минимизировать динамическое воздействие от поездов.

Для создания участков переменной жесткости применяются различные инженерные решения, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Конструкции участков переменной жесткости

Техническое решение	Принцип действия	Эффективность
Железобетонные переходные плиты	Плита опирается на устой моста и грунт насыпи, распределяя нагрузку на большую площадь	Улучшают плавность хода, но их эффективность ограничена длиной (обычно до 6-8 м)

 <https://orcid.org/0000-0001-5933-1208>



Армирование грунта (сваи, геоматериалы)	Бутонабивные сваи или георешетки укрепляют насыпи, увеличивая его жесткость	Значительно повышают жесткость основания на подходе, уменьшая разницу
Клиновидная засыпка -	За мостовым устоем устраивается клин из материала с постепенно уменьшающейся жесткостью	Снижает неравномерность осадки на 42.2% согласно исследованиям
Применение упругих элементов	Укладка подбалластных матов или подрельсовых прокладок разной жесткости для плавного перехода	Позволяет точно настраивать жесткость пути на разных участках зоны перехода

Согласно нормативам, минимальная длина участка переменной жесткости зависит от скорости движения поездов и составляет от 15 до 25 метров. Однако исследования показывают, что этого часто недостаточно, и для надежной работы на высокоскоростных и грузонапряженных линиях требуется индивидуальное проектирование с учетом реальной длины зоны расстройств [5]–[7].

Таким образом, участки переменной жесткости — это не просто плита, а комплексная система «пролетное строение — устой — земляное полотно», к каждому элементу которой предъявляются свои требования для обеспечения плавности хода и долговечности пути [8]–[9].

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ

Одним из эффективных технических предложений для решения проблемы переходной жесткости является применение композитных шпал на подходах к железнодорожным мостам. Оно позволяет значительно увеличить срок службы пути и снизить затраты на его содержание.

Композитные шпалы работают как "умный" буфер. Они жестче, чем деревянные (которые часто лежат на подходах), но при этом обладают большей гибкостью и демпфированием, чем тяжелый железобетон. Ключевые эффекты от их применения приведены в таблице 2.

Наиболее убедительные данные были получены в ходе масштабных эксплуатационных испытаний, проведенных в США (ТТС) на сети

дорог Union Pacific [6]. На одном из участков были уложены три типа шпал: железобетонные (с резиновыми подкладками и без), а также композитные. Через пропущенный тоннаж в 245 млн тонн брутто результаты показали, что именно композитные шпалы обеспечили наименьший разброс жесткости. Значения модуля упругости на мосту и на подходе стали практически одинаковыми.

Композитные шпалы показали высокие вибропоглощающие характеристики. В ходе тех же испытаний коэффициент демпфирования у композитных шпал был сопоставим с коэффициентом у ЖБ-шпал с резиновыми прокладками (около 0,15), тогда как у обычных ЖБ-шпал он составил всего 0,10. Это означает, что путь с композитными шпалами быстрее гасит вибрации после прохода колеса.

За весь период наблюдений при интенсивном движении на мостах с композитными шпалами не было зафиксировано появления трещин или расстройств пути.

Таблица 2

Эффективность применения композитных шпал

Параметр	Эффект от применения композитных шпал
Выравнивание жесткости	Снижают разницу в жесткости между путем на мосту и на подходе
Снижение динамики	Ударные нагрузки и вибрации гасятся за счет полимерной матрицы
Сопротивление сдвигу	Текстурированная поверхность обеспечивает лучшее сцепление с балластом (у композитных шпал оно в 1,5 раза выше, чем у деревянных)

Оценка демпфирующих свойств композитных шпал одна из ключевых задач, так как именно эти свойства во многом определяют их преимущество над традиционными железобетонными шпалами (снижение вибрации и шума, улучшение динамического взаимодействия пути и подвижного состава).

В соответствии со стандартами AREMA были проведены лабораторные испытания на циклическую нагрузку шпалы для имитации последующих поездов, проходящих над шпалой в течение ее срока службы, что позволяет наблюдать усталостные эффекты или постоянную



деформацию и доказывать несущую способность и работоспособность шпалы (рисунок 1).



Рис. 1. Испытание образца композитной шпалы на циклическую нагрузку

Результаты испытаний на циклическую усталость композитной шпалы на основе переработанного пластика представлены на рисунках 2 – 4.

Представлены три осциллограммы, отображающие динамику изменения деформации образца при приложении циклической нагрузки в диапазоне 60–80 кН. На всех графиках видно, что система вышла на установившийся режим колебаний после начального переходного процесса. В процессе испытаний ни один из образцов не разрушился.

На всех трех частотах (5, 10 и 15 Гц) система успешно обрабатывает циклы нагружения "60-80 кН" без потери формы сигнала.

График на 5 Гц показывает размах деформации около 0.8 мкм (на уровне 9.5-10.3 мкм), тогда как графики на 10 Гц и 15 Гц показывают гораздо меньший размах (0.1 мкм) и абсолютно другие значения (в районе 31 мкм). Наиболее вероятной причиной такого поведения можно считать изменение жесткости композитного материала за счет уплотнения материала.

При повышении частоты с 5 до 15 Гц амплитуда деформации (на данном конкретном временном срезе и, вероятно, при определенной жесткости) не увеличивается, а наоборот (на втором и третьем графиках) фиксируется в более "узком" диапазоне. Это характерно для некоторых типов испытаний, где при увеличении скорости нагружения материал ведет себя более упруго (эффект частотной зависимости модуля упругости).

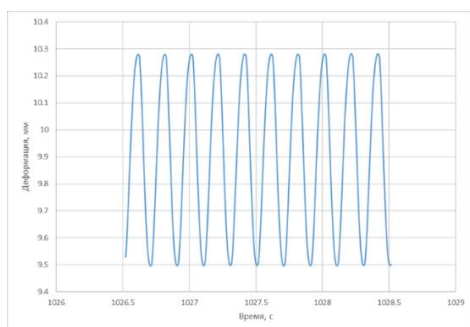


Рис. 2. Динамика 10 циклов 60-80 кН (5 Гц)

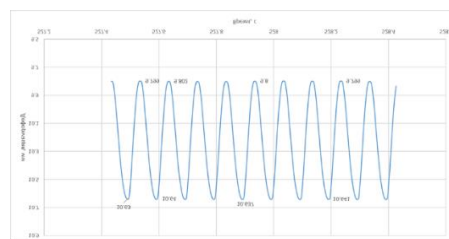


Рис. 3. Динамика 10 циклов 60-80 кН (10 Гц)

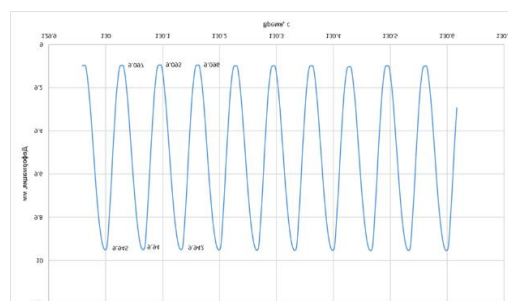


Рис. 4. Динамика 10 циклов 60-80 кН (15 Гц)

На графиках рисунков 5 – 7 показано изменение модуля упругости в зависимости от количества циклов нагружения.

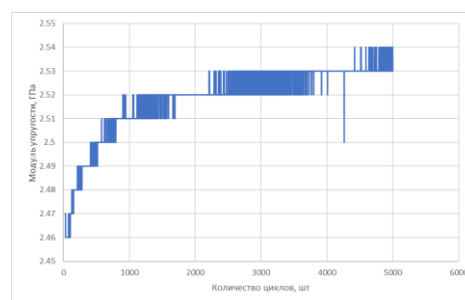


Рис. 5. Модуль упругости при 60-80 кН (5 Гц)

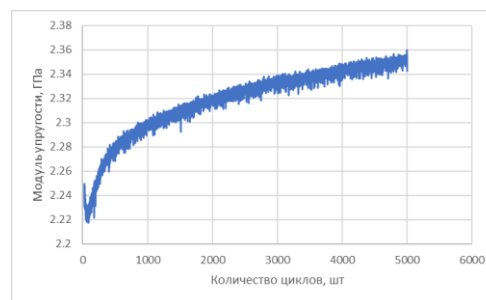


Рис. 6. Модуль упругости при 60-80 кН (10 Гц)

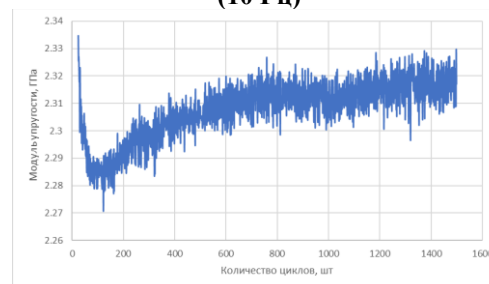


Рис. 7. Модуль упругости при 60-80 кН (15 Гц)



На всех трех графиках наблюдается рост модуля упругости с увеличением количества циклов. Это явление называется циклическим упрочнением (или «разработкой» материала). Материал становится жестче по мере того, как подвергается повторяющимся нагрузкам.

При низкой частоте (5 Гц, рисунок 5) материал показывает отчетливые этапы упрочнения. После ~4400 циклов наблюдается единичный резкий «провал» вниз (до 2.5 ГПа), что может указывать на кратковременную флуктуацию измерений или локальное изменение структуры, после которого материал продолжил упрочняться.

С повышением частоты до 10 Гц система сбора данных работает непрерывно. Большое количество измерений создает «облако» данных. Здесь четко видна динамика приработки: резкое падение на старте (0–200 циклов) вызвано переходными процессами в системе нагружения и релаксацией материала, затем начинается устойчивый логарифмический рост упрочнения.

При частоте 15 Гц график демонстрирует еще более высокую вариативность измерений, что типично для высоких частот (вибрация и инерционные эффекты). Общая тенденция роста сохраняется. Важно отметить: начальное значение модуля (после стабилизации) на 15 Гц (~2.28 ГПа) выше, чем на 10 Гц (~2.22 ГПа). Это может указывать на частотную зависимость упругих свойств материала: при быстром приложении нагрузки (15 Гц) материал ведет себя жестче, так как вязкие компоненты (если шпала полимерная) не успевают релаксировать.

Анализ демпфирующих свойств композитной шпалы, исходя из графиков и физики процесса установил следующее: при циклировании в диапазоне 60–80 кН композитная шпала демонстрирует преимущественно упругое поведение без значительного рассеивания энергии в виде искажения формы колебаний (сигнал чистый синусоидальный); поскольку с ростом числа циклов модуль упругости систематически растет (материал становится жестче), его способность гасить колебания (демпфирование) должна постепенно снижаться; при переходе с 5 Гц на 15 Гц жесткость материала увеличивается, а значит, на высоких частотах демпфирующие свойства композитной шпалы реализуются хуже, чем на низких.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа графиков (динамика деформации во времени и изменение модуля упругости в зависимости от числа циклов при 5, 10 и 15 Гц) можно сформулировать следующие общие выводы по испытаниям композитной шпалы при нагрузках 60–80 кН:

1. Материал демонстрирует циклическое упрочнение. На всех трех частотах (5, 10 и 15 Гц) наблюдается устойчивая тенденция к росту модуля упругости по мере увеличения количества циклов. Это означает, что под воздействием повторяющихся нагрузок в диапазоне 60–80 кН материал становится более жестким и упругим (вероятно, за счет уплотнения структуры и ориентации молекул/волокон).

2. Процесс стабилизируется по мере роста циклов. На всех графиках модуль упругости видно, что начальный этап (0–1000 циклов) сопровождается наибольшей нестабильностью и более крутым ростом. В дальнейшем (после 2000–3000 циклов) рост замедляется, материал переходит в стадию «установившегося упрочнения».

3. Частота нагружения влияет на измеряемый модуль, но не на характер упрочнения. На 5 Гц фиксируется более высокое абсолютное значение модуля упругости (~2.5 ГПа) и дискретный (ступенчатый) характер его изменения. На 10 и 15 Гц абсолютные значения ниже (~2.2–2.3 ГПа), а графики имеют непрерывный, сильно зашумленный вид.

При проведении испытаний на разных частотах необходимо учитывать, что скоростные эффекты (вязкоупругость) могут давать систематическую разницу в абсолютных значениях модуля.

4. Система сбора данных и алгоритм расчета имеют особенности. Графики на 10 и 15 Гц показывают значительный уровень шума («толстая» линия), что характерно для непрерывной регистрации при быстрых циклах. Ступеньки на 5 Гц могут быть связаны с тем, что расчет модуля усредняется за блок циклов, а не выдается в реальном времени.

5. Отсутствие признаков разрушения в рамках испытаний. На всех графиках видно, что после 5000 циклов (или 1500 для 15 Гц) материал продолжает работать в упругой зоне без катастрофического падения модуля упругости (разрушения). Единичные «провалы» на графиках (например, на графике 1) носят локальный характер и не приводят к потере несущей способности.

Испытанные образцы шпал показали высокую циклическую стойкость и способность к упрочнению под нагрузкой 60–80 кН на всех исследованных частотах (5, 10 и 15 Гц). Материал сохраняет свою упругость и жесткость на протяжении 5000 циклов, что свидетельствует о его пригодности для работы в условиях повышенных динамических нагрузок на участках переменной жесткости в предмостовой зоне.

В дальнейшем планируется продолжить испытания до момента усталостного разрушения материала композитной шпалы и определения предела его выносливости.



БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит руководство и сотрудников ООО «АКСИОН РУС» за предоставленные образцы для проведения динамических испытаний.

**ИСПОЛЬЗОВАННАЯ
ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES**

[1] Алтынников Д. С., Ковенькин Д. А. “Анализ деформаций железнодорожного пути на участках подходов к металлическим мостам с безбалластным мостовым полотном на Восточно-Сибирской железной дороге”. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Т. 56, № 4. С. 176-183, 2017

[2] СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализированная редакция СНиП 32-01-95. Москва: Стандартинформ, 2024

[3] Дылев Е. О., Ашпиз Е. С. “Регулирование жёсткости пути на подходе к искусственным сооружениям”. Аспирантские чтения: сборник научных статей аспирантов РУТ (МИИТ) / под общей редакцией Т. В. Шепитько. Выпуск 4. Москва: Перо, С. 79–84, 2021

[4] Cheng Chen, Cheng-lu Zhang, Pei Tai, Lei Zhang, Rui Rui, Optimization of transition section treatments between bridge and regular track using DEM coupled simulation, Transportation Geotechnics, Volume 52, 2025, 101588, ISSN 2214-3912, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101588>.

[5] Дылев Е. О., Ашпиз Е. С. “Регулирование жёсткости пути на подходе к искусственным сооружениям”. Аспирантские чтения: сборник научных статей аспирантов РУТ (МИИТ) / под

общей редакцией Т. В. Шепитько. Выпуск 4. Москва: Перо, С. 79–84, 2021

[6] Путь для переходных участков при высоких осевых нагрузках. По материалам ТТС. Железные дороги мира. 2009, № 2. С.74 - 77

[7] Виноградов В. В., Локтев А. А., Фазилова З. Т. “Математическое моделирование участков переменной жёсткости перед искусственными сооружениями”. Мир Транспорта, том 16, № 3, С. 72–85, 2018.

[8] Ланис А. Л., Усов Д. А., Охременко Е. С. “Зоны жесткости на подходах к мостовым переходам”. Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. № 3. С. 18–27, 2025

[9] Локтев, А. А., Талашкин Г. Н., Степанов К. Д. “Моделирование железнодорожного пути переменной жесткости при динамических воздействиях на верхнее строение”. Транспорт Российской Федерации. № 2–3(63–64). С. 40–44., 2016.

**INFORMATION ABOUT THE
AUTHORS ИНФОРМАЦИЯ ОБ
АВТОРАХ**

**Фазилова
Зулфия**

Российский университет
транспорта, кафедра
«Транспортное
строительство»
E-mail: fazil_1905@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5933-1208>



Assessment of the Operational Reliability of Railway Water Pipelines in Seismically Active Areas

S.T. Djabbarov¹, E.B. Abdualiev¹

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: In this study, the stress-strain state of the railway subgrade and the water pipeline system under seismic and operational loads was assessed based on digital modeling. Calculations were performed using the finite element method based on a three-dimensional model. The research results revealed that soil moisture, embankment height, and pipe wall thickness significantly affect the deformation and reliability of the structure. An increase in soil moisture leads to a decrease in the deformation modulus and an increase in the amount of settlement. Decreasing the pipe wall thickness reduces the rigidity of the structure and does not ensure seismic safety. It has been substantiated that digital modeling methods are an effective tool for assessing the stability of railway infrastructure and developing optimal engineering solutions.

Keywords: Seismic safety, railway track, culvert, digital modeling, finite element method, sustainable engineering, operational reliability

Seysmik Faol Hududlardagi Temir Yo‘l Suv O‘tkazuvchi Quvurlarining Eksploatatsion Ishonchliligini Baholash

Djabbarov S. T.¹, Abdualiyev E.B.¹

¹Toshkent davlat transport universiteti, Tashkent, O‘zbekiston

Annotatsiya: Mazkur tadqiqotda temir yo‘l yer polotnosi va suv o‘tkazuvchi quvurlar tizimining seysmik va eksploatatsion yuklamalar ta‘siridagi kuchlanish-deformatsiya holati raqamli modellashtirish asosida baholandi. Hisoblashlar chekli elementlar usuli yordamida uch o‘lchamli model asosida amalga oshirildi. Tadqiqot natijalari grunt namligi, ko‘tarma balandligi va quvur devori qalinligi konstruksiyaning deformatsiyasi va ishonchliligiga sezilarli ta‘sir ko‘rsatishini aniqladi. Grunt namligining ortishi deformatsiya modulining kamayishiga va cho‘kish miqdorining oshishiga olib keladi. Quvur devori qalinligining kamayishi konstruksiyaning bikirligini kamaytirib, seysmik xavfsizlikni ta‘minlamaydi. Raqamli modellashtirish usullari temir yo‘l infratuzilmasining barqarorligini baholash va optimal muhandislik yechimlarini ishlab chiqishda samarali vosita ekanligi asoslandi.

Kalit so‘zlar: Seysmik xavfsizlik, temir yo‘l yer polotnosi, suv o‘tkazuvchi quvur, raqamli modellashtirish, chekli elementlar usuli, barqaror muhandislik, eksploatatsion ishonchlilik

1. KIRISH

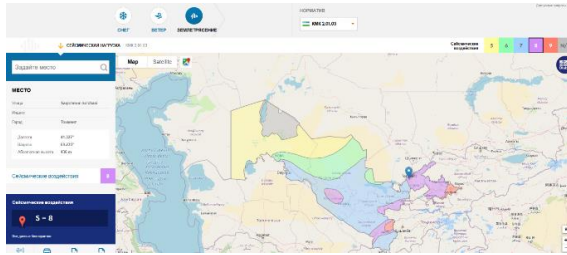
Zamonaviy temir yo‘l infratuzilmasini loyihalashda seysmik xavfsizlikni ta‘minlash, qurilish jarayonlarini raqamlashtirish va barqaror muhandislik yechimlarini qo‘llash muhim ahamiyatga ega. Temir yo‘l yer polotnosi ostida joylashgan suv o‘tkazuvchi quvurlar konstruksiyaning muhim elementlaridan biri bo‘lib, ularning deformatsiyasi temir yo‘l izining umumiy ishonchliligiga bevosita ta‘sir qiladi.

Seysmik faol hududlarda gruntning fizik-mexanik xossalari, namlik darajasi va konstruktiv parametrlarning o‘zgarishi konstruksiyaning kuchlanish va deformatsiya holatini sezilarli darajada o‘zgartiradi. Shu sababli, zamonaviy raqamli modellashtirish usullaridan foydalanish

konstruksiyaning real holatini aniq baholash imkonini beradi.

Ushbu tadqiqotning maqsadi temir yo‘l yer polotnosi va suv o‘tkazuvchi quvurlar tizimining deformatsiyasi va ishonchliligini raqamli modellashtirish asosida baholashdan iborat. Tadqiqot uchastkasi sifatida 8 ballik seysmik xududda[1] joylashgan Toshkent viloyatidagi temir yo‘l linyasi qabul qilingan (1-rasm).





1-rasm. O'zbekiston Respublikasining seysmik rayonlashtirish xaritasi

Tadqiqot yo'nalishi geotexnika, seysmik muhandislik va raqamli modellashtirish texnologiyalari (FEM, BIM) kesishmasida rivojlanib kelmoqda. Jahon va mahalliy ilmiy maktablarda grunt-inshoot o'zaro ta'siri (Soil-Structure Interaction, SSI) hamda temir yo'l inshootlarining seysmik barqarorligini baholash masalalari keng o'rganilgan.

Jahon miqyosida Z.G. Ter-Martirosyan [2] va D.A. Karpenko [3] gruntlarning dinamik xususiyatlari hamda zilzila sharoitida yer polotnosining kuchlanish-deformatsiya holatini chekli elementlar usuli (FEM) asosida modellashtirish bo'yicha fundamental nazariy asoslarni ishlab chiqqanlar. Ularning ishlari dinamik hisoblash algoritmlarini takomillashtirish va noxatolik zonalarini aniqlashda muhim ahamiyat kasb etadi.

Yaponiya olimi K. Ishihara [4] gruntlarning suyuqlanish (liquefaction) hodisasini chuqur o'rganib, uning transport inshootlari, xususan temir yo'l poydevorlariga ta'sir mexanizmlarini aniqlagan. Uning tajriba va empirik modellari zilzila paytida ballast va lyoss gruntlarining mustahkamlik yo'qotish sharoitlarini baholashda keng qo'llaniladi.

N. Kyriazis va G. Gazetas [5] tomonidan yer osti inshootlari, jumladan quvurlar va grunt massivining seysmik to'lqinlar ostidagi kinematik o'zaro ta'siri o'rganilgan. Ular tomonidan taklif etilgan analitik va yarim empirik modellar quvurlarning deformatsiyalanish chegaralarini aniqlash hamda stress kontsentratsiyasini baholashda samarali hisoblanadi.

Temir yo'l izi oralig'i 1520 mm bo'lgan mamlakatlarida temir yo'l yo'nalishida raqamli modellashtirish bo'yicha kuchli ilmiy maktab shakllangan. E.S. Ashpiz [6] temir yo'l yer polotnosining ishonchligini baholash va diagnostika qilish bo'yicha kompleks metodikani ishlab chiqib, raqamli modellarning natijalarini real monitoring ma'lumotlari bilan integratsiyalash tamoyillarini taklif etgan. V.V. Vinogradov [7] esa seysmik hududlarda temir yo'l inshootlarining barqarorligini hisoblash usullarini takomillashtirib, dinamik koeffitsientlarni aniqlash va xavfsizlik zaxirasini baholash metodikasini rivojlantirgan.

O'zbekiston sharoitida, hududning yuqori seysmik faolligi sababli, ushbu masala dolzarb ahamiyatga ega. Akademik T.R. Rashidov [8] tomonidan yer osti inshootlari, ayniqsa quvurlarning seysmodinamikasi bo'yicha ilmiy maktab yaratilgan bo'lib, uning nazariy ishlanmalari zilzila sharoitida quvurlar chidamliligini baholashda metodologik asos vazifasini bajaradi. G.H. Xodjayev [9] temir yo'l yer polotnosining dinamik yuklamalar ostidagi barqarorligi va lyoss gruntlarining fizik-mexanik xususiyatlarini tadqiq qilgan. Sh.M. G'ulomov [10] va boshqa tadqiqotchilar esa raqamli texnologiyalarni joriy etish, shuningdek, TDTU olimlari suv o'tkazuvchi quvurlarning ishonchlik ko'rsatkichlarini matematik modellashtirish orqali baholash yo'nalishida ilmiy ishlar olib bormoqdalar [11,12]. Umuman olganda, mavjud adabiyotlar grunt va inshootlarning alohida yoki integratsiyalashgan holda seysmik tahlilini yoritadi. Biroq temir yo'l ko'tarmasi, ballast qatlami va suv o'tkazuvchi quvurlarning yagona uch o'lchamli dinamik FEM modeli asosida kompleks baholanishi yetarli darajada tizimlashtirilmagan. Mazkur tadqiqot aynan shu bo'shliqni to'ldirishga qaratilgan bo'lib, temir yo'l izi konstruksiyasining ekspluatatsion ishonchligini seysmik sharoitda raqamli modellashtirish orqali baholashni maqsad qiladi.

2. TADQIQOT USULI

Hisoblash modeli. Hisoblash chekli elementlar usuli asosida quyidagi tenglama yordamida amalga oshirildi:

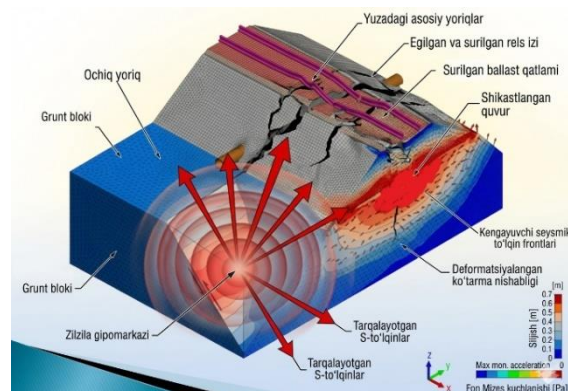
$$[K]\{u\}=\{F\}$$

bu yerda: $[K]$ -konstruksiyaning bikirlik matritsasi;

$\{u\}$ - tugun siljishlari vektori;

$\{F\}$ - yuklanishlar vektori.

Uch o'lchamli model tetraedrik chekli elementlar asosida qurildi. Modelda grunt asosi, ballast qatlami, yer polotnosi va temir-beton quvur va seysmik holat hisobga olindi (2-rasm).



2-rasm. Hisobiy model



Hisoblash parametrlari. Hisoblashda quyidagi parametrlar qabul qilindi:

- ko'tarma balandligi: 2–6 m;
- o'qiy yuklama: 25,5 t/o'q;
- grunt namligi: 18% va 28%;
- quvur devori qalinligi: 0,07–0,10 m;
- grunt deformatsiya moduli: 38–110 MPa.

Grunt materiali Mor-Kulon modeli asosida, quvur materiali esa elastik model asosida modellashtirildi [13].

Natijalar. Grunt namligining ta'siri grunt namligi oshganda deformatsiya moduli sezilarli darajada kamayishini ko'rsatdi. Natijada yer polotnosi va quvur deformatsiyasi ortdi. Maksimal cho'kish qiymati yuqori namlik sharoitida ikki baravargacha ortdi. Suv o'tkazuvchi quvur devori qalinligi $t = 0,10$ m bo'lganda (8 ball seysmikani hisobga olgan holda) 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Suv o'tkazuvchi quvur devorining qalinligi $t = 0,10$ m bo'lganda yer polotnosining cho'kish qiymatlari

Tr/r	Ko'tarma balandligi (H), m	Namlik (W), %	Bosim (q), MPa	Bosim (qsb), MPa	Cho'kish (δ), mm	Cho'kish (δ_{sb}), mm	Ishonchliklik (R), %	Ishonchliklik (Rsb), %
1	2	18	18	18,90	9,9	10,40	97	92,2
2	2	28	30	31,50	22,8	23,94	84	79,8
3	3	18	19	19,95	10,4	10,92	96	91,2
4	3	28	31	32,55	24,3	25,52	83	78,9
5	4	18	20	21,00	10,9	11,45	95	90,3
6	4	28	32	33,60	25,4	26,67	82	77,9
7	5	18	20	21,00	11,5	12,08	94	89,3
8	5	28	33	34,65	27,3	28,67	81	77,0
9	6	18	21	22,05	12,1	12,71	93	88,4
10	6	28	34	35,70	28,7	30,14	80	76,0

Suv o'tkazuvchi quvur devori qalinligi $t = 0,07$ m bo'lganda (8 ball seysmikani hisobga olgan holda)

natijalar ($t = 0,07$ m, 8 ball, $k_s=0,05$) 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval

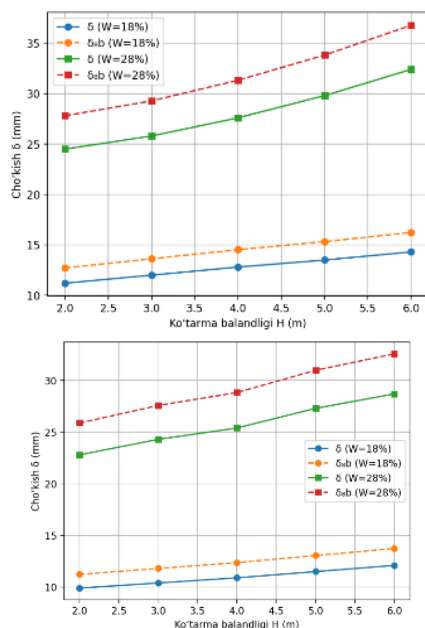
Suv o'tkazuvchi quvur devorining qalinligi $t = 0,07$ m bo'lganda yer polotnosining cho'kish qiymatlari

Tr/r	Ko'tarma balandligi (H), m	Namlik (W), %	Bosim (q), MPa	Bosim (qsb), MPa	Cho'kish (δ), mm	Cho'kish (δ_{sb}), mm	Ishonchliklik (R), %	Ishonchliklik (Rsb), %
1	2	18	18	18,90	11,2	11,76	94	89,3
2	2	28	30	31,50	24,5	25,73	79	75,1
3	3	18	19	19,95	12,0	12,60	93	88,4
4	3	28	31	32,55	25,8	27,09	77	73,2
5	4	18	20	21,00	12,8	13,44	91	86,5
6	4	28	32	33,60	27,6	28,98	76	72,2
7	5	18	20	21,00	13,5	14,18	90	85,5
8	5	28	33	34,65	29,8	31,29	74	70,3
9	6	18	21	22,05	14,3	15,02	88	83,6
10	6	28	34	35,70	32,4	34,02	72	68,4

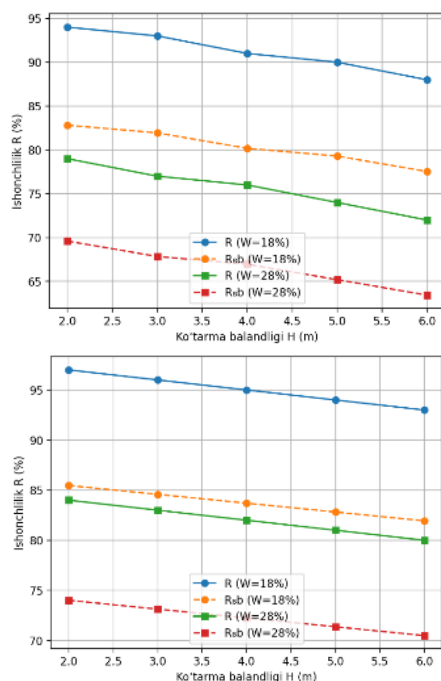


Quvur devori qalinligini 0,10 m dan 0,07 m gachakamayish natijasida:

- cho‘kish miqdori 12–14% ga ortdi;
- konstruktsiya bikirligi kamaydi;
- ishonchlilik koeffitsiyenti kamaydi.



2-rasm. Suv o‘tkazuvchi chegarasida quvur devori qalinligini 0,07 va 0,10m oraliqda 8 ballik sesysmikani inobatga olgan holda temir yo‘l izining cho‘kishi



3-rasm. Suv o‘tkazuvchi chegarasida quvur devori qalinligini 0,07 va 0,10m oraliqda 8 ballik sesysmikani inobatga olgan holda temir yo‘l izining ishonchliyligi

Ko‘tarma balandligining ta’siri. Ko‘tarma balandligi oshishi bilan kuchlanish va deformatsiya qiymatlari ortdi. Eng katta deformatsiya 6 m balandlikda kuzatildi. Maksimal kuchlanish qiymati 10 MPa gacha yetdi.

Muhokama. Natijalar grunt namligi konstruktsiya deformatsiyasiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishini ko‘rsatdi. Namlik ortishi grunt bikirligini kamaytiradi va cho‘kishni oshiradi. Quvur devori qalinligini kamayishi konstruktsiyaning seysmik xavfsizligini kamayadi va deformatsiya ortadi. Raqamli modellashtirish usullari konstruktsiyaning real holatini baholash va optimal loyihaviy yechimlarni ishlab chiqish imkonini beradi.

3. XULOSA

O‘tkazilgan tadqiqot natijalari quyidagicha xulosalar qilish imkonini berdi:

- grunt namligi konstruktsiya ishonchliligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi;
 - quvur devori qalinligini kamayishi konstruktsiya ishonchliligini kamaytirdi;
 - ko‘tarma balandligi deformatsiya va kuchlanishga bevosita ta’sir qiladi;
 - raqamli modellashtirish seysmik xavfsizlikni ta’minlashda samarali vosita hisoblanadi.
- Raqamli modellashtirish usullarini qo‘llash temir yo‘l infratuzilmasining barqarorligini oshirish va seysmik xavfsizlikni ta’minlash imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR / REFERENCES

- [1] ШНК 2.01.20-16. Сейсмик хуудларда транспорт иншоотларини қуриш. https://mc.uz/uploads/mcuz_262886446214.pdf
- [2] Тер-Мартirosян А.З., Тихонюк И.А. Обзор численных методов расчета осадок поверхности грунта при щитовой проходке // Construction and Geotechnics. 2025. Т. 16. № 1. С. 47–81. DOI: 10.15593/2224-9826/2025.1.04.
- [3] Карпенко Д.А. О возможности использования существующих программных комплексов для численного моделирования работы машин и механизмов в лесных грунтах буронабивная свая с расширением в лессовых грунтах, проседающих под действием собственного веса // Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві». Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2008. Том 5. № 1. С. 74–78.
- [4] Ishihara K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Oxford University Press, 1996.
- [5] Kyriazis N., Gazetas G. Seismic Design of Underground Structures and Pipelines // Geotechnique. 2012.



[6] Ашпиз Е.С. Мониторинг земляного полотна при эксплуатации железных дорог. М.: Путь-Пресс, 2002. 112 с.

[7] Виноградов В.В., Локтев А.А., Фазилова З.Т. Математическое моделирование участков переменной жёсткости перед искусственными сооружениями // Мир транспорта. 2018. Т. 16. № 3. С. 72–85.

[8] Рашидов Т.Р., Нишонов Н.А. Колебания подземных полимерных трубопроводов Г-образной конфигурации при сейсмическом воздействии // Современные вопросы устойчивости, пластичности и ползучести в механике деформируемого твердого тела. 2020. С. 75–85.

[9] Ходжаев Г.Х. Динамическая устойчивость железнодорожного земляного полотна и механика лёссовых грунтов. Транспорт, 2010.

[10] G‘ulomov Sh.M. Seysmik Hududlarda Temir Yo‘l Yer Polotnosi Va Sun‘iy Inshootlarning Ishonchliligini Oshirish. Toshkent, 2018.

[11] Djabbarov S.T. The Impact on People and Facilities of Air Flow Caused by High-Speed Train Traffic // Procedia Engineering. Vol. 189. P. 554–559.

[12] Djabbarov S.T. Prospects for Raising Passenger Train Speed on the Reconstructed Section

of the Uzbekistan Railways // Transport Problems. 2016. DOI: 10.20858/tp.2016.11.4.10.

[13] Djabbarov S.T., Abdaliyev E.B. Subsidence of the Railway Track Embankment at the Boundaries of Water Pipelines // Transport Inshootlari: Zamonaviy Texnologiyalar, Seysmik Barqarorlik. <https://engineer.tstu.uz/index.php/engineer-tstu/article/view/278/255>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS/ MUALLIFLAR TO‘G‘RISIDA MA‘LUMOT

Djabbarov Saidburxon To‘laganovich / Saidburkhon Djabbarov Tulaganovich	Toshkent davlat transport universiteti, Texnika fanlari doktori, professor saidhon_inbox.ru Tel: +998901852934
--	--

Abdaliyev Elyorbek Begali o‘g‘li / Elyorbek Abdaliyev Begali ugli	Toshkent davlat transport universiteti E-mail: elyorekaeb@mail.ru Tel: +998998379118
--	--



Modern Principles of Sustainable Bridge Design

S. Salikhanov¹^a

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This paper addresses modern principles of sustainable bridge design developed within the framework of the Sustainable Bridge Design concept. The analysis focuses on four key directions of the sustainable approach: environmental performance, reduction of carbon footprint, life-cycle management, and reuse of materials. Particular attention is paid to the integration of international standards (EN 206, Eurocode, AASHTO) and modern digital tools (BIM, LCA, digital twins) into bridge design, construction, and operation processes. Examples of life cycle assessment (LCA) and calculation of the eco-economic efficiency indicator (K_{exo}) are presented. A methodology for selecting design solutions considering climatic, operational, and socio-economic factors is proposed. The study is based on doctoral research aimed at promoting sustainable development of transport infrastructure in Uzbekistan.

Keywords: Sustainable design, bridge life cycle, carbon footprint, environmental efficiency, material reuse, K_{exo} , LCA, BIM, reinforced concrete bridges

1. INTRODUCTION

Under conditions of global climate challenges and the need for rational use of natural resources, the importance of a sustainable (environmentally oriented) approach to the design of engineering structures, including bridges, is steadily increasing (Fig. 1).

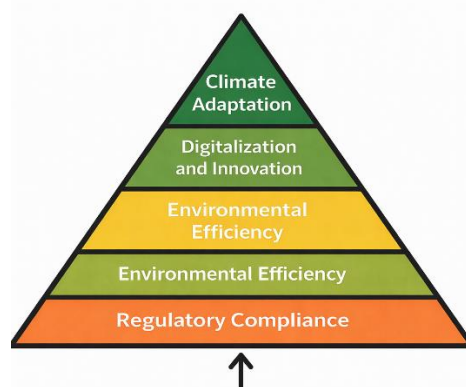


Fig. 1. Modern pyramid of sustainable bridge design

The figure illustrates a four-level methodological framework of modern sustainable bridge design based on principles of environmental responsibility, digital transformation, and climate adaptation.

Regulatory compliance forms the base of the pyramid and includes fulfillment of all applicable construction codes and standards such as SP 35.13330 [11], SP 63.13330 [8], Eurocodes [1],[2],[3],[4], AASHTO [5], and others. This represents the minimum acceptable level of design ensuring structural safety and functionality.

- reduction of CO₂ emissions;

- rational use of construction materials;
- application of LCA (Life Cycle Assessment) and LCC (Life Cycle Costing) principles;
- reduction of energy and water consumption throughout the bridge service life.

Digitalization and innovation involve the implementation of modern technologies to enhance design accuracy and monitoring:

- BIM and digital twins;
- structural health monitoring systems (SHM);
- automation of design solutions.

Climate adaptation, representing the top of the pyramid, reflects the transition to bridges capable of withstanding changing climatic conditions:

- temperature variations, intense precipitation, wind and seismic loads;
- durability of materials under aggressive environmental conditions;
- resilience margins against extreme and catastrophic impacts.

Traditional approaches focused solely on strength and operational characteristics are no longer sufficient for assessing bridge performance over the entire life cycle.

Figure 2 presents six key stages of the bridge life cycle in the form of a closed loop:

- Design – selection of structural system, materials, strength, durability, and environmental assessments;
- Construction – erection processes, technology selection, control of emissions and waste;
- Operation – traffic loads, condition monitoring, routine maintenance;
- Maintenance – scheduled and unscheduled strengthening, repairs, corrosion protection;
- Residual life assessment – diagnostics, inspections, durability forecasting;

^a <https://orcid.org/0000-0002-0883-7257>



- Demolition / reconstruction – dismantling, reuse of materials, recycling, environmental restoration.

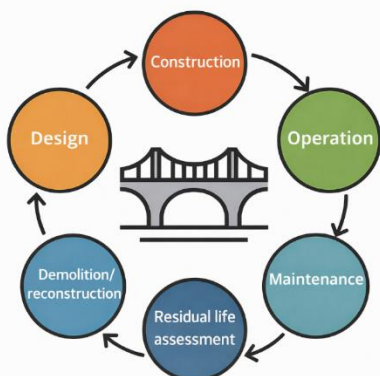


Fig. 2. Bridge life cycle

This diagram emphasizes the necessity of an environmental approach at all stages of the bridge life cycle, from design to demolition. Implementation of this approach enables application of LCA principles and Sustainable Design in bridge engineering.

Modern approaches to sustainable bridge design are based on reducing carbon footprint (CO₂), rational resource use, durability, and minimizing environmental impact throughout all stages—from design to dismantling. According to international standards (EN 206, ISO 14040, AASHTO LRFD), environmental performance is determined not only by energy consumption and emissions but also by the potential for reuse of materials and structures.

This paper presents a generalized approach to sustainable bridge design based on doctoral research, focusing on reinforced concrete structures of high-speed highway viaducts characteristic of Uzbekistan's transport infrastructure [4-7, 12-15].

2. MAIN PART

Methodological essence of the concept

In bridge engineering, sustainable design is interpreted as a decision-making methodology that minimizes total environmental impact while maintaining required levels of reliability, safety, and economic efficiency.

It integrates three fundamental components:

- Durability – the ability of a structure to maintain its performance throughout the design service life under climatic, seismic, and operational effects;
- Environmental performance – minimization of CO₂ emissions, energy consumption, and ecosystem impact;
- Economic performance – reduction of total costs related to construction, operation, and end-of-life stages (Life Cycle Cost, LCC).

Methodologically, these components are combined into an integrated efficiency criterion:

$$K_{\text{eff}} = K_{\text{dur}} \cdot K_{\text{env}} \cdot K_{\text{eco}}$$

where

K_{dur} – durability coefficient characterizing technical reliability;

K_{env} – environmental efficiency coefficient (ecological footprint);

K_{eco} – economic efficiency coefficient.

This approach allows bridge design to be treated as a multi-objective optimization problem, where each alternative is evaluated not only by load-bearing capacity but also by cumulative environmental and economic impacts.

2.2. Principles of sustainable bridge design

The sustainable design methodology includes a system of interrelated principles reflecting current scientific and regulatory trends (Table 1).

Table 1

Principles of sustainable bridge design

No.	Principle	Description
1	Life cycle thinking	Assessment of resource, cost, and environmental impact throughout the entire bridge life cycle
2	Low carbon design	Reduction of CO ₂ emissions through optimized cement and steel production, use of RCA, slags, silica fume
3	Resource efficiency and reuse	Application of secondary materials, prefabricated and modular systems suitable for dismantling and recycling
4	Environmental compatibility of materials	Use of low-clinker concretes, stainless or composite reinforcement, environmentally safe coatings
5	Smart design	Use of BIM and digital twins for life-cycle management, degradation forecasting, and maintenance optimization
6	Climate adaptation	Consideration of rising temperatures, humidity changes, aggressive precipitation, and wind loads

These principles form the basis of a new engineering philosophy in which a bridge is viewed as a “living system” operating within a dynamic natural environment.



Quantitative assessment of environmental efficiency

Key tools of sustainable bridge design include Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC), providing quantitative evaluation of cumulative impacts and costs over the service life.

Environmental efficiency can be formally expressed as:

$$K_{\text{env}} = \frac{CO_{2,\text{base}}}{CO_{2,\text{proj}}}$$

where $CO_{2,\text{proj}}$ represents specific CO₂ emissions of the designed solution, and $CO_{2,\text{base}}$ corresponds to a conventional reference solution.

Lower values of $CO_{2,\text{proj}}$ indicate higher environmental efficiency.

In international practice, carbon footprint values for concrete range from 0.12–0.35 kg CO₂/kg, and for reinforcement steel from 1.8–2.1 kg CO₂/kg. For reinforced concrete bridges with optimized concrete composition and recycled materials, emission reductions of 25–30% are achievable.

Integration of environmental and engineering aspects

Methodologically, Sustainable Bridge Design integrates theoretical, analytical, and economic assessments into a unified system.

Environmental performance is not treated as an additional criterion but as an integral part of the design algorithm. A solution is considered optimal only when:

$$\max K_{\text{eff}} = f(K_{\text{dur}} \cdot K_{\text{env}} \cdot K_{\text{eco}})$$

This relationship enables multi-factor analysis of design alternatives, where durability, environmental safety, and economic efficiency are treated as equally important objectives.

Relevance for Uzbekistan

Given Uzbekistan's climatic and operational conditions—hot climate, seismicity, humidity variations, and use of de-icing salts—the application of sustainable design principles is particularly important [9].

Key priority directions include:

- optimization of concrete composition and use of recycled aggregates;
- protection of reinforced concrete elements against carbonation and corrosion;
- reduction of energy consumption in construction material production;
- transition to digital life-cycle modeling of bridges (BIM + LCA).

Thus, sustainable bridge design becomes not an optional trend but a mandatory element of modern reinforced concrete bridge engineering, ensuring durability [10, 12–15], resilience, and socio-economic efficiency of transport systems.

3. CONCLUSION

Sustainable bridge design represents a key element of transport infrastructure development. Application of Sustainable Bridge Design principles makes it possible not only to reduce environmental impact but also to ensure durability, investment efficiency, and operational reliability. Integrated use of digital technologies, analytical models, and eco-economic indicators enables informed decision-making at early design stages. The methodology developed within the doctoral research framework can be successfully adapted for Uzbekistan and other regions with harsh climates, high traffic intensity, and the need to modernize aging infrastructure.

REFERENCES

- [1] EN 206:2023, *Concrete – Specification, performance, production and conformity*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2023.
- [2] EN 1990:2002 + A1:2005, *Eurocode – Basis of structural design*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2005.
- [3] EN 1991-1-1:2002, *Eurocode 1 – Actions on structures. Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2002.
- [4] EN 1992-1-1:2004, *Eurocode 2 – Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2004.
- [5] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
- [6] FIB Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne: Fédération Internationale du Béton (FIB), 2013.
- [7] ISO 15686-1:2022, *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles*. Geneva: International Organization for Standardization, 2022.
- [8] SP 35.13330.2011, *Bridges and culverts*. Moscow: Ministry of Regional Development of the Russian Federation, 2011.
- [9] SHNK 2.05.03-22, *Bridges and culverts. Design standards*. Tashkent: State Committee for Architecture and Construction of the Republic of Uzbekistan, 2022.
- [10] V. Yu. Vasiliev and A. A. Kiselev, *Durability of reinforced concrete structures of transport facilities*. Moscow: Transport Publ., 2018.
- [11] SP 63.13330.2018, *Concrete and reinforced concrete structures. General provisions*. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation, 2018.



[12] Saidkhon Salikhanov, Fakhridin Zokirov; Studying possibilities of joint operation of main beam and protective layer constructions. AIP Conf. Proc. 15 July 2025; 3256 (1): 030029. <https://doi.org/10.1063/5.0266815>

[13] Determination of deformations and self-stress in concrete on stress cement // Saidkhan Salikhanov, Zulfiya Pulatova, Fakhridin Zakirov, Ziyavuddin Rahimjonov and Abdurahim Abdullayev // E3S Web Conf., 264 (2021) 02056, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126402056>

[14] Ulugbek Shermukhammedov, Guldora Mustaeva, Fakhridin Zokirov, Lintang Dian Artanti, Anora Karimova, Ma'mura Sobirova; Model of evaluating the economic efficiency of resource selection in the repair of transport infrastructure. AIP Conf. Proc. 7 October 2025; 3377 (1): 020006. <https://doi.org/10.1063/5.0299541>

[15] The effect of increasing loads on foundations of operating bridges // S. S. Salixanov, F. Z. Zokirov, Y. T. Xakimova and G. B. Ismailova // E3S Web of Conf., 401 (2023) 01080, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340101080>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Salikhanov Saidkhan Salikhanovich Tashkent State Transport University, Department of "Bridges and Tunnels," Candidate of Technical Sciences, Professor
E-mail: saidxon_s@tstu.uz
Tel.: +998 95 957 19 51
<https://orcid.org/0000-0003-3691-1079>



Methodological Framework for Assessing Durability and Reliability of Reinforced Concrete Bridge Structures

S. Salikhanov¹^a, J. Zokirov¹

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This paper addresses methodological issues related to the assessment of durability and reliability of reinforced concrete bridge structures throughout their service life. The study examines conventional deterministic design approaches alongside contemporary international standards, including EN 206, AASHTO LRFD, FIB Model Code 2010, and ISO 15686. Particular attention is paid to service life design principles and to the role of material degradation models in the prediction of long-term structural performance. From an engineering standpoint, it is shown that the exclusive use of deterministic methods does not adequately reflect time-dependent deterioration processes. To overcome this limitation, a multi-level assessment methodology is proposed, integrating deterministic, semi-probabilistic, and probabilistic approaches for evaluating structural reliability and residual service life under environmental exposure.

Keywords: Service life design, durability, reliability, reinforced concrete bridges, degradation modeling, environmental exposure, probabilistic assessment

1. INTRODUCTION

From the author's engineering experience, durability-related failures of bridge structures are most often associated not with insufficient strength, but with underestimated environmental degradation mechanisms.

Modern research in the field of reinforced concrete bridge design considers durability as a multi-level performance characteristic that defines the ability of a structure to maintain its functional and safety properties throughout the intended service life under the combined effects of environmental, operational, and anthropogenic factors [2], [4], [10]. In this context, durability is no longer treated as a secondary consequence of strength reserves, but rather as a governing design parameter influencing structural performance over time.

From a methodological perspective, durability should not be associated with individual empirical coefficients or isolated verification checks. Instead, it is more appropriately represented by an integrated system of models that jointly account for mechanical behavior, physicochemical degradation processes, and environmental exposure within a unified framework for service life assessment (Fig. 1).

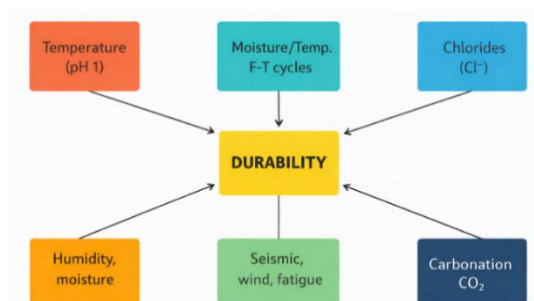


Fig. 1. Diagram of the influence of climatic and anthropogenic factors on durability

The methodology for assessing the durability and reliability of reinforced concrete bridges developed in this study integrates the following interrelated approaches:

Durability assessment methodology $R(t)$, addressing the time-dependent degradation of concrete and reinforcement, including concrete strength reduction, carbonation, reinforcement corrosion, chloride diffusion, and the associated loss of cross-sectional area and elastic modulus. This methodology is based on the regulatory framework of EN 206, Eurocode EN 1992, and SP 63.13330.2018 and aims to answer the question: “How long can the structure retain its performance characteristics?”

Reliability assessment methodology $S(t)$, focusing on limit states, reliability factors γ , probabilistic characteristics of loads and resistances, and the probability of failure over time. This approach relies on EN 1990, AASHTO LRFD, and GOST 27751-2014 and addresses the question: “What is the probability of failure-free structural performance throughout the service life?”

^a <https://orcid.org/0000-0002-0883-7257>



Life Cycle Cost (LCC) methodology, which considers initial construction costs, operational expenses, maintenance and strengthening measures, as well as reconstruction and end-of-life processes. This methodology is based on life-cycle economic models and LCC/LCA principles and answers the question: “What is the total cost of the structure over its entire service life?”

Environmental efficiency assessment methodology $\Delta CO_2, K_{eco}$, addressing greenhouse gas emissions, material intensity, recycling potential, and resource efficiency within the framework of sustainable design principles and life-cycle environmental indicators. This methodology aims to answer the question: “To what extent is the design solution environmentally justified?”

By integrating these approaches, the proposed methodology for assessing the durability and reliability of reinforced concrete bridges is based on the combined application of four interconnected components: durability assessment $R(t)$, reliability assessment $S(t)$, life cycle cost evaluation (LCC), and environmental performance assessment $\Delta CO_2, K_{eco}$. Their joint application provides a comprehensive engineering, economic, and environmental justification for design decisions (Fig. 2).

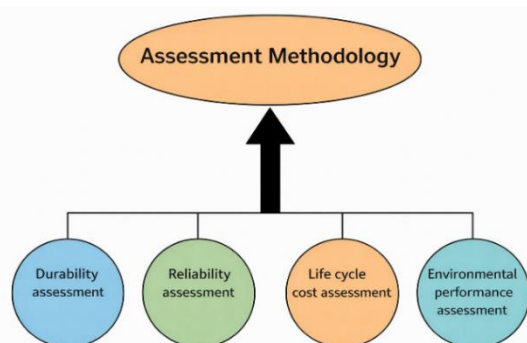


Fig. 2. Methodology for assessing the durability and reliability of reinforced concrete bridges
Classical approaches to durability assessment

Historically, durability considerations in bridge design were incorporated indirectly through safety factors and strength reserves. In national standards such as SHNK 2.05.03-22 [9] and Russian regulations including SNiP 2.05.03-84, SP 35.13330.2011, and SP 63.13330.2018 [8], durability was primarily associated with parameters such as concrete cover thickness, water resistance grade, frost resistance, and reinforcement type. This approach was essentially deterministic, with environmental conditions assumed to be constant and time-invariant.

While such design practices ensured compliance with safety requirements, they did not allow for a realistic prediction of the actual service life of bridge structures. In practical applications, this limitation often resulted in the need for repairs and strengthening measures well before the intended design life was

reached, particularly in aggressive environments such as areas exposed to de-icing chemicals, coastal regions, and zones characterized by high temperatures and intense solar radiation.

2. MAIN PART

Regulatory framework for durability and reliability assessment

The assessment of durability and reliability of reinforced concrete bridges cannot be performed without reference to existing regulatory frameworks. European standards, such as EN 206 (Concrete – Specification, performance, production and conformity), establish fundamental requirements for concrete taking into account environmental exposure, strength, and serviceability [1]. Within bridge design practice in the European Union, Eurocode provisions play a central role, particularly EN 1990 (basis of structural design), EN 1991 (actions on structures), and EN 1992 (design of concrete structures). These documents enable the consideration of both structural safety and service life performance within a unified design framework [2]–[4].

The American approach is represented by the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, where structural reliability is assessed using probabilistic concepts based on limit state design principles [5]. In the post-Soviet regulatory space, SP 63.13330 governs the design and analysis of reinforced and prestressed concrete structures, addressing requirements related to durability, deformations, strength, and stiffness [11].

Contemporary concepts and international standards

International standards and guidelines, including FIB Model Code 2010, EN 206, ISO 15686, and AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, have introduced a fundamentally new methodological paradigm known as Service Life Design. Within this framework, durability is treated as a design parameter equivalent in importance to strength and stability [1, 6, 11-15].

The key principles of this concept include:

- definition of the required design service life T_{design} depending on the structural category (typically 50, 75, or 100 years);
- identification of degradation stages:
 - initiation stage (penetration of CO_2 , chlorides, and moisture);
 - propagation stage associated with progressive reinforcement corrosion;
 - ultimate limit state stage;
- evaluation of degradation parameters, such as diffusion coefficients, concrete cover thickness, and environmental aggressiveness;
- calibration of degradation models using inspection, monitoring, and diagnostic data.



According to ISO 15686-1 (2011, 2022) [7], durability is defined as “the ability of a component to perform its required functions over a specified period of time without unacceptable degradation of performance”. Consequently, durability becomes an explicit function of time and exposure conditions, forming the basis of modern service life-oriented design methodologies.

It should be emphasized that the presented standards differ not only formally, but also conceptually in their treatment of time-dependent degradation.

Integration of durability and reliability

The reliability of bridge structures is defined as the probability that a structure will maintain its load-bearing capacity and functional performance throughout the specified service life. From a methodological standpoint, the relationship between durability and reliability may be expressed as:

$$P_{\text{surv}}(t) = e^{-\lambda(t)},$$

where $P_{\text{surv}}(t)$ is the probability of failure-free performance and $\lambda(t)$ represents the degradation intensity as a function of environmental exposure and material properties.

In this context, durability can be interpreted as a time-integrated reliability indicator:

$$K_{\text{dur}}(t) = \frac{R_t}{R_0} = e^{-at},$$

where R_t is the residual load-bearing capacity at time t , and R_0 is the initial capacity. This formulation enables the use of probabilistic time-dependent models that link limit state design with environmental degradation mechanisms.

Service life prediction methodologies

Within the methodological framework for durability assessment of bridge structures, three principal approaches are commonly applied:

(Service Life Design)	fatigue, and limit state exceedance	adopted in FIB and Eurocode
-----------------------	-------------------------------------	-----------------------------

Service life design methodology integrates these approaches: semi-probabilistic analysis is typically applied at early design stages, while detailed probabilistic models are used for refined assessments and optimization.

Conceptual framework of durability-oriented design

In a generalized form, durability-oriented bridge design may be represented as a sequence of five key stages:

- classification of environmental exposure conditions (according to EN 206 and SHNK 2.05.03-22);
- specification of the design service life T_{design} ;
- time-dependent modeling of material degradation $E(t)$, $R(t)$, and K_{dur} ;
- evaluation of failure probability $P_f(t)$ and identification of governing limit states;
- optimization of design solutions with respect to durability, environmental performance, and economic efficiency.

Within this framework, durability emerges as a governing criterion of structural reliability, while reliability assessment becomes a quantitative tool for evaluating environmental impacts on long-term structural performance. This integrated approach constitutes the methodological basis for incorporating environmental effects into the design of reinforced concrete bridges.

In practical bridge design, the selection of an appropriate methodological level largely depends on data availability and the expected aggressiveness of the operating environment.

3. CONCLUSIONS

The conclusions of this study are based on a combination of regulatory analysis and engineering generalization of long-term bridge operation practices.

The systematization of methodological approaches to assessing the durability and reliability of reinforced concrete bridges presented in this paper allows several important conclusions to be drawn, which are relevant for both the scientific community and engineering practice.

First, the analysis of regulatory documents, including EN 206, Eurocodes (EN 1990–1992), AASHTO LRFD, SP 63.13330, FIB Model Code 2010 [6], and ISO 15686 [7, 13], demonstrates a clear international trend toward the transition from formal normative design to service life-oriented design methodologies. Unlike traditional deterministic approaches based on strength reserves and fixed design parameters (such as concrete cover thickness or frost resistance class), contemporary design concepts

Table 1

Main methodological approaches to the assessment of bridge durability

Approach	Description	Advantages
Deterministic	Use of normative environmental coefficients, water resistance and frost resistance grades	Simplicity, regulatory compatibility
Semi-probabilistic	Resource estimation using empirical relationships $R(t) = R_0 e^{-at}$ accounting for exposure category	Applicable in engineering practice, enables service life estimation
Probabilistic time-dependent	Modeling of diffusion, carbonation,	Highest accuracy and flexibility;



require explicit consideration of time-dependent material degradation and the integration of environmental effects into structural assessment models [12, 15].

Second, a key outcome of this study is the justification for adopting a multi-level methodological framework that includes:

- a deterministic level, ensuring compliance with existing regulatory requirements;
- a semi-probabilistic level, based on empirical relationships and engineering judgment;
- a probabilistic time-dependent level, incorporating models of carbonation, reinforcement corrosion, and fatigue degradation within the framework of limit states and failure probability analysis.

The integration of these levels provides a robust basis for predicting the residual service life of bridge structures and enables more substantiated engineering decisions during the design process.

Third, the results highlight the necessity of further harmonization between national regulations and international standards, particularly with respect to:

- classification of environmental exposure conditions (in accordance with EN 206 and ISO 15686);
- service life prediction using approaches adopted in FIB and Eurocode frameworks;
- implementation of diagnostics and Structural Health Monitoring (SHM) as an integral component of both design and operational management strategies.
- Overall, the proposed methodology makes it possible to:
 - improve the accuracy of service life assessment for reinforced concrete bridges;
 - enhance the efficiency of maintenance and rehabilitation planning;
 - substantiate design decisions at both conceptual and detailed design stages;
 - increase the adaptability of bridge structures to climatic variability and anthropogenic impacts.

Under conditions of increasing operational demands, economic constraints, and stricter sustainability requirements for infrastructure development, the development and implementation of integrated durability and reliability models should be regarded as a priority task for transport construction in Uzbekistan and other regions characterized by severe climatic conditions.

REFERENCES

[1] EN 206:2023, *Concrete – Specification, performance, production and conformity*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2023.

[2] EN 1990:2002 + A1:2005, *Eurocode – Basis of structural design*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2005.

[3] EN 1991-1-1:2002, *Eurocode 1 – Actions on structures. Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2002.

[4] EN 1992-1-1:2004, *Eurocode 2 – Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2004.

[5] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.

[6] FIB Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne: Fédération Internationale du Béton (FIB), 2013.

[7] ISO 15686-1:2022, *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles*. Geneva: International Organization for Standardization, 2022.

[8] SP 35.13330.2011, *Bridges and culverts*. Moscow: Ministry of Regional Development of the Russian Federation, 2011.

[9] SHNK 2.05.03-22, *Bridges and culverts. Design standards*. Tashkent: State Committee for Architecture and Construction of the Republic of Uzbekistan, 2022.

[10] V. Yu. Vasiliev and A. A. Kiselev, *Durability of reinforced concrete structures of transport facilities*. Moscow: Transport Publ., 2018.

[11] SP 63.13330.2018, *Concrete and reinforced concrete structures. General provisions*. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation, 2018.

[12] Saidkhon Salikhanov, Fakhridin Zokirov; Studying possibilities of joint operation of main beam and protective layer constructions. AIP Conf. Proc. 15 July 2025; 3256 (1): 030029. <https://doi.org/10.1063/5.0266815>

[13] Determination of deformations and self-stress in concrete on stress cement // Saidkhan Salikhanov, Zulfiya Pulatova, Fakhridin Zokirov, Ziyavuddin Rahimjonov and Abdurahim Abdullayev // E3S Web Conf., 264 (2021) 02056, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126402056>

[14] Ulugbek Shermukhammadov, Guldora Mustaeva, Fakhridin Zokirov, Lintang Dian Artanti, Anora Karimova, Ma'mura Sobirova; Model of evaluating the economic efficiency of resource selection in the repair of transport infrastructure. AIP Conf. Proc. 7 October 2025; 3377 (1): 020006. <https://doi.org/10.1063/5.0299541>

[15] The effect of increasing loads on foundations of operating bridges // S. S. Salixanov, F. Z. Zokirov, Y. T. Xakimova and G. B. Ismailova // E3S Web of



Conf., 401 (2023) 01080, DOI:
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340101080>


INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saidkhan Salikhanov Salikhanovich Tashkent State Transport University, Department of "Bridges and Tunnels," Candidate of Technical Sciences, Professor,
E-mail: saidxon_s@tstu.uz
Tel.: +998 95 957 19 51
<https://orcid.org/0000-0003-3691-1079>

Javlon Zokirov Jumanazar ugli Tashkent State Transport University, Department of "Bridges and Tunnels," intern researcher
E-mail:
avlonzokirov1010@gmail.com
Tel.: +998 93 978 75 99



Methods for Calculating Retaining Walls Composed of Modern Prefabricated Elements and Their Stability Conditions

M.Kh. Miralimov¹^a, Kh.U. Urazov¹^b, Z.K. Rakhimjonov¹^c, K.M. Juraev¹^d

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This article discusses the design principles, calculation methods, and stability conditions of reinforced retaining walls composed of modern prefabricated elements. The study analyzes the main loads acting on retaining walls, soil pressure, the working principles of reinforcing elements, and their influence on the structural strength of the system. In addition, the overall stability conditions of the wall, including overturning, sliding, and foundation stability, are evaluated based on engineering calculations. The technical and economic advantages of using modern prefabricated elements, as well as their role in accelerating construction processes, are also considered. The article presents the practical application of retaining walls reinforced with geosynthetic materials and metal reinforcements, together with the standard design approaches used in their calculation. The obtained results are important for ensuring the reliability and long-term serviceability of reinforced retaining walls used in highways, railways, and other transport infrastructure facilities.

Keywords: Reinforced retaining wall, prefabricated elements, soil pressure, stability conditions, geosynthetic materials, strength analysis, sliding, overturning, foundation stability, engineering structures, deformation, reinforced soil, geotechnics, structural solutions, load effects

Zamonaviy Yig'ma Elementlardan Iborat Tirgak Devorlarni Hisoblash Usullari va Barqarorlik Shartlari

Miralimov M.X.¹^a, O'razov O'.X.¹^b, Rahimjonov Z.Q.¹^c, Juraev.Q.M.¹^d

¹Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent, O'zbekiston

Annotatsiya: Ushbu maqolada zamonaviy yig'ma elementlardan tashkil topgan armaturalangan tirgak devorlarning konstruktiv xususiyatlari, ularni loyihalash va hisoblash usullari hamda barqarorlik shartlari yoritilgan. Tadqiqot davomida tirgak devorlarga ta'sir etuvchi asosiy yuklamalar, grunt bosimi, armaturalovchi elementlarning ishlash prinsipi va ularning konstruksiya mustahkamligiga ta'siri tahlil qilingan. Shuningdek, devorning ag'darilish, sirpanish va poydevor bo'yicha umumiy barqarorlik holatlari muhandislik hisoblari asosida baholangan. Zamonaviy yig'ma elementlardan foydalanishning iqtisodiy va texnik afzalliklari, qurilish jarayonini tezlashtirishdagi o'rni ham ko'rib chiqilgan. Maqolada geosintetik materiallar va metall armaturalardan foydalanilgan tirgak devorlarning amaliy qo'llanishi hamda ularni hisoblashda qo'llaniladigan me'yoriy yondashuvlar keltirilgan. Olingan natijalar avtomobil yo'llari, temir yo'llar va boshqa transport inshootlarida qo'llaniladigan armaturalangan tirgak devorlarning ishonchliligi va uzoq muddatli xizmat qilishini ta'minlashda muhim ahamiyat kasb etadi.

Kalit so'zlar: Armaturalangan tirgak devor, yig'ma elementlar, grunt bosimi, barqarorlik shartlari, geosintetik materiallar, mustahkamlik hisobi, sirpanish, ag'darilish, poydevor barqarorligi, muhandislik inshootlari, deformatsiya, armaturalangan grunt, geotexnika, konstruktiv yechimlar, yuklama ta'siri


1. KIRISH

Hozirgi kunda avtomobil va temir yo'l transport infratuzilmasining jadal rivojlanishi murakkab geologik sharoitlarda ishonchli va iqtisodiy jihatdan samarali muhandislik inshootlarini barpo etishni talab qilmoqda. Bunday inshootlar tarkibida tirgak devorlar alohida ahamiyatga ega bo'lib, ular grunt massasining barqarorligini ta'minlash, ko'chki va surilish hodisalarining oldini olish hamda yo'l poyi mustahkamligini oshirish vazifalarini bajaradi.


An'anaviy monolit tirgak devorlar bilan bir qatorda, zamonaviy yig'ma elementlardan tashkil topgan armaturalangan tirgak devorlar keng qo'llanilmoqda.

Shu bilan birga, armaturalangan tirgak devorlarni loyihalashda grunt bosimi, tashqi yuklamalar, armaturalovchi elementlarning ishlash mexanizmi va konstruksiyaning ag'darilish, sirpanish hamda deformatsiyaga qarshi barqarorligini aniq hisoblash muhim masalalardan biri hisoblanadi. Zamonaviy hisoblash usullarini qo'llash konstruksiyaning ishonchliligi va uzoq muddat xizmat qilishini

^a <https://orcid.org/0000-0003-2530-5516>

^b <https://orcid.org/0000-0003-3594-5170>

^c <https://orcid.org/0000-0002-7898-077X>

^d <https://orcid.org/0000-0002-0883-7257>



ta'minlaydi. Mazkur maqolaning maqsadi zamonaviy yig'ma elementlardan iborat armaturalangan tirgak devorlarni hisoblash usullarini o'rganish, ularning barqarorlik shartlarini tahlil qilish hamda amaliy qo'llash imkoniyatlarini yoritishdan iborat. Tadqiqot natijalari transport va geotexnik inshootlarni loyihalashda samarali konstruktiv yechimlarni tanlashga xizmat qiladi.[1]

2. TADQIQOT METODIKSI

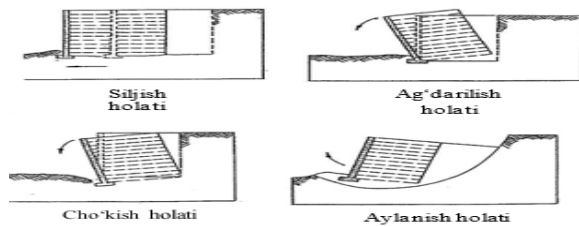
Hozirgi kunda respublikamizda ko'priksizlik sohasida ko'plab yangi turdagi metod va usullardan foydalangan holda ko'priklarning elementlarini mustahkamlikka va chidamlilikka hisoblashmoqda shu jumladan ushbu ishda ham yangi turdagi zamonaviy yig'ma elementlardan iborat tirkama devorlarning ustuvorligini hisoblashda amal qiladigan shartlar va ketma-ketlik qoidalari keltirilgan.

Tasma armaturali tirgak devorlarini hisoblashda eng birinchi dastlabki loyiha tuziladi. Dastlabki loyihalashda armatura kesimi va umumiy armaturalar soni hisoblangandan so'ng inshootning barqarorligi tekshiriladi. Tasma armaturali tirgak devorining barqarorligi tashqi va ichki barqarorlik sifatida ikki bosqichda hisoblanadi.

Tashqi barqarorlik

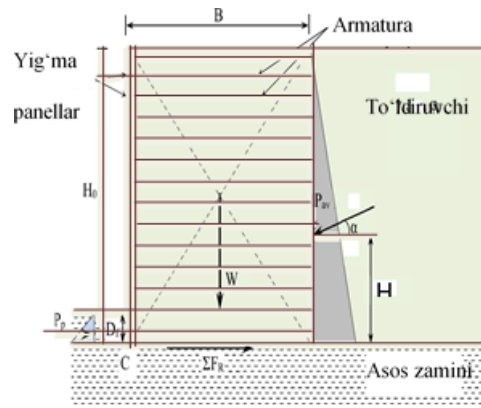
Tasma armaturali tirgak devorining tashqi barqarorligini hisoblashda yig'ma panellarning og'irligini hisobga olmasdan, tizim og'irlik devori kabi ishlaydi deb hisoblanadi. Ushbu taxminga ko'ra quyidagi tekshiruvlar amalga oshiriladi (1-rasm).

- Asosdan siljish tekshiruvi
- Ag'darilish tekshiruvi
- Ko'tarish qobiliyati tekshiruvi
- Umumiy yemirilish tekshiruvi



1-rasm: Tashqi barqarorlik tekshiruvlari (TS 7994)

Agar yig'ma elementlardan iborat tirgak devor inshootni og'irlik devori deb hisoblasak, bu inshootga ta'sir qiladigan tashqi kuchlar: aktiv grunt bosimi (P_a), passiv grunt qarshiligi (P_p) va devor og'irligi (P_w) hisoblanadi (2-rasm). [2-3]



2-rasm: Tasma armaturali devorga ta'sir qiluvchi tashqi kuchlar

3. MUHOKAMA VA NATIJALAR

H_0 balandlikdagi devorga ta'sir qiluvchi umumiy yon kuch yon bosimning balandlik bo'ylab (H_0) integrallash orqali aniqlanadi. Shunday qilib, devorga ta'sir etuvchi umumiy aktiv bosim (P_a) va umumiy passiv bosim (P_p) quyidagi tenglamalar bilan aniqlanadi (TS 7994).

$$P_a = \int_0^{H_0} K_a \gamma_1' z = \frac{1}{2} K_a \gamma' H_0^2 \quad (1)$$

$$P_p = \int_0^{H_0} K_p \gamma_1' z = \frac{1}{2} K_p \gamma' H_0^2 \quad (2)$$

Bu yerda γ_1' - to'ldiruvchining birlik hajmiy og'irligi, K_a - aktiv gruntning yon devorga bosimi koeffitsiyenti va K_p - passiv gruntning yon devorga bosimi koeffitsiyentidir.

Ushbu yon kuchlar (P_a va P_p) yon grunt bosimining taqsimlanish diagrammasining markazida ta'sir qiladi. Boshqacha aytganda, bu kuchlar ta'sir qiladigan daraja diagramma asosidan boshlab $D/3$ ga teng. Agar yer osti suvlari mavjud bo'lsa, yer osti suvidan kelib chiqqan suv kuchini ham yon devor kuchlariga qo'shish kerak.

Bir nuqtadagi suv bosimi (u):

$u = h_w z'$. Devorga ta'sir qiluvchi umumiy suv kuchi ham suv bosimining suv ta'sir qiladigan chuqurlik bo'ylab integrallash orqali olinadi (TS 7994).

$$P_w = \int_0^{h_w} \gamma_w z = \frac{1}{2} \gamma_w h_w^2 \quad (3)$$

Agar yuzaga bir tekis q kuchlanishi qo'llanilgan bo'lsa, bu kuchlanishdan kelib chiqadigan bir tekis yon kuchlanish, faol yoki passiv yon tuproq bosimi koeffitsiyenti bilan ko'paytmasiga teng bo'ladi (TS 7994):

$$q_{s-a} = K_a q_s \quad (4)$$

$$q_{s-p} = K_p q_s \quad (5)$$

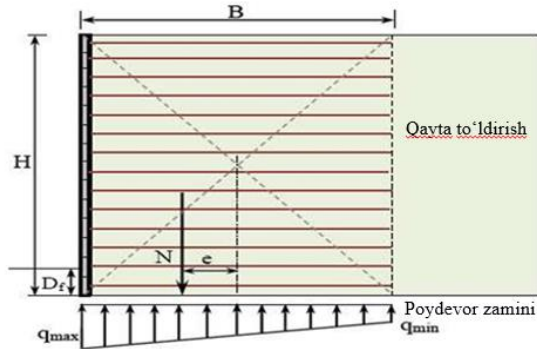
Yuza yuklanishidan devorga ta'sir etuvchi umumiy aktiv va passiv kuchlar esa quyidagi tenglamalar bilan aniqlanadi (TS 7994):



kuchlanishlari paydo bo'lishining oldini olish kerak. $e \leq B/6$ (31-rasm) holatida asos bosimi (TS 7994);

$$q_{min}^{max} = \frac{\Sigma V}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) \quad (18)$$

Yuk ko'tarish qobiliyatini nazorat qilishda q_{max} tekshiriladi, maksimal asos bosimi poydevorning yuk ko'tarish qobiliyatidan oshmasligi kerak.



5-rasm: Ekssentrik yuklangan tasma bilan mustahkamlangan tuproq armaturali tayanch devori ostida asos bosimining taqsimlanishi.

Agar yig'ma panellardan iborat tirgak devori lenta(tasmasimon) poydevor sifatida qaralsa, uning yakuniy(chegaraviy) ko'tarish qobiliyatini Karl va Terzagi tomonidan taklif etilgan ko'tarish qobiliyati formulasi (19) bo'yicha aniqlash mumkin.

$$q_u = cN_c + D_f \gamma_1 N_q + 0.5 B \gamma_2 N_\gamma \quad (19)$$

Bu yerda: c - devor ostidagi tuproqning bog'lanish koeffitsienti, B devor asosining kengligi (po'lat armatura uzunligi), D_f - poydevor chuqurligi, N_c , N_q va N_γ - poydevor gruntining ichki ishqalanish burchagiga (φ) bog'liq ko'tarish qobiliyati omillari.

Ko'tarish qobiliyati xavfsizlik koeffitsienti (TS 7994):

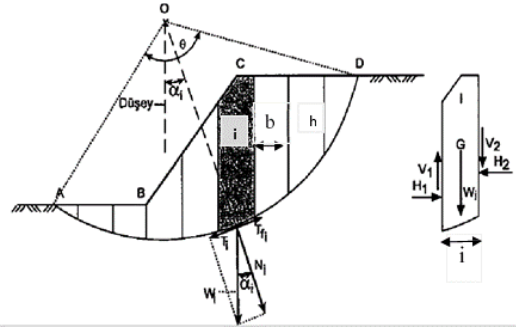
$$G_s\text{-ko'tarish qobiliyati} = \frac{q_u}{q_{max}} \geq 3 \quad (20)$$

ta'minlanishi zarur.

Yuk ko'tarish qobiliyatini tekshirish

Tasma bilan mustahkamlangan armaturali tirgak devori uchun barcha tekshiruvlar o'tkazilganda, garchi xavfsizlik koeffitsientlari kerakli qiymatlarda ta'minlangan bo'lsa-da, ko'p hollarda qazish natijasida yuzaga kelgan o'zgarishlar devor o'rnatilgan hududda tuproqning muvozanatini yo'qotib, devor bilan birga buzilish ehtimolini oshiradi. Shuning uchun umumiy buzilish tekshiruvini o'tkazish talab etiladi. Turg'unlik tahlili Shvetsiya bo'laklar usuli bilan amalga oshirilishi mumkin.

Shvetsiya bo'laklar usulida ABCDA maydoni vertikal bo'laklarga bo'linadi (32-rasm). Bo'lakning yon tomonlariga ta'sir etuvchi kuchlar bir-birini muvozanatlaydi deb hisoblanadi. Ixtiyoriy (i) bo'lakning og'irligi (W_i) bo'lak asosida, normal (N_i) va urinma (T_i) yo'nalishlarda ikkita tarkibiy qismga bo'linishi mumkin.



6-rasm: Shvetsiya bo'laklar usuli (TS 7994)

$$N_i = W_i \cos \alpha_i \quad T_i = W_i \sin \alpha_i \quad (21)$$

Bu yerda:

α_i - bo'lak asosi yoy markazi. O markazi bilan birlashtiruvchi to'g'ri chiziq, O markazidan o'tuvchi vertikal yo'nalish bilan hosil qilgan burchakdir. Bo'lakning siljishiga qarshilik ko'rsatuvchi kuch gruntning siljishga qarshiligidan hosil bo'ladi va u quyidagicha (TS 7994).

$$T_{fi} = \Delta L \tau_f = \Delta L (c + \sigma_n \tan \varphi) = \Delta L \left(c + \frac{N}{\Delta L} \tan \varphi \right) = \Delta L c + N \tan \varphi \quad (22)$$

ΔL - bo'lakning yoy uzunligi. Xavfsizlik koeffitsienti siljishga qarshi qo'yilgan momentlar yig'indisining, siljituvchi kuchlar momentlari yig'indisiga nisbatiga teng (TS 7994).

$$G_s = \frac{\Sigma (\Delta L c + N \tan \varphi) r}{\Sigma (W \sin \alpha) r} \quad (23)$$

Bu ifodada moment yelkalari teng bo'lgani uchun quyidagi ko'rinishni oladi.

$$G_s = \frac{L c + \tan \varphi \Sigma N}{\Sigma T} \quad (24)$$

L - AD yoyning uzunligi ($2\pi r \theta / 360$).

Ichki barqarorlik

Ichki muvozanatda armatura(tasma)ning tortish kuchlanishlari ostida uzilishi va yetarli bo'lmagan ishqalanish tufayli to'ldirilgan grundan sirpanishi o'rganiladi (TS 7994). Ushbu tekshirish natijasida, zarurat tug'ilganda, armaturalar soni, o'lchamlari va to'ldirgich ichiga joylashtirish oraliqlari qayta belgilanadi.

Armatura(tasma) uzilishini tekshirish

Armatura(tasma) tayyorlangan materialning tortish mustahkamligi tegishli xavfsizlik koeffitsientiga bo'lingan holda topiladi. Armatura ko'tara oladigan maksimal tortish kuchi T_i (7-rasm) quyidagi ifoda orqali hisoblanadi (TS 7994).

$$T_i = T_{hi} + T_{qi} + T_{si} + T_{fi} + T_{mi} \quad (25)$$

Bu yerda:

T_{hi} : Grunt yukidan hosil bo'lgan tortish kuchi

T_{qi} : O'zgaruvchan yukdan hosil bo'lgan tortish kuchi

T_{si} : Vertikal yukdan hosil bo'lgan tortish kuchi

T_{fi} : Gorizontaal yuk



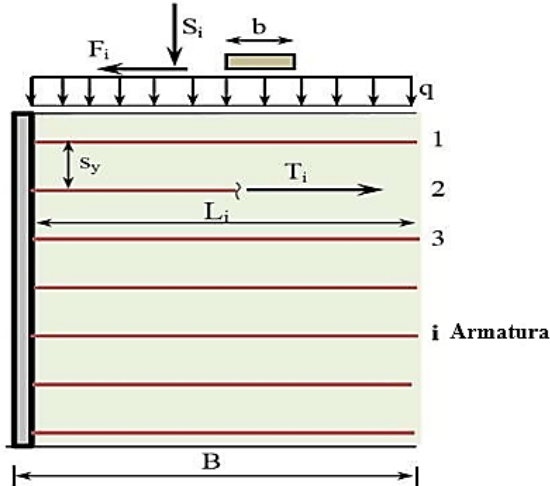
T_{mi} : Vertikal yukdan hosil bo'lgan moment ta'siri.
Grunt yukidan hosil bo'lgan tortish kuchi T_{hi}

$$T_{hi} = (K_a \gamma h_i - 2c\sqrt{K_a}) S_y \quad (26)$$

Yoyilgan yukdan hosil bo'lgan tortish kuchi T_{qi}

$$T_{qi} = K_a q S_y \quad (27)$$

ko'rinishida hisoblanadi. S - armaturalar orasidagi vertikal oraliq, q - yoyilgan yuk ma'nosini anglatadi.



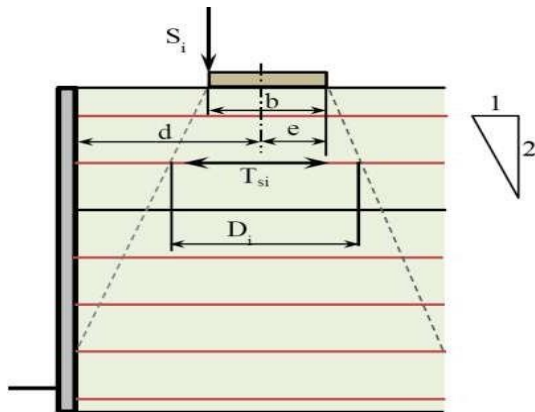
7-rasm: Tortishga ta'sir etuvchi kuchlar (TS 7994)

Vertikal yukdan hosil bo'lgan kuch T_{si} (34-rasm);

$$T_{si} = K_a S_y \frac{S_i}{D_i} \left(1 + \frac{6e}{b}\right) \quad (28)$$

$$h_i < 2d - b \text{ bo'lsa } D_i = h_i + b \quad (29)$$

$$h_i > 2d - b \text{ bo'lsa } D_i = d + \frac{h_i + b}{2} \quad (30)$$



8-rasm: Tashqi yuklarning armaturaga ta'siri (TS 7994)

Horizontal yuk T_{fi} esa 7-rasmidan

$$T_{fi} = 2S_y F_i Q (1 + h_i Q) \quad (31)$$

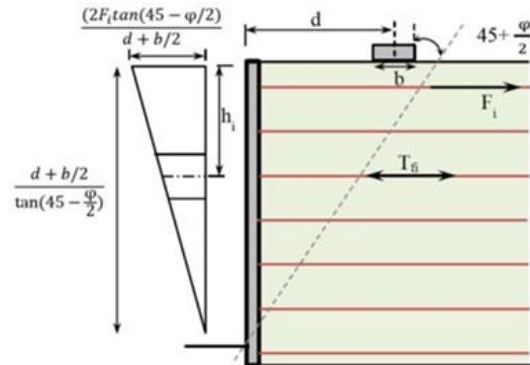
$$Q = \frac{\tan(45 - \frac{\varphi}{2})}{d + \frac{b}{2}} \quad (32)$$

Vertikal yukdan hosil bo'lgan moment ta'siri;

$$T_{mi} = \frac{6K_a S_y M_i}{L_i^2} \quad (33)$$

$$M_i = F_i h_i \quad (34)$$

ko'rinishida hisoblanadi.



9-rasm: Gorizontal yukning armaturalarga ta'siri (TS 7994)

Bu yerda: L_i - armaturalangan sohaning effektiv uzunligi, S_i - vertikal yuk, F_i - gorizontal yuk, b - yoyilgan yuk kengligi, h_i - tasmalar ustidagi to'ldirish balandligi, d - yoyilgan yuk o'rtasi va devor yuzasi orasidagi masofani anglatadi (2.25-rasm). Maksimal tortish kuchi hisoblangandan so'ng, tasmalarning uzilish mustahkamligi quyidagi mezon bo'yicha tekshiriladi (TS 7994).

$$T_{imax} < P_{at} b_s t \quad (35)$$

Bu yerda: P_{at} - ruxsat etilgan tortish kuchlanishi, b_s - armatura kengligi va t - armatura qalinligini anglatadi.

Armatura(tasma) sirpanishini tekshirish

Armatura sirpanishini o'rganishda, to'ldiruvchining yuqori yuzasidan h_i chuqurlikda va L_i uzunligida armaturaning ikki tomonida yuzaga keladigan ishqalanish kuchi (sirpanishga qarshilik), armaturaning qalinligini e'tiborsiz qoldirish mumkin bo'lgani uchun;

$$T_i = \left(\frac{P_i}{2}\right) (L_i (\gamma h_i + q) + c L_i) \quad (36)$$

ifodasi bilan hisoblanadi (TS 7994). Bu yerda $P_i = \alpha \tan \varphi$ ishqalanish koeffitsiyenti bo'lib, u $(0,5 < \alpha < 1)$ qiymatlar orasida bo'lishi kerak. [4-5-6]

4. XULOSA

Xulosa qilib shuni aytish mumkinki yuqorida keltirilgan formula va sxemalardan ko'rishimiz mumkinki yig'ma elementlardan iborat tirkak devorlarni hisoblash qoidalari an'anaviy turdagi tirkak devorlarni hisoblash ketma-ketligidan biroz farq qiladi, shu sababdan yig'ma elementdan iborta tirkama devorlarni hisoblash qoidalarini o'rganish alohida ahamiyat kasb etadi. Bunday turdagi maqolalar O'zbekiston respublikasining ilmiy bazasini boyitadi.



FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR/ REFERENCES

[1] O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 04.10.2017 y. PQ-3309 Qarori. “Avtomobil yo‘llari ko‘priklarini, yo‘l o‘tkazgichlar va boshqa sun‘iy inshootlarni qurish hamda foydalanishni tashkil etish tizimini takomillashtirish to‘g‘risida”.

[2] Основания, фундаменты и подземные сооружения: справочник проектировщика / под ред. Е.А. Сорочана, Ю.Г. Трофименко. М.: Стройиздат, 1985. 479 с.

[3] Проектирование опорных стен и стен подвалов: справочное пособие к СНиП/ Центр. н.-я. я проектирую. ин-т пром. здани и сооружеи.М.:Стройиздат, 1990–101 с.

[4] Fahrettin yilmaz Serit donatili toprakarme duvar sisteminin uygulanmasi dissertatsiya Yüksek lisans tezi 2018

[5] Абдураимов У.К., Уразов Х. У., Зокиров Ж.Ж., Алимухамедов Ж.М. (2023). The ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИЯМ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНО В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЕСКОВ. Innovative Technologies in Construction Scientific Journal, 1(1). Retrieved from <https://inntechcon.uz/index.php/current/article/view/9>

[6] АБДУРАИМОВ У. К., РАХИМЖОНОВ З. К. У., УРАЗОВ Х. У. У. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ НА ПРИМЕРЕ ЧАРВАКСКОЙ ПЛОТИНЫ С УЧЕТОМ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ //МОЛОДОЙ СПЕЦИАЛИСТ Учредители: ИП" Исакова УМ". – №. 2. – С. 73-81.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS/ MUALLIFLAR TO‘G‘RISIDA MA‘LUMOT

**Miralimov
Mirzaxid
Xamitovich /
Miralimov
Mirzakhid**

Toshkent davlat transport universiteti, “Avtomobil yo‘llaridagi sun‘iy inshootlar” kafedrası dotsenti, t.f.d. (DSc), dotsent
Tel.: +998 97 725 09 24
<https://orcid.org/0000-0003-2530-5516>

**Xumoyun
O‘tkir o‘g‘li /
Urazov
Khumayun**

Toshkent davlat transport universiteti, “Ko‘priklar va tonnellar” kafedrası tayanch doktoranti, assistent
Tel.: +998 94 343 90 26
<https://orcid.org/0000-0003-3594-5170>

**Raximjonov
Ziyovuddin /
Ziyovuddin
Rakhimjonov**

Toshkent davlat transport universiteti, “Ko‘priklar va tonnellar” kafedrası dotsenti, t.f.f.d., (PhD)
E-mail: ziyoviddin.raximjonov@mail.ru
Tel.: +998939390910
<https://orcid.org/0000-0002-7898-077X>

**Jo‘rayev
Qaxramon
Maxmudjon
o‘g‘li /
Juraev
Kakhramon**

Toshkent davlat transport universiteti, “Ko‘priklar va tonnellar” kafedrası tayanch doktoranti, assistent
E-mail: jurayev_qm@mail.ru
Tel.: +998 95 444 59 00
<https://orcid.org/0000-0002-0883-7257>



Analysis of the Strength Characteristics and Micro-Crack Formation Boundaries of Ceramic Concrete During Compression

G. Malikov¹^a

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The article examines the physicochemical, strength, and deformation properties of keramzit concrete under short-term and long-term axial compression. Particular attention is paid to the kinetics of the microcracking process and the determination of parametric points—the lower (R_{cr}^o) and upper (R_{cr}^v) boundaries of microcracking in the structure of light concrete. Based on an analytical review of the research, the influence of the heterogeneity of the porous filler and the strength of the mortar part on the overall deformability and prismatic strength of the material is demonstrated. The limitations of applying O.Ya. Berg's classical logarithmic dependencies in evaluating modern concretes were demonstrated, and new universal empirical formulas were analyzed, accounting for the constant ratio of load levels ($(\eta_{cr}^o)/(\eta_{cr}^v) = \text{const}$) and the low density of keramzit concrete. The obtained results can be used to improve methods for designing and assessing the stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures. **Keywords:** Ceramic concrete, light concrete, prismatic strength, Poisson's ratio, deformability, micro-cracking, lower crack formation boundary, upper crack formation boundary, stress-strain state.

Анализ Прочностных Характеристик и Границ Микротрещинообразования Керамзитобетона при Сжатии

Маликов Г.¹^a

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация В статье рассмотрены физико-механические, прочностные и деформационные свойства керамзитобетона при кратковременном и длительном осевом сжатии. Особое внимание уделено кинетике процесса микроразрушения и определению параметрических точек — нижней (R_{cr}^o) и верхней (R_{cr}^v) границ микротрещинообразования в структуре легкого бетона. На основе аналитического обзора исследований показано влияние неоднородности пористого заполнителя и прочности растворной части на общую деформативность и призмную прочность материала. Показана ограниченность применения классических логарифмических зависимостей О.Я. Берга при оценке современных бетонов и проанализированы новые универсальные эмпирические формулы, учитывающие постоянство отношения уровней нагрузок $(\eta_{cr}^o)/(\eta_{cr}^v) = \text{const}$ и низкую плотность керамзитобетона. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования методов проектирования и оценки напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных конструкций. **Ключевые слова:** Керамзитобетон, легкий бетон, призмная прочность, коэффициент Пуассона, деформативность, микротрещинообразование, нижняя граница трещинообразования, верхняя граница трещинообразования, напряженно-деформированное состояние.

1. ВВЕДЕНИЕ

К числу основных параметров, необходимых для проектирования железобетонных конструкций, относятся прочностные и деформативные характеристики бетона при кратковременном и длительном сжатии и растяжении.

Вопросам исследования конструкций из керамзитобетонов и совершенствования технологии их производства был посвящен ряд важных работ А.А. Ашрабова, Б.А. Аскарлова, Ч.С. Раупова, В.В. Бондаря, А.И. Ваганова, К.П. Деллоса, В.Г. Довжика, И.А. Иванова, И.Г. Иванова-Дятлова, Н.А. Корнева, А.А. Кудрявцева,

^a <https://orcid.org/0000-0003-3691-1079>



А.Е. Пирадова, И.А. Попова, М.З. Симонова, А.А. Ходжаева, Иноземцева А.С., Королева Е.В., Андрианова А.А., Исаева В.Ф., Фаликмана В.Р., Звезда А.И., Кондращенко В.И., Мешкауска Ю.И., Ортенглихе ра Л.П., Ярмаковского В.Н., Житкевич Р.К., Гузенко С.В., Звезда А.И., Гучкина И.С., Бакрадзе Д.Д., Бужевича Г.А., Горчакова Г.И., Дона А.И., Истомин А.С. и ряд других, и много других зарубежных ученых.

Много дискуссий вызывает вопрос о призмной прочности бетонов на пористых заполнителях. Имеются многочисленные опытные данные, по которым R_b/R для этих бетонов выше, чем для тяжелого бетона.

Так, по данным А.Б. Пирадова [1], для керамзитобетона

$$R_b = 0,9 \times R, \quad (1)$$

По обобщенным данным НИИЖБа [2]

$$R_b/R = 0,90 - 0,001 \times R, \quad (2)$$

По данным К.И. Вилкова [3]

$$R_b/R = 0,88 - 0,001 \times R \quad (3)$$

В КМК 2.01.03–95 [70] для тяжелого и легкого бетонов принят единый коэффициент призмной прочности, определяемый по выражению

$$R_{b1}/R_b = 0,77 - 0,001 \times R \quad (4)$$

Коэффициент Пуассона ν_e как известно, в действующих нормах принят для тяжелого и легкого бетона, равным 0,20, независимо от вида напряженного состояния. По данным ряда исследователей коэффициент Пуассона при сжатии для керамзитобетона колеблется в пределах, 0, 12...0, 28.

2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным условием нормальной работы железобетонных конструкций является совместность деформаций бетона и арматуры. Поэтому значение предельных деформаций сжатия бетона, характеризующих степень использования арматуры в конструкциях, крайне необходимо. Как известно, керамзитобетоны обладают повышенной деформативностью по сравнению с аналогичным по прочности, тяжелым бетоном. Поэтому в сжатых зонах легкобетонных элементов и конструкций степень использования арматуры становится более эффективной.

Вопросам изучения прочности и деформаций керамзитобетонов при сжатии в зависимости от различных факторов посвящены ряд исследований.

В работе [4] изучалась зависимость прочности керамзитобетона плотной структуры при осевом сжатии от его состава, показателей физико-механических свойств компонентов и жесткости бетонной смеси. Отмечается, что в изученных пределах выбранные факторы (прочность керамзита в цилиндре, концентрация керамзита в

бетоне, прочность растворной части, жесткость бетонной смеси и крупность керамзита) на 87% определяет вариацию прочности керамзитобетона. Наибольшее влияние на прочность керамзитобетона оказывает прочность растворной части (72% и гораздо меньше прочность керамзита (12%).

В работе [5] установлено, что увеличение объемного содержания керамзита при правильном выбранном соотношении его фракций приводит к повышению прочности керамзитобетона. При этом снижается расход цемента и объемная масса керамзитобетона.

В работе выявлено, что при изменении формы и размеров зерен керамзита в пределах 5 – 20 мм прочность конструктивного керамзитобетона, при всех прочих равных условиях, изменяется на 10 – 15% при сравнении с прочностью керамзитобетона контрольной фракции 5 – 20 мм без разделения по форме зерен. Наиболее оптимальные физико-механические показатели керамзита и керамзитобетона наблюдались у фракций с размером зерен 15 мм при любой их форме.

Авторы работ [6, 7] рассматривали прочности керамзитобетона в зависимости от прочности растворной части, показателя прочности керамзита и его объемной концентрации в бетоне.

А.И. Ваганов [4] установил, что на прочность керамзитобетона при сжатии влияют прочность растворной части, возраст и условия твердения бетона, расход керамзита, его зерновой состав и предельная крупность.

М.З. Симонов [8] отмечает, что прочность керамзитобетона при сжатии зависит от прочности на разрыв цементного камня, сцепления его с зернами заполнителя, а также от возраста и условий твердения.

Большое значение для прогнозирования физико-механических характеристик бетона имеют теории прочности и разрушения его при сжатии, в частности понятия о границах микротрещинообразования (R_{crc}^o и R_{crc}^v), предложенных авторами работ [6, 7]. С их помощью можно произвести оценку кинетики процесса микротрещинообразования в бетоне. Границы микротрещинообразования (R_{crc}^o и R_{crc}^v), при сжатии следует рассмотреть как важную характеристику бетона для обеспечения надежной работы конструкции при эксплуатации.

Исследуя влияния прочности, неоднородности и влажностного состояния керамзита на границы микротрещинообразования R_{crc}^o и R_{crc}^v керамзитобетона класса В15...В25 и их характерные особенности процесса микроразрушений автор работы [9] сообщает, что в образцах керамзитобетона (когда $R'_b/R_b > 2$, где R'_b и R_b – прочность соответственно растворной части и керамзитобетона) при напряжениях $\sigma <$



R_{crc}^o (происходит разрушение пористой структуры керамзита, а при $(\sigma > R_{crc}^o)$ наряду с продолжающимися микроразрушениями зерен керамзита интенсифицируется образование микротрещин в растворном каркасе. В образцах керамзитобетона однородной макроструктуры (когда $R_b'/R_b \approx 1$) при напряжениях $\sigma = R_{crc}^o$ фиксируется начало интенсивного роста микроразрушений, практически, одновременно в обоих составляющих конгломерата. Также сообщает, что применение в бетоне малопрочного керамзита приводит к заметному снижению (до 15%) его параметрических уровней трещинообразования R_{crc}^o/R_b и R_{crc}^v/R_b .

В работе [10] отмечается, что неоднородность свойств зерен керамзита усиливает концентрацию напряжений в керамзитобетоне, в результате чего усиливается доля пластических деформаций при сжатии, снижается уровень параметрических точек R_{crc}^o/R_b и R_{crc}^v/R_b и модуль упругости, а также повышается деформации ползучести керамзитобетона.

Анализ исследований результатов границ микротрещинообразования показывает, что эти характеристики неоднозначно связаны с прочностью на сжатие R_b и могут существенно различаться в зависимости от состава керамзитобетона, вида и расхода крупного заполнителя и других факторов.

Значения границ микротрещинообразования (нижней $\eta_{crc}^o = R_{crc}^o/R_b$ и верхней $\eta_{crc}^v = R_{crc}^v/R_b$) довольно важны для описания особенностей работы бетона, поскольку позволяют сделать вывод о стадии напряженно-деформированного состояния (н.д.с.) [11].

Особое внимание обычно уделяется верхней границе микротрещинообразования, поскольку достижение указанной границы указывает на переход к третьей стадии н.д.с., т. е. свидетельствует о том, что микротрещины сливаются в макротрещины, делят структуру бетона на блоки, которые под нагрузкой смещаются относительно друг друга, что обуславливает разрушение бетонной матрицы [11 – 12]. Если же уровень нагрузки близок к верхней границе микротрещинообразования, но не превышает ее, пластические деформации в условиях статического нагружения со временем стабилизируются (даже при циклическом изменении нагрузки [13]).

Нижняя граница микротрещинообразования для обычного бетона определяет предел выносливости при многократно повторяющейся нагрузке [13]. Причем в [14] экспериментально доказано, что значение $\eta_{crc}^o = R_{crc}^o/R_b$ является практически одинаковым как при одноосном, так и при двухосном сжатии в условиях отсутствия трения по периметру образца, а в условиях двухосного

сжатия (с трением по контактным поверхностям образца и испытательной установки) микроразрушения в образце возникают при более высоких напряжениях, чем при одноосном сжатии.

Работы О.Я. Берга стали классикой теории работы бетона и железобетона. О.Я. Берг предложил следующие эмпирические зависимости для определения относительных значений нагрузок, соответствующих нижней и верхней границам микротрещинообразования:

$$\eta_{crc}^o = R_{crc}^o/R_b = 0,35lgR_b - 0,15 \quad (5)$$

$$\eta_{crc}^v = R_{crc}^v/R_b = 0,35lgR_b + 0,175 \quad (6)$$

где R_b – средняя призмная прочность бетона на осевое сжатие. Данными зависимостями при проведении экспериментальных исследований успешно пользовались многие известные ученые на протяжении длительного времени, поскольку они обеспечивали достаточную сходимость с опытными данными.

Однако в современном мире помимо традиционного бетона все чаще применяются другие виды бетонов, имеющие специфические свойства, необходимые для достижения тех или иных целей строительства. Например, широкое применение сегодня находят высокопрочные бетоны, легкие бетоны, бетоны с дисперсным армированием, напрягающие бетоны, бетоны с использованием альтернативных видов заполнителей и т. п. В этих условиях зависимости (5) и (6) теряют свою актуальность, т. к. использование десятичного логарифма не позволяет применять эти зависимости в широком диапазоне прочностей, а использование в расчете только значения средней прочности ограничивает их применение для разных видов бетона. Поэтому выведение новых формул, более универсальных, применимых для бетонов разных видов и классов, на сегодняшний день является актуальным [11].

Авторами статьи [11] были проведены экспериментальные исследования работы различных видов бетона, по результатам которых предложены новые эмпирические зависимости для определения границ микротрещинообразования:

$$\eta_{crc}^o = R_{crc}^o/R_b = 0,33k_{crc} \times \ln R_b - 0,15 \quad (7)$$

$$\eta_{crc}^v = R_{crc}^v/R_b = 0,33k_{crc} \times \ln R_b + 0,1 \quad (8)$$

где R_b – средняя прочность бетона, МПа;

k_{crc} – эмпирический коэффициент.

На основании экспериментальных данных было установлено, что между значениями относительных нагрузок для верхнего и нижнего пределов микротрещинообразования существует линейная зависимость [15]. Отношение значений уровня нагрузки, соответствующего нижней границе микротрещинообразования, к значению уровня нагрузки, соответствующего верхней границе, остается постоянным независимо от



класса бетона, т. е. $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v = \text{const}$.

Величина отношения η_{cr}^0/η_{cr}^v может быть принята:

– $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v \approx 0,67$ – для нормального бетона [13];

– $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v \approx 0,70$ – для сталефибробетона (СФБ) на основе фибры «Vulkan Narex» заводского изготовления [13];

– $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v \approx 0,60$ – для керамзитобетона;

– $\eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v \approx 0,73$ – для бетона с использованием отходов литейно-металлургических производств в качестве мелкого заполнителя (ОМП-бетона) [16] (возможность применения отходов промышленности для производства бетона обосновано в работах [17]).

Эмпирический коэффициент k_{cr} , принятый на основании значения η_{cr}^0/η_{cr}^v может быть использован при выполнении расчетов бетонных и железобетонных конструкций:

$$k_{cr} = k_{cl} \times \eta_{cr}^0/\eta_{cr}^v \quad (5)$$

Низкая плотность керамзитобетона учитывается коэффициентом k_{cl} , значение которого принято равным приблизительно 1,2, т. е. $k_{cl} \approx 1.2$ при плотности бетона $\rho < 2200 \text{ кг/м}^3$.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного аналитического обзора и теоретического анализа можно сделать следующие основные выводы:

1. Классические логарифмические зависимости О.Я. Берга, предложенные для определения границ микротрещинообразования, теряют свою универсальность применительно к современным высокопрочным, легким и модифицированным бетонам. Использование десятичного логарифма и учет только средней прочности материала существенно ограничивают их применение в широком диапазоне прочностных классов.

2. Новые универсальные эмпирические зависимости, учитывающие линейную взаимосвязь уровней нагрузок для верхнего и нижнего пределов микроразрушений ($\frac{\eta_{cr}^0}{\eta_{cr}^v} = \text{const}$), позволяют более точно описывать стадии напряженно-деформированного состояния (НДС) различных видов бетона. Для керамзитобетона данное отношение стабильно составляет около 0,60.

3. Специфика структуры легкого бетона и его низкая плотность эффективно учитываются введением эмпирических коэффициентов k_{cr} и k_{cl} (принятого равным 1,2 при плотности бетона $\rho < 2200 \text{ кг/м}^3$). Это обеспечивает высокую сходимость теоретических расчетов с опытными данными.

Повышенная деформативность керамзитобетона по сравнению с тяжелым

бетоном аналогичной прочности способствует более эффективному вовлечению и использованию потенциала арматуры в сжатых зонах изгибаемых и сжимаемых элементов, что необходимо учитывать при оптимизации проектных решений.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

[1] Пирадов А.Б. Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1973.с. 133–135.

[2] Легкие бетоны. Проектирование и технология / Под ред.к.т.н. Ярмаковского В.Н. – М.: Стройиздат, 1981. – 238 с.

[3] Вилков К.И. Конструкционный керамзитобетон при обычных и сложных деформациях. – М.: Стройиздат, 1984. – 120 с.

[4] Ваганов А.И. Исследование свойств керамзитобетона. – М., Госстройиздат, 1960. – 65 с.

[5] Попов Н.А. Подбор состава легких бетонов на искусственных пористых заполнителях. – М.: Госстройиздат, 1963, – .83 с.

[6] Ашрабов А.А. Легкий бетон и железобетон для индустриального строительства. – Ташкент. Мехнат, 1988. – 252с.

[7] Раупов Ч.С. Керамзитобетон для транспортного строительства. Монография. ТГТрУ. Ташкент. Изд. «Tamaddun», 2020. – 316 с.

[8] Симонов М.З. Основы технологии легких бетонов. – М.: Стройиздат, 1973. с. 83–435.

[9] Farhad Ansari. Mechanism of microcrack formation in concrete / ACI Materials Journal, Vol. 86, Issue 5. Pp.459-464.

[10] Горчаков Г.И., Воронин В.В., Алимов Л.А. Теория прочности легких бетонов в зависимости от их структуры. //Структура, прочность и деформация легкого бетона. /Сб. тр. НИИЖБ. – М., Стройиздат, 1973. с.24–33.

[11] Строительство уникальных зданий и сооружений, 2018, №7 (70) 24 Семенюк С.Д., Москалькова Ю.Г. Методики определения границ микротрещинообразования // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 7(70). С. 22-30. DOI: 10.18720/CUBS.70.2

[12] Villavicencio, Camacho Enrique J. Analysis of Microcrack Behavior in Mass Concrete / University of Florida, 2006. 72 p.

[13] Москалькова Ю. Г. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружении : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01; Белорус.-Рос. ун-т. Могилев, 2013. 199 с.

[14] А.Д., Беликов Н. А. Зависимость границ микротрещинообразования бетона от его прочности и напряженного состояния // Вестник



МГСУ. Строительство. Архитектура, 2011. № 2-1. С. 159–162.

[15] Chini A. R., Villavicencio E. J.. Detection of Microcracks in Concrete Cured at Elevated Temperature / University of Florida, Gainesville, 2006. 86 p.

[16] Семенюк С. Д. Прогнозирование работы и расчет железобетонных пространственных конструкций на неравномерно деформируемом основании : дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01; 05.23.02. Могилев, 2004. 381 с.

[17] Семенюк С. Д., Москалькова Ю. Г. Особенности деформирования бетона на основе отходов литейнометаллургических производств при малоцикловом нагружении // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. научн. тр. / Институт БелНИИС ; редкол. : М. Ф. Марковский [и др.]. Минск: СтройМедиаПроект,

2014. Вып. 8. С. 283–297.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Маликов	Ташкентский
Ганишер	государственный
Бахромкулович	транспортный университет, кафедра «Мосты и тоннели», и.о. доцент
	E-mail: ganisherm@inbox.ru
	Тел: +998901893094
	https://orcid.org/0000-0003-3691-1079



Analysis of the Influence of Loading Time And Technological Factors on the Deformation of Long-Term Creep of Lightweight Concretes

V.M. Soy¹^a, U.Z. Shermukhamedov¹^b, A.R. Babaev¹^c,
N.R. Mukhammadiev¹^d, G.B. Malikov¹^e

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The article analyzes the developmental patterns of linear and nonlinear creep deformations in lightweight prestressed ceramic concrete structures under prolonged compression. The joint influence of the water-cement ratio, temperature effects up to 900C, and the stiffness of the porous filler on the kinetics of stress redistribution in the concrete structure was investigated. The mathematical dependence for determining the nonlinear creep of keramzit concrete was considered, taking into account the time factor and the age of the concrete at the time of loading ($t_1 > 16$ days). It has been established that the linear creep limit of high-strength lightweight concretes reaches 65% of the compressive strength, which is significantly higher than the indicators of conventional concretes. The obtained results and refined empirical formulas significantly increase the accuracy of calculating the deflections and load-bearing capacity of bending and eccentrically compressed elements of transport structures.

Keywords: Porous concrete, light concrete, porous concrete, nonlinear creep, deformability, water-cement ratio, porous aggregate, age of loading

Анализ Влияния Времени Загрузки И Технологических Факторов На Деформации Длительной Ползучести Легких Бетонов

В.М. Сой¹^a, У.З. Шермухамедов¹^b, А.Р. Бабаев¹^c, Н.Р. Мухаммадиев¹^d,
Г.Б. Маликов¹^e

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация В статье анализируются закономерности развития деформаций линейной и нелинейной ползучести предварительно напряженных конструкций из легкого керамзитобетона при длительном сжатии. Исследовано совместное влияние водоцементного отношения, температурных воздействий до 90°C и жесткости пористого заполнителя на кинетику перераспределения напряжений в структуре бетона. Рассмотрена математическая зависимость для определения нелинейной ползучести керамзитобетона, учитывающая фактор времени и возраст бетона в момент загрузки ($t_1 > 16$ суток). Установлено, что предел линейной ползучести высокопрочных легких бетонов достигает 65% от прочности на сжатие, что значительно выше показателей обычных бетонов. Полученные результаты и уточненные эмпирические формулы позволяют существенно повысить точность расчета прогибов и несущей способности изгибаемых и внецентренно сжатых элементов транспортных сооружений.

Ключевые слова: Керамзитобетон, легкий бетон, керамзитобетон, нелинейная ползучесть, деформативность, водоцементное отношение, пористый заполнитель, возраст загрузки

1. ВВЕДЕНИЕ


Большой вклад в развитие теории ползучести внесли ученые А.А. Ашрабов, Раупов Ч.С., Андрианов А.А. Деллос К. П., Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н., А.А. Гвоздев и др. [1, 2, 3, 4].


Рациональное проектирование предварительно

напряженных конструкций из керамзитобетона может быть обеспечено только при условии правильного учета таких важных характеристик, как усадка и ползучесть при сжатии [1, 2, 5].


Neville А.М. с соавторами [6] настаивают, что деформации ползучести являются очень существенными и всегда должны учитываться в дополнение к начальным упругим деформациям.

^a <https://orcid.org/0009-0004-2390-6961>

^b <https://orcid.org/0000-0003-1718-5331>

^c <https://orcid.org/0000-0001-5045-8288>

^d <https://orcid.org/0009-0004-2390-6961>

^e <https://orcid.org/0000-0003-3691-1079>



Это наглядно иллюстрируется экспериментальными результатами, показывающими, что деформации ползучести через год после загрузки в 2-3 раза превышают начальные упругие деформации. Интенсивность роста ползучести, однако, со временем уменьшается и через некоторое время ползучесть носит установившийся характер.

2. МЕТОДЫ

Наблюдения Девиса за ползучестью бетона, продолжавшиеся в течение 30 лет, показали, что деформация ползучести через 1 год, принятая за единицу, возрастает через два года до 1,14, через 5 лет - до 1,2, через 10 лет - до 1,26, через 20 лет - до 1,33 и через 30 лет - до 1,36.

Все согласны в том, что бетоны с более низкими В/Ц отношениями показывают меньшую ползучесть, чем бетоны с более высокими В/Ц. Изучение экспериментальных данных составов с одинаковым содержанием цемента, но с различным содержанием воды показало эту тенденцию. Это связано с тем, что кинетика нарастания прочности бетона неразрывно связана с величиной В/Ц.

Ползучесть, по существу происходит в цементном камне, который не совсем упругий, а заполнители же при эксплуатационных нагрузках деформируются упруго, а не пластически, тем самым, ограничивая ползучесть. Поэтому количество и жесткость крупных заполнителей до некоторой степени влияют на ползучесть. Более жесткий заполнитель воспринимает большую долю нагрузки, разгружая цементный камень. По мере проявления деформаций ползучести последнего идет перераспределение напряжений в направлении еще большего нагружения высокопрочного заполнителя. Следовательно, заполнители в бетоне тормозят развитие пластических деформаций цементного камня и тем в большей степени, чем больше насыщен бетон заполнителем и чем выше модуль упругости заполнителя. Поэтому любое увеличение этих двух факторов уменьшает ползучесть бетона [5].

В своей книге Neville A.M. с соавторами обсуждали влияние заполнителей на ползучесть бетона. Представленные результаты, основанные на предшествующем исследовании, показали, что максимальный размер и гранулометрия заполнителей не влияют на ползучесть, если бетон полностью уплотнен.

Нельзя отрицать и тот факт, что сам по себе пористый заполнитель, и в первую очередь керамзит, подвержен значительным пластическим деформациям и микротрещинообразованию при длительном действии на него сжимающих нагрузок. Это также может являться дополнительными факторами,

интенсифицирующими ползучесть керамзитобетона.

Температура также влияет на ползучесть, хотя для наиболее типовых сооружений температура рассматривается как менее важный фактор окружающей среды, чем относительная влажность. Более высокая температура приводит к увеличению начальной скорости ползучести по сравнению с бетоном, испытываемым при нормальной (комнатной) температуре. Это обусловлено увеличением подвижности воды и активацией процесса деформирования. Однако рост ползучести со временем прекращается и становится одинаковым для всех температур. В случае испытаний бетона в раннем возрасте ползучесть при 900С в три раза выше ползучести при 200С [6]. Alexander K.M. с соавторами [10] отмечает, что снижение температуры твердения бетона с 23 до 50С приводит к росту ползучести до 40%.

Smadi M.M. с соавторами [7] отмечает, что у высокопрочных бетонов существует более высокий предел линейного соотношения между уровнем приложенных напряжений и деформациями ползучести. Этот предел наблюдался приблизительно на уровне нагрузки 65% от прочности на сжатие для высокопрочного бетона по сравнению с 45% от прочности на сжатие для низкопрочных и нормальных бетонов. Также наблюдалось, что высокопрочный бетон имеет повышенную прочность при длительной нагрузке. Напряжения, при которых происходит разрушение бетона от деформаций ползучести составляют примерно 80% от прочности у высокопрочного бетона и 75% от прочности для бетонов низких и средних марок.

Все данные по ползучести получены в основном при испытании бетона под постоянной нагрузкой. Бетон, подвергающийся циклическому нагружению и разгрузке, также показывает прогрессирующий рост деформаций. Однако при испытании образцов, загруженных вначале длительно действующей постоянной нагрузкой, а затем циклической нагрузкой, было обнаружено только незначительное увеличение деформаций по сравнению с их уровнем, полученным при действии постоянной нагрузки [6].

Многочисленное повторение циклов загрузки и разгрузки бетонной призмы приводит к постепенному накоплению неупругих деформаций. После достаточного большого числа циклов эти неупругие деформации, соответствующие данному уровню напряжений, постепенно выбираются, ползучесть достигает своего предельного значения, бетон начинает работать упруго. Такой характер деформирования наблюдается лишь при напряжениях, не превышающих предел выносливости. При больших напряжениях после некоторого числа



циклов неупругие деформации начинают неограниченно расти, что приводит к разрушению образца [5].

Анализ литературных источников показал, что деформации ползучести бетона являются очень существенными и всегда должны учитываться в дополнение к начальным упругим деформациям.

Линейное соотношение между деформациями ползучести и величиной приложенного напряжения, как известно, существуют только до определенного уровня напряжений. Верхний предел линейного соотношения в основном находится в пределах от 50% до 60% прочности при сжатии для большинства бетонов. Выше этого напряжения происходит микротрещинообразование и соотношение становится нелинейным. Хотя зависимость деформаций от напряжения при длительном сжатии бетона с самого начала загрузки, строго говоря, нелинейна, однако для бетона не очень раннего возраста при небольших напряжениях сжатия эта нелинейность бывает слабее выражена, поэтому в практических расчетах иногда нелинейность деформаций не учитывается. Но это справедливо лишь для небольших уровней напряжения. Для многих практических задач полезно различать условную границу перехода области линейной ползучести, обнаруживаемой обычно по прошествии короткого времени после длительного нагружения (с сильно выраженной нелинейностью в процессе нагружения) от области существенно нелинейной ползучести бетона, четко обнаруживаемой в последующее время длительного нагружения. Учет нелинейной ползучести существенно важен для практических расчетов, предварительно напряженных изгибаемых, внецентренно сжатых и некоторых других элементов. При уровнях напряжения, приближающихся к пределу прочности бетона, ползучесть может привести к разрушению структуры [5].

В работах [8, 9] для определения относительной деформации нелинейной ползучести керамзитобетона предлагается зависимость:

$$\varepsilon_{x,p}(t; \tau_1) = (\sigma_{bl} + \alpha \sigma_{bl}^3) C_b(t; \tau_1), \quad (1)$$

где σ_{bl} – действующее напряжение в МПа;

α – численный коэффициент, определяемый из опыта;

$C_b(t; \tau_1)$ – мера линейной ползучести керамзитобетона, которую можно определить по предлагаемой в [2] зависимости:

$$C_b(t; \tau_1) = \frac{70R_b^2(\tau_1 - 2) + 13000R_b - 140000}{(177R_b - 1700)R_b\tau_1^{3/2}} 10^{-5} + \frac{0,2R_b + 15\tau_1 - 0,2R_b + 100}{R_b} [1 - e^{-y(t-\tau_1)}] 10^{-5} \quad (2)$$

где $C_b(t; \tau_1) \gamma_1 = 0,015 + 18/R_b$ (3)
второй множитель в формуле (4.3) учитывается при $t_1 > 16$ суток.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа существующих исследований и математических моделей установлено, что деформации ползучести легких бетонов имеют ярко выраженный нелинейный характер, зависящий от кинетики нарастания прочности цементного камня, жесткости пористо го заполнителя и температурных факторов. Применение уточненной зависимости, учитывающей возраст бетона в момент загрузки ($t_1 > 16$ суток), позволяет научно обосновать смещение границы линейной ползучести высокопрочных легких бетонов до уровня 65% от призмной прочности. Данный подход раскрывает механизм перераспределения напряжений между цементной матрицей и керамзитовым заполнителем, предотвращая прогнозируемое микротрещинообразование в структуре материала.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Ашрабов А.А. Легкий бетон и железобетон для индустриального строительства. – Ташкент. Мехнат, 1988. – 252с.
- [2] Раупов Ч.С. Керамзитобетон для транспортного строительства. Монография. ТГТУ. Ташкент. Изд. «Tamaddun», 2020. – 316 с.
- [3] Деллос К. П. Керамзитобетон в мостостроении. – М.: Транспорт. 1986. – 184с.
- [4] Андрианов А.А. Состав, ползучесть высокопрочного лёгкого бетона из смесей высокоподвижной и литой консистенции с модификаторами на органоминеральной основе / Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Москва: ФГУП НИЦ «Строительство», 2007. – 15 с.
- [5] Механизм ползучести бетона и факторы, влияющие на нее (обзор). <https://elibrary.ru/item.asp?id=23032537>
- [6] Москалькова Ю. Г. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружениях : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01; Белорус.-Рос. ун-т. Могилев, 2013. 199 с.
- [7] Chini A. R., Villavicencio E. J.. Detection of Microcracks in Concrete Cured at Elevated Temperature / University of Florida, Gainesville, 2006. 86 p.
- [8] Семенюк С. Д. Прогнозирование работы и расчет железобетонных пространственных конструкций на неравномерно деформируемом



основании : дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01; 05.23.02. Могилев, 2004. 381 с.

[9] Семенюк С. Д., Москалькова Ю. Г. Особенности деформирования бетона на основе отходов литейнометаллургических производств при малоцикловом нагружении // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. научн. тр. / Институт БелНИИС ; редкол. : М. Ф. Марковский [и др.]. Минск: СтройМедиаПроект, 2014. Вып. 8. С. 283–297.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Цой Владимир Михайлович
Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра «Строительство зданий и промышленных сооружений», доктор технических наук, профессор.
E-mail: Volodya_tsoy@inbox.ru
Тел.: +998909521576
<https://orcid.org/0009-0004-2390-6961>

Шермухамедов Улугбек Забихуллаевич
Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра «Мосты и тоннели», заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор.

E-mail: ulugbek_z@tstu.uz
Тел: +998 90 316 11 81.
<https://orcid.org/0000-0003-1718-5331>



Ташкентский государственный транспортный университет, декан факультета «Строительная инженерия», доктор технических наук, профессор
E-mail: babaev_a@tstu.uz
Тел: +998 94 640 37 92.
<https://orcid.org/0000-0001-5045-8288>

Мухаммадиев Нематжон Рахматович
Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра «Строительство зданий и промышленных сооружений», заведующий кафедрой, доктор технических наук, доцент
E-mail: nemat.9108@mail.ru
Тел.: +998909111106
<https://orcid.org/0009-0004-2390-6961>

Маликов Ганишер Бахромкулович
Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра «Мосты и тоннели», PhD., и.о. доцент
E-mail: ganisherm@inbox.ru
тел: +998901893094



Passive Cooling Strategies in Residential Architecture of Hot-Dry Uzbek Cities: A Design-Screening Model

E. Urazxanova¹^a, K. Markabaeva¹^b

¹Karakalpak State University, Nukus, Uzbekistan

Abstract: The article analyzes passive cooling strategies for residential architecture in hot-dry urban environments of Uzbekistan, with attention to the climatic conditions of Karakalpakstan and the lower Amu Darya region. The research evaluates orientation, compactness, shading, natural ventilation, courtyard design, envelope thermal resistance and reflective roof surfaces. A comparative design-screening model is proposed for four residential block variants. The results show that the highest cooling-load reduction is achieved through a combined passive package: east-west orientation control, external shading, ventilated roofs, improved wall insulation, night ventilation and shaded courtyards. The proposed approach supports energy-efficient housing design and can be used in early-stage architectural planning.

Keywords: Passive Cooling, Residential Architecture, Hot-Dry Climate, Nukus, Courtyard Housing, Shading, Energy Efficiency, Urban Heat Island, Sustainable Design

1. INTRODUCTION

Residential buildings in hot-dry cities face a dual challenge: they must protect occupants from high summer temperatures while keeping energy demand affordable. In the cities of Karakalpakstan, climatic stress is intensified by low humidity, strong solar radiation, dusty winds and the limited cooling capacity of urban vegetation. Therefore, architectural solutions should reduce heat gains before mechanical cooling is required.

Passive cooling is not a single technique but a coordinated design logic. It includes orientation, shading, compact planning, thermal mass, ventilation, roof protection, courtyard microclimate and envelope performance. The relevance of this topic is increasing as climate projections and urban heat-island effects indicate higher exposure of urban populations to extreme heat [1], [2].

The aim of this article is to develop a practical design-screening model for evaluating passive cooling strategies in residential architecture. The model is intended for preliminary architectural decisions and can be adapted to local building codes and available materials.

2. RESEARCH METHODOLOGY

The study uses a comparative design-screening method. Four residential block variants were formed: V0 - conventional block without systematic passive measures; V1 - orientation and shading improvement; V2 - improved envelope with ventilated roof; V3 - integrated passive package, including optimized orientation, external shading, insulated envelope, night ventilation and a shaded courtyard. The cooling-

load reduction index was estimated using normalized architectural parameters rather than full dynamic simulation.


$$CLI = 0.30O + 0.25S + 0.20E + 0.15V + 0.10C \quad (1)$$

where CLI is the passive cooling index, O is the orientation score, S is the shading score, E is the envelope performance score, V is the ventilation score and C is the courtyard microclimate score. Each component is normalized from 0 to 100. The model is designed for early-stage design comparison before detailed energy modeling.

Table 1
Residential design variants used in the comparative assessment

Variant	Main design features	CLI	Cooling load reduction
V0 Conventional	Weak shading, ordinary roof, random orientation	28	0%
V1 Shading/orientation	Long facades controlled, external shading	49	14%
V2 Improved envelope	Insulated walls, ventilated roof, low WWR	63	24%
V3 Passive package	V1+V2, night ventilation, shaded courtyard	78	36%

^a <https://orcid.org/0009-0007-8846-1686>

^b <https://orcid.org/0009-0007-1710-8228>



3. RESULTS AND DISCUSSION

The results show that single measures provide measurable benefits, but the strongest effect is obtained when measures are combined. Orientation reduces direct solar exposure on long facades; shading protects windows and walls; roof ventilation limits heat transfer from the most exposed surface; and the courtyard creates a semi-private shaded microclimate that improves thermal comfort.

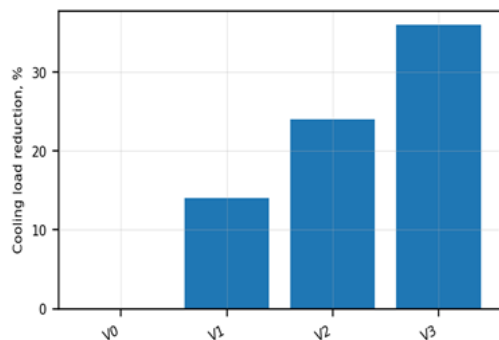


Fig. 1. Modeled cooling-load reduction by residential design variant

Figure 1 demonstrates that the integrated passive package can reduce cooling demand by more than one third compared with a conventional design. This result is consistent with the general principle of bioclimatic architecture: energy performance depends on the interaction of building form, envelope and microclimate.

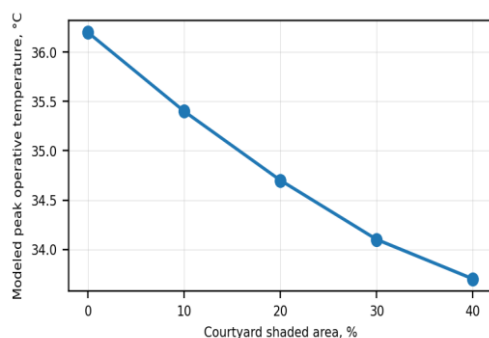


Fig. 2. Effect of shaded courtyard area on modeled peak operative temperature

Table 2
Passive architectural measures and their design implications

Measure	Design recommendation	Architectural effect
Orientation	Limit east/west glazing; use narrow east-west exposure	Lower solar heat gain
External shading	Deep reveals, screens, pergolas, balconies	Window protection

Ventilated roof	Air gap and reflective upper layer	Reduced roof heat flow
Wall envelope	Lightweight insulation or insulated masonry blocks	Stable indoor temperature
Courtyard	Trees, pergolas, permeable surfaces	Cool semi-open space

The relationship between courtyard shading and indoor comfort is important for hot-dry cities because courtyard housing is compatible with local spatial traditions. However, courtyards should not be designed as closed heat traps. They need controlled proportions, nighttime air exchange, shaded surfaces and vegetation selected for low water demand.

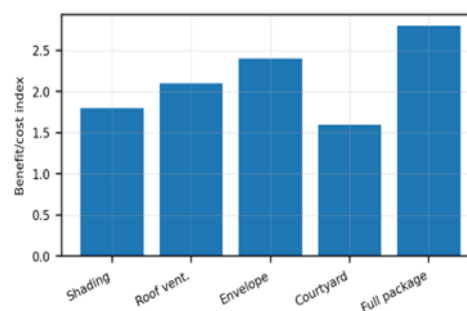


Fig. 3. Comparative benefit/cost index of passive cooling measures

Table 3
Recommended envelope targets for preliminary design

Component	Recommended solution	Target indicator
External wall	Insulated lightweight masonry or composite block	U-value < 0.55 W/(m ² ·K)
Roof	Ventilated and insulated roof build-up	U-value < 0.35 W/(m ² ·K)
Windows	Low solar-gain glass with external shade	WWR 20-30%
Openings	Opposite vents and secure night ventilation	ACH increase at night
Urban plot	Trees and shaded pedestrian edge	Shade > 40% of main path

Application in residential design practice

The proposed model can be applied at three levels. At the urban level, the orientation of streets and residential blocks should reduce prolonged solar exposure of east and west facades. At the block level, semi-open courtyards and shaded pedestrian passages should be arranged to support air movement rather than block it. At the building level, the envelope should be designed as a protective thermal filter



consisting of shaded windows, insulated walls, ventilated roofs and controllable openings.

A major advantage of passive cooling is that it can be implemented using local construction practices. Deep window reveals, balconies, perforated screens, verandas and courtyard galleries are compatible with regional architectural traditions. When these elements are combined with modern insulation and rational glazing, they create a bridge between cultural identity and energy efficiency.

The economic effect of passive measures is strongest when they are introduced during the design stage. Retrofitting external shading or roof ventilation is possible, but it is more expensive and less integrated. Therefore, municipal architectural guidelines should include a passive-cooling checklist for new residential districts.

Table 4
Passive-cooling checklist for preliminary architectural review

Criterion	Recommended check	Risk if ignored
Orientation	Long axis near east-west; minimize west glazing	High afternoon heat gain
Window shading	External shade for south/west windows	Overheating and glare
Roof protection	Ventilated or highly insulated roof	Strong ceiling heat flow
Courtyard comfort	Shade, vegetation, night flushing	Courtyard becomes heat trap
Natural ventilation	Cross-ventilation and secure night openings	Dependence on mechanical cooling

The limitations of the model should also be noted. The calculated indices are comparative and should be verified through thermal simulation, field measurements and post-occupancy evaluation. Nevertheless, the model is useful because it transforms general climate-responsive principles into a measurable decision-making tool for architects and planners.

4. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The study confirms that passive cooling should be treated as a system of mutually reinforcing measures. In hot-dry cities of Uzbekistan, the largest effect is achieved by combining orientation, external shading, roof ventilation, improved envelope insulation, controlled openings and shaded courtyards.

For architectural practice, the following recommendations are proposed: (1) introduce passive-

cooling checklists at the concept design stage; (2) regulate window-to-wall ratio and external shading for residential facades; (3) encourage ventilated roofs and reflective roof surfaces; (4) integrate courtyard microclimate into residential planning; (5) connect building-level cooling strategies with district-level green corridors.

The scientific contribution of the article is the formulation of an integrated passive-cooling index for early design comparison. The practical contribution is a compact checklist that can be used in residential design review, educational studios and pilot housing projects in hot-dry regions.

REFERENCES

- [1] UN-Habitat, World Cities Report 2024: Cities and Climate Action. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2024.
- [2] IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [3] V. Olgyay, Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. Princeton: Princeton University Press, 1963.
- [4] B. Givoni, Climate Considerations in Building and Urban Design. New York: Wiley, 1998.
- [5] C40 Cities, Urban Cooling Toolbox. London: C40 Knowledge Hub, 2021.
- [6] O. H. Koenigsberger, T. G. Ingersoll, A. Mayhew and S. V. Szokolay, Manual of Tropical Housing and Building. London: Longman, 1974.
- [7] WHO Regional Office for Europe, Urban Green Spaces and Health: A Review of Evidence. Copenhagen: WHO, 2016.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Urazxanova Elvira Assistant, Karakalpak state university
E-mail: elvira.razxanova@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-8846-1686>

Markabaeva Kundiz Assistant, Karakalpak state university
E-mail: qmarkabaeva@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-1710-8228>



Technological Efficiency of Modular Green Roof Systems for Operated Flat Roofs in Nukus Conditions

G. Dosjanova¹^a

¹Karakalpak state university, Nukus, Uzbekistan

Abstract: The paper examines the technological performance of modular green roof systems for operated flat roofs under the climatic and construction conditions of Nukus. The study combined regulatory review, comparative analysis of roof alternatives, functional and organizational modeling, and chronometric observations carried out for the installation of a modular greening system. An operated roof with a total area of 324 m² was taken as the reference object, while detailed timing measurements were performed for a 10 m² installation zone. The average duration of modular installation was 3.52 h per 10 m², and the total labor input was 10.56 person-hours, which corresponds to a rational crew of three workers. Comparative calculations for six constructive-technological alternatives showed that the modular option with 0.5 m modules achieved the best overall result: 167 person-hours and 18 shifts for the full roof, versus 231–233 person-hours and 20 shifts for pedestrian hard-surface alternatives. A system of efficiency indicators was used to separate the labor contribution of the multilayer substructure from that of the greening layer. The results show that the modular solution slightly increases the labor share of the green layer itself, but compensates for this by reducing labor in the supporting roof structure, shortening the work cycle, and improving maintainability.

Keywords: Modular green roof; operated flat roof; labor intensity; technological efficiency; chronometric observation; Nukus; organizational and technological modeling

1. INTRODUCTION

Cities in arid regions do not have the luxury of treating the roof as a passive enclosure only. In Nukus, where dense development, dust-laden winds, sharp summer overheating, and limited land resources act at the same time, the roof increasingly becomes a reserve urban surface. Yet the question is not simply whether a roof can be greened. The more practical question is how such a roof can be built without turning the technology into an expensive and slow construction exercise.

Most published work on green roofs focuses on thermal behavior, environmental benefits, drainage, or plant selection. Those issues are essential, but they do not fully answer a contractor's everyday concerns: how many operations are needed, which stage concentrates the highest labor input, what crew is rational, and which variant is more manageable during installation and maintenance. This gap becomes especially visible when operated roofs are compared with pedestrian hard-surface roofs and with continuously greened roofs.

The purpose of this study was to substantiate a constructive-technological solution for modular greening of operated flat roofs and to evaluate its efficiency through measured process parameters. The article relies on the final dissertation materials devoted to the technology of constructing roof coverings used together with greening systems and presents them in a compact journal format.

2. MATERIALS AND RESEARCH METHODS

The research combined several mutually connected methods. First, the normative and scientific background of green construction, operated roofs, and roof retrofitting was reviewed. Second, six alternative constructive-technological variants were compared: two pedestrian roof solutions (V1A, V1B), two continuously greened roof solutions (V2A, V2B), and two modular green roof solutions (V3A, V3B). Third, the process structure of modular installation was decomposed into individual operations and formalized through organizational and technological modeling.

Chronometric observations were then carried out for a 10 m² installation zone of a modular greening system. The measured operations covered marking, placement of adjustable supports, slope correction, fixation of connectors, laying of the grating deck, module anchoring, and filling with substrate and planting material. The study used average duration, labor input, crew composition, and stability of the time series as the main process indicators.

For the full-scale comparison of roof alternatives, an operated flat roof with an area of 324 m² was accepted as the reference object. This made it possible to compare not only local installation operations, but also the labor contribution of the multilayer roof substructure and the upper operating or greening layer. The evaluation logic intentionally separated these two groups because in practice they behave differently: some solutions reduce labor in the upper layer but overload the substructure, while others do the reverse.

^a <https://orcid.org/0009-0009-8649-0592>



Technological framework for the modular green roof

The proposed modular roof system is built around adjustable supports, a grating deck, detachable modules, geotextile containment, substrate, and vegetation. This arrangement was selected for three reasons. First, it protects the waterproofing layer from direct repeated mechanical stress. Second, it creates a technical gap where irrigation lines and service elements can be placed without dismantling the whole roof build-up. Third, it allows damaged modules to be replaced locally, which is an important practical advantage for roofs exposed to strong sun and wind.

From a construction standpoint, the process is divided into three stages. The first stage forms the working base and the adjustable support system. The second stage creates a stable deck. The third stage installs the greening modules and fills them with substrate and planting material. This staged logic is simple enough for site control, but detailed enough to support chronometric measurement and crew planning.

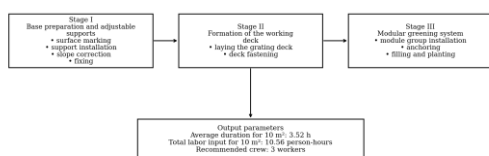


Fig. 1. Staged technological framework for constructing an operated flat roof with a modular greening system

3. RESEARCH RESULTS

The chronometric observations showed that the installation process is not evenly distributed in time. Stage I, where the support system is laid out and adjusted, is the most time-consuming block. Within this stage, the adjustment of support slope takes the largest share because it directly affects future surface stability and water drainage. Stage II is comparatively compact, while Stage III combines medium-duration assembly operations with the physically heavier task of filling the modules.

The sum of the average operation durations reached 211 min, or 3.52 h for 10 m². With a total labor input of 10.56 person-hours, the rational crew size is obtained as:

$$N_z = T_{um} / t = 10.56 / 3.52 = 2.98 \approx 3 \quad (1)$$

In practical terms, this means one 3rd-grade roofer, one 2nd-grade roofer, and one 3rd-grade green-construction worker. That composition is balanced: the roof specialists carry the accuracy-sensitive operations, while the green-construction worker absorbs the operations connected with module preparation, anchoring, and filling.

Table 1

Average duration and labor input of modular roof installation operations (per 10 m²)

Operation	Stage	Average duration, min	Labor input, person-hours
Surface marking	Stage I	20	1.00
Support placement and gluing	Stage I	22	1.10
Slope adjustment of supports	Stage I	40	2.00
Fastener fixing	Stage I	14	0.70
Laying the grating deck	Stage II	26	1.25
Fixing the grating deck	Stage II	17	0.85
Installing a 4-module group	Stage III	22	1.10
Fixing the module group	Stage III	20	1.00
Filling with substrate and planting material	Stage III	30	1.50

The comparison of constructive-technological variants confirmed that the best local process indicator does not automatically produce the best full-roof result. Pedestrian hard-surface roofs remain relatively straightforward in their upper layer, yet they accumulate significant labor in heavy surface finishing. Continuously greened roofs reduce hard-surface operations, but the arrangement of the greening layer is less flexible in maintenance terms. The modular solutions redistribute work more evenly and reduce the labor intensity of the substructure, especially when smaller modules are used.

Among the six alternatives, V3B—the modular roof with 0.5 m modules—showed the lowest total labor intensity, 167 person-hours, and the shortest work cycle, 18 shifts. This is a strong result because it is achieved not by simplifying the roof function, but by reorganizing the technological chain. The work becomes more segmental, better suited to phased delivery, and easier to maintain after commissioning.

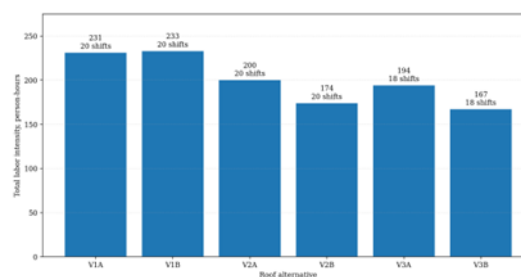


Fig. 2. Total labor intensity of the compared roof alternatives; duration is shown above the bars



Table 2
Comparative labor intensity and duration of constructive-technological roof alternatives

Variant	Description	Stage II: roof substructure, person-hours	Stages III+IV: upper layer and greening, person-hours	Total labor intensity, person-hours	Duration, shifts
V1A	Pedestrian roof, variant 1	86.6	45.0	231	20
V1B	Pedestrian roof, variant 2	89.3	45.0	233	20
V2A	Continuously greened roof, variant 1	71.6	29.1	200	20
V2B	Continuously greened roof, variant 2	51.8	22.9	174	20
V3A	Modular green roof, module diameter 1.0 m	59.6	35.1	194	18
V3B	Modular green roof, module diameter 0.5 m	36.6	31.1	167	18

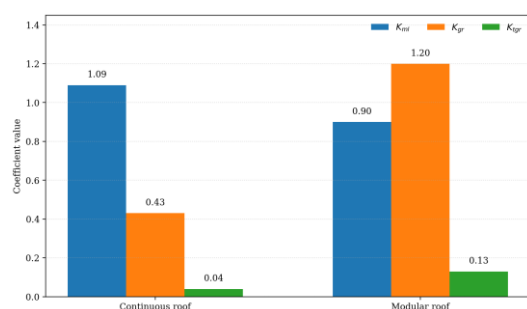


Fig. 3. Comparison of the efficiency indicators for the continuous and modular green roof solutions

Formalized efficiency assessment

To avoid a one-sided reading of total labor intensity, the assessment used three coefficients. The first describes the labor intensity of the multilayer roof structure, the second isolates the labor of the greening

system, and the third shows how large the labor share of the greening layer is within the entire roof technology.

$$K_{ml} = Q_{ml,i} / Q_{ml,av} \quad (2)$$

$$K_{gr} = Q_{gr,k} / Q_{gr,av} \quad (3)$$

$$K_{tgr} = Q_{gr,k} / (Q_{ml,i} + Q_{gr,k}) \quad (4)$$

For the continuously greened roof, the coefficients were obtained as 1.09, 0.43, and 0.04. For the modular roof, the corresponding values were 0.90, 1.20, and 0.13. These values deserve a careful reading. The modular system does demand more labor in the greening layer itself, which is why the greening coefficient rises above one. At the same time, it reduces labor in the multilayer roof base, which is why the multilayer coefficient drops below one. The overall share coefficient of 0.13 places the modular solution in the acceptable range and shows that the additional work connected with the green modules does not dominate the full technology.

DISCUSSION

For Nukus conditions, this result is more important than a simple reduction in person-hours. A roof technology that is easier to zone, easier to repair, and faster to execute is usually the safer and more durable option in a sharply continental climate. Wind exposure, rapid summer overheating, and the need for flexible irrigation all favor a system in which the roof can be serviced by fragments rather than as one monolithic layer.

This is where the modular approach shows its real strength. It does not eliminate work; instead, it shifts work from wet and difficult-to-correct site operations toward more controllable assembly operations. From the contractor's perspective, that means cleaner sequencing and less technological uncertainty. From the owner's perspective, it means easier replacement of damaged fragments and a more manageable service life.

The comparison also suggests that the main reserve for labor saving is often not in the visible green layer, but in the substructure beneath it. Once this is understood, design decisions become more rational. A seemingly simpler roof may in fact be less efficient if it relies on labor-intensive underlayers or heavy surface finishing.

4. CONCLUSION

1. The modular greening system for operated flat roofs can be organized as a clear three-stage technological process that is suitable for site control, crew planning, and phased execution.

2. Chronometric observations established an average duration of 3.52 h and a total labor input of 10.56 person-hours for a 10 m² modular installation zone, with a rational crew size of three workers.

3. In the full-roof comparison, the modular alternative with 0.5 m modules (V3B) produced the



best integral result—167 person-hours and 18 shifts—outperforming pedestrian and continuously greened alternatives.

4. The efficiency indicators make it possible to distinguish between the labor of the multilayer roof base and that of the greening layer, which leads to a more balanced technological assessment of roof alternatives.

REFERENCES

[1] Korol E.A., Shushunova N.S. Organizational and technological modeling of roofing processes with modular greening systems. Vestnik MGSU, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 250–261.

[2] Shushunova N.S. Analysis of technological parameters in the installation of inversion roofs with greening. Vestnik MGSU, 2018, vol. 13, no. 3, pp. 349–355.

[3] Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R.R., Doshi H., Dunnett N., Gaffin S., Köhler M., Liu K.K.Y., Rowe B. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. BioScience, 2007, vol. 57, no. 10, pp. 823–833.

[4] Getter K.L., Rowe D.B. The role of extensive green roofs in sustainable development. HortScience, 2006, vol. 41, no. 5, pp. 1276–1285.

[5] Castleton K.H., Stovin F., Beck V., Davison J.B. Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit. Energy and Buildings, 2010, vol. 42, no. 10, pp. 1582–1591.

[6] Feng C., Meng Q., Zhang Y. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. Energy and Buildings, 2010, vol. 42, no. 6, pp. 959–965.

[7] ShNQ 3.01.01-22. Organization of construction production.

[8] ShNQ 2.07.05-19. Green building. Residential and public buildings. Rating system for assessing sustainability of the living environment.

[9] Ginzburg A. Sustainable building life cycle design. MATEC Web of Conferences, 2016.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dosjanova
Guljaynar**

Karakalpak State university

E-mail:

g.dosjanova@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-8649-0592>



The Practical Importance of QGIS Technologies in Engineering Geological Mapping

Sh.R. Khalimova¹^a, A.M. Karabaev¹^b

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: Engineering geological mapping is essential for infrastructure planning, geohazard assessment, and sustainable urban development, particularly in rapidly urbanizing regions. The growing complexity of spatial data requires efficient tools capable of integrating and analyzing diverse geological and terrain information. This study evaluates the practical importance of QGIS, an open-source Geographic Information System, for engineering geological mapping using Tashkent city as a case study. A structured and reproducible workflow was developed by integrating geological maps, Digital Elevation Models (DEMs), and field-based observations within the QGIS environment. DEM-derived morphometric parameters, including elevation, slope, aspect, and hillshade, were analyzed to characterize terrain conditions and assess construction suitability. Spatial overlay techniques were applied to combine geological and morphometric factors, enabling the identification of areas with potential geotechnical constraints. The results indicate that QGIS significantly enhances the accuracy, efficiency, and interpretability of engineering geological analyses. Three-dimensional visualization and thematic mapping improved the understanding of terrain morphology and spatial relationships between geological factors, supporting more informed engineering decision-making. Overall, the study confirms that QGIS is a robust, cost-effective, and flexible platform for engineering geological mapping in urban environments.

Keywords: Engineering geological mapping; QGIS; Digital Elevation Model (DEM); morphometric analysis; slope analysis; spatial overlay; 3D visualization; geotechnical risk assessment; urban geology

1. INTRODUCTION

Engineering–geological mapping plays an important scientific and practical role in the planning of modern infrastructure projects, the assessment of geological hazards, and the sustainable development of territories. Reliable information on subsurface conditions, lithological composition, geomorphological structure, and hydrogeological characteristics is a decisive factor in ensuring the safety, stability, and long-term performance of construction facilities [1]. Under conditions of rapid urbanization and the expansion in scale of engineering structures, traditional mapping methods increasingly limit the possibilities for comprehensive analysis of spatial data.

Geographic Information Systems (GIS) have marked a new stage in the collection, processing, and analysis of spatial data in engineering geology. In particular, the open-source QGIS (Quantum Geographic Information System) platform stands out due to its user-friendly interface, extensive analytical capabilities, and continuous development supported by an active user community [1, 2]. QGIS enables the creation of digital geological maps, the integration of data obtained from various sources, and the implementation of spatial analyses required for informed engineering decision-making [3, 4].

The widespread use of QGIS in professional practice and educational processes demonstrates its


growing importance in engineering–geological mapping. Owing to its cost-effectiveness and high adaptability, it is increasingly being chosen by many organizations and research institutions as an alternative to licensed software solutions [7, 8]. This study is aimed at analyzing the practical significance of QGIS technologies in engineering–geological mapping, as well as their application potential, advantages, and limitations.

Literature review

Over the past decades, the use of Geographic Information Systems (GIS) in the fields of geology and engineering sciences has expanded significantly, becoming one of the principal scientific tools for digital geological mapping, geotechnical investigations, and the assessment of natural hazards [1, 11, 16]. According to the scientific literature, the transition from traditional paper-based mapping methods to GIS-based digital environments has enabled more accurate data representation, improved spatial consistency, and enhanced reproducibility of analytical results in engineering geology [12, 23]. This, in turn, has contributed to the development of a reliable scientific basis for engineering decision-making.

A number of studies emphasize that QGIS (Quantum Geographic Information System), as an open-source GIS platform, is capable of competing functionally with commercial software such as ArcGIS [8, 15, 17]. Researchers highly evaluate QGIS

^a <https://orcid.org/0000-0002-4753-390X>

^b <https://orcid.org/0000-0002-9880-8547>



for its analytical capabilities, data processing efficiency, and visualization quality, while particularly highlighting that its open-source ecosystem allows for flexible expansion in accordance with user needs [2, 10]. The absence of licensing costs is identified as a key factor driving the widespread adoption of QGIS by higher education institutions, governmental geological services, and engineering consulting organizations, especially in developing countries [7, 8, 16].

The scientific literature extensively documents the effectiveness of QGIS in visualizing and interpreting complex geological data, including lithological units, networks of tectonic faults, stratigraphic boundaries, and hydrogeological objects [11, 12, 13]. The platform enables the integration of vector and raster data within a single environment, allowing geological maps to be analyzed together with digital elevation models (DEM), satellite imagery, and geotechnical borehole data [1, 6]. This capability ensures a comprehensive and systematic approach to engineering–geological assessments.

The extensive plugin ecosystem of QGIS further broadens its practical applicability. Scientific studies report the effective use of plugins such as GeoTrace, QGIS2threejs, as well as tools oriented toward geostatistical analysis and spatial modeling in engineering–geological research [2, 10, 24]. These plugins facilitate the identification of spatial orientations of geological structures, the assessment of slope stability, and the visualization of terrain morphology in both 2D and 3D environments [10, 18]. This is of critical importance for improving the understanding of geological processes and for the early assessment of engineering hazards.

Applied studies confirm the significance of QGIS in landslide susceptibility assessment, urban area planning, and the implementation of large-scale infrastructure projects [7, 9, 16, 18]. In landslide-prone areas, GIS-based modeling has contributed to the identification of high-risk zones by integrating geomorphological, geological, and climatic factors, thereby providing a foundation for the development of engineering measures aimed at risk mitigation [18]. Furthermore, studies conducted in the field of urban planning demonstrate that QGIS is effective in analyzing land-use dynamics, forecasting infrastructure demands, and implementing “smart city” concepts [16, 19].

At the same time, the literature also identifies certain limitations associated with the use of QGIS in engineering–geological mapping. Data accuracy and reliability remain among the primary challenges, as GIS analyses are highly dependent on the quality, resolution, and timeliness of input data [12, 20]. In addition, interoperability issues between GIS platforms and engineering software such as CAD and BIM often require complex format conversions, which

may result in additional time and cost expenditures during project workflows [16, 20].

Another frequently cited challenge is the shortage of highly qualified GIS specialists in the fields of civil and geotechnical engineering [20, 21]. Although GIS technologies are widely taught in environmental and urban planning disciplines, their full integration into engineering education programs has not yet been sufficiently achieved in many regions. This situation indicates that, despite the significant technical and economic advantages of QGIS, its effective application requires systematic professional training, standardized data practices, and institutional support.

In summary, the existing literature confirms that QGIS technologies possess strong scientific and practical potential in engineering–geological mapping. At the same time, addressing issues related to data quality, professional training, and software interoperability emerges as a critical prerequisite for the more effective application of QGIS in engineering practice.

Data collection method

Engineering–geological mapping implemented using QGIS is based on the integration of spatial and non-spatial data. Commonly used data types include geological maps, digital elevation models (DEM), satellite imagery, field survey records, and GPS-based point observations [1, 6].

Data are typically collected from open geospatial repositories, national geological services, and field investigations. Prior to analysis, the data undergo preprocessing stages such as coordinate system standardization, data cleaning, and attribute verification. Quality control measures include the validation of spatial data through comparison with field observations and the verification of results using comparative analysis methods [1].

The integration of GPS technologies within the QGIS environment enables real-time positioning during fieldwork, thereby enhancing the accuracy and reliability of geological data collection [6]. This synergy between remotely sensed data and field-based observations provides a solid foundation for the effective implementation of engineering–geological analyses.

2. METHODOLOGY

In this study, the methodology for applying QGIS technologies to engineering–geological mapping was structured around a systematic and reproducible workflow. The methodological approach comprises several key stages:

Stage 1. Data collection and preparation. Spatial and non-spatial data required for engineering–geological analysis were collected from open geospatial sources, national geological services, and the results of field investigations. These data included geological maps, digital elevation models (DEM),



satellite imagery, geotechnical borehole data, and GPS-based point observations [1, 6]. All datasets were transformed into a unified coordinate reference system, attributes were verified, and data cleaning procedures were performed.

Stage 2. Integration of data into the QGIS environment. The prepared datasets were imported into QGIS in both vector and raster formats. At this stage, data obtained from various sources were integrated within a single environment, ensuring spatial compatibility and topological consistency [7]. This process provided a reliable spatial database for subsequent analyses.

Stage 3. Terrain and morphometric analysis. Based on the DEM, terrain parameters were calculated, including elevation, slope, and aspect, as these indicators are essential for assessing land suitability for construction and identifying geological hazards [1]. The morphometric analyses served as a fundamental basis for engineering decision-making.

Stage 4. Geological and structural analysis. Geological units, tectonic structures, and fault networks were generated as thematic layers. Using specialized QGIS plugins such as GeoTrace, structural elements were digitized, and their orientations and three-dimensional characteristics were evaluated based on the DEM [10]. This stage enabled a more in-depth analysis of the spatial structure of the geological environment.

Stage 5. Hazard assessment and thematic map production. Based on the analytical results, thematic maps illustrating hazard-prone areas (e.g., zones of low slope stability) were produced. Overlay analysis of multiple spatial layers was employed to identify areas posing engineering risks, and their spatial distribution was visualized [2].

Stage 6. Validation and visualization of results. The analysis outcomes were validated through comparison with field data and presented in a clear and interpretable form using visualization tools. Both 2D and 3D visualization techniques were applied to create maps suitable for use in the engineering decision-making process.

The selected workflow enables high spatial accuracy, efficient data integration, and reproducibility of geological analyses within the open-source QGIS environment. This approach serves as a reliable methodological framework for supporting scientifically grounded decision-making and the proactive assessment of hazards in engineering-geological mapping.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The application of QGIS technologies in engineering geological mapping significantly enhanced the efficiency, accuracy, and interpretability of spatial analyses. DEM-based morphometric analysis provided a detailed representation of the terrain

structure and elevation variability within the study area. As illustrated in Fig. 1, the spatial distribution of key morphometric parameters—such as elevation, slope, aspect, and hillshade—clearly reflects the geomorphological characteristics of Tashkent city. These parameters form the fundamental basis for engineering geological assessment and support the identification of terrain conditions relevant to construction suitability.

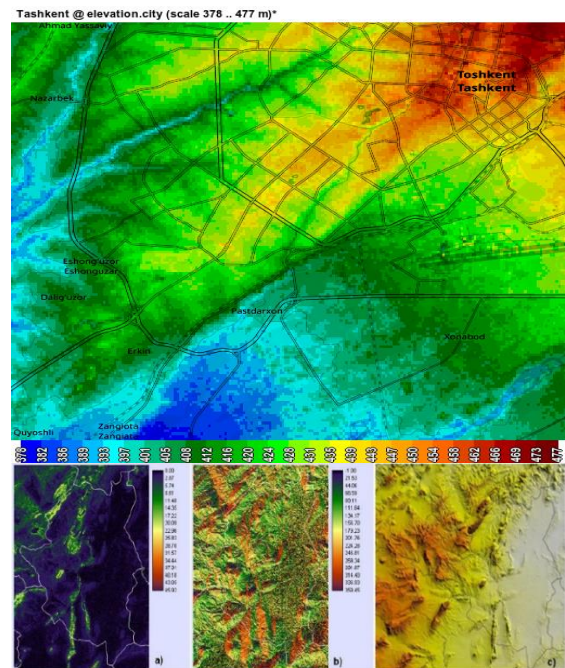
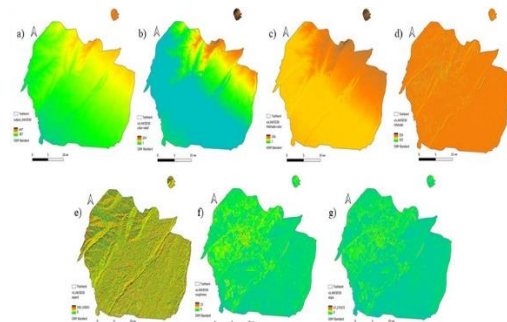


Fig. 1. DEM-based morphometric analysis of Tashkent city including elevation, slope, aspect, and hillshade maps used for engineering geological assessment

Slope analysis derived from DEM data proved to be a critical factor in evaluating geotechnical constraints. The slope gradient map presented in Fig. 2 highlights areas characterized by varying slope classes, allowing the identification of zones with increased susceptibility to geotechnical hazards. Areas with higher slope gradients were recognized as potentially unfavorable for construction due to an elevated risk of slope instability, ground deformation, and related engineering challenges. This analysis demonstrates the importance of slope as a key indicator in engineering geological risk assessment.



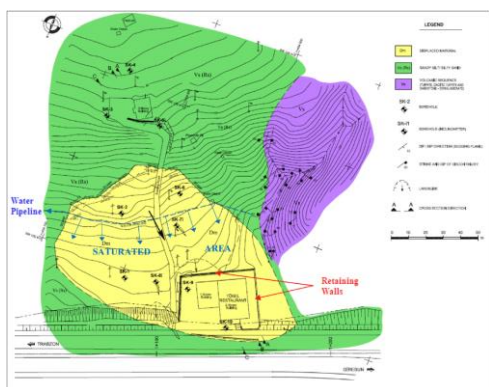


Fig. 2. Slope gradient map of Tashkent city derived from DEM data, highlighting areas with varying slope classes and potential geotechnical constraints

An integrated engineering geological evaluation was achieved through overlay analysis of geological units, structural features, and DEM-derived morphometric parameters. The resulting integrated map, shown in Fig. 3, provides a comprehensive spatial representation of hazard-prone and relatively stable zones across the study area. This integrated approach enables a more holistic understanding of subsurface and surface conditions, supporting informed decision-making in infrastructure planning and development.

Overall, the results confirm that QGIS offers a robust and flexible framework for engineering geological mapping. The combination of DEM-based morphometric analysis (Fig. 1), slope assessment (Fig. 2), and integrated spatial evaluation (Fig. 3) demonstrates the effectiveness of QGIS in analyzing complex geological environments. These capabilities contribute to improved risk identification, enhanced visualization, and scientifically grounded engineering decisions, reinforcing the practical value of QGIS in modern engineering geological applications.

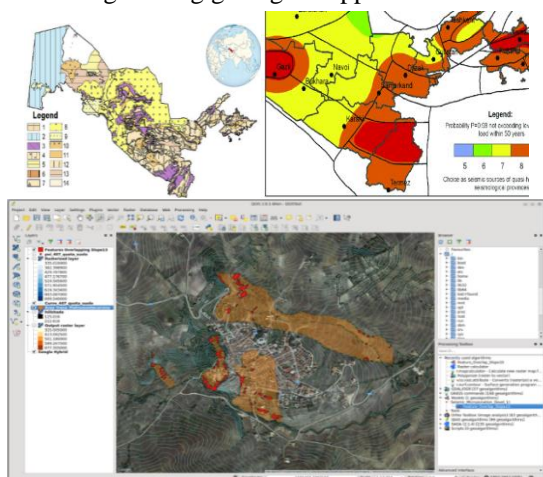


Fig. 3. Integrated engineering geological risk map of Tashkent city based on overlay analysis of geological units and DEM-derived terrain parameters

4. CONCLUSION

The results of this study demonstrate that QGIS technologies have significant practical value in engineering-geological mapping by effectively supporting spatial analysis, data integration, and visualization processes. As an open-source and economically efficient platform, QGIS provides extensive opportunities for making scientifically grounded decisions and ensuring sustainable infrastructure development in the fields of geology and engineering.

At the same time, the integration of QGIS with artificial intelligence, machine learning, the Internet of Things (IoT), and cloud-based GIS platforms has the potential to further enhance its role in predictive modeling, automated analysis, and collaborative geological research in the future. This, in turn, will contribute to safer and more sustainable decision-making in engineering practice.

REFERENCES

- [1] Erharter G., et al. Geological Maps with QGIS: A New Guideline for Digital Geological Mapping. 2023. Available as PDF.
- [2] Hatari Labs. 5 Best QGIS Plugins You Should Know About. Available at: <https://hatarilabs.com/ih-en/5-best-qgis-plugins-you-should-know-about>
- [3] Boxer G. Using QGIS in Mineral Exploration. Draft Report, 2023.
- [4] Krumm C. Q1 2023: 3 Maps I Made Using QGIS 3.30 & the Lessons I Learned. LinkedIn Pulse, 2023. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/q1-2023-3-maps-i-made-using-qgis-330-lessons-learned-claire-krumm>
- [5] QGIS in Mineral Exploration. Using QGIS for Geological and Mineral Exploration Applications. Available at: <https://qgis-in-mineral-exploration.readthedocs.io/en/latest>
- [6] Mergin Maps. Open-Source Geological Mapping with the British Geological Survey. Available at: <https://merginmaps.com/case-studies/open-source-geological-mapping-with-british-geological-survey>
- [7] GIS Cloud. GIS Mapping and the Benefits of Online Solutions. Available at: <https://www.giscloud.com/blog/gis-mapping-and-benefits-of-online-solutions>
- [8] ialeUK. Mapping and the Benefits of QGIS. Available at: <https://iale.uk/mapping-and-benefits-qgis>
- [9] Erharter G.H., Steinbichler M., Eder M., Hintersberger E., Jaeger D. A New Guideline for Geological Maps with QGIS // Austrian Journal of Earth Sciences. 2023. Vol. 116. P. 147–150. <https://doi.org/10.17738/ajes.2023.0008>



[10] QGIS Plugin Repository. GeoTrace: Geological Structure Tracing and Orientation Analysis Plugin. Available at: <https://plugins.qgis.org/plugins/GeoTrace>

[11] Hatari Labs. Open Webinar: How to Make a Geological Map with QGIS (April 27–29, 2021). Available at: <https://hatarilabs.com/ht-en/open-webinar-how-to-make-a-geological-map-with-qgis-apr-27-29-2021>

[12] Encardio Rite Group. GIS in Civil Engineering: Applications, Benefits, and Future Trends. Available at: <https://dev.encardio.com/blog/gis-in-civil-engineering>

[13] Bedrock Engineering. Viewing Geotechnical Data in QGIS. Available at: <https://bedrock.engineer/guides/viewing-qgis>

[14] QGIS Geo Mapping Masterclass (Video). Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=py78PmQNURA>

[15] GIS for Geologists. Why Learn to Use QGIS? Available at: <https://www.gisforgeologists.com/pages/why-learn-to-use-qgis>

[16] Encardio-Rite. GIS in Civil Engineering: Applications, Benefits, and Future Trends. Available at: <https://dev.encardio.com/blog/gis-in-civil-engineering>

[17] Forr M.B. Why QGIS Still Matters, Even If You're Beyond the Basics. LinkedIn Post. Available at: https://www.linkedin.com/posts/mbforr_why-qgis-still-matters-even-if-youre-beyond-activity-7381523739336937472-iJZV

[18] Mathew B.V., Jayakrishnan R., Chandran A., Pranav A., Rishikesh V.S. GIS-Based Landslide Mapping and Analysis Using QGIS: A Study in Palakkad, Kerala // International Journal of Engineering and Management Research. 2025. Vol. 15, No. 1. P. 142–150. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15070403>

[19] QGIS Plugin Repository. Geology Plugins for QGIS. Available at: <https://plugins.qgis.org/plugins/tags/geology>

[20] Encardio. GIS in Civil Engineering: Applications, Benefits, and Future Trends. Available at: <https://www.encardio.com/blog/gis-in-civil-engineering>

[21] New Zealand Geotechnical Society (NZGS). Geotechnical Investigations Using QGIS Software. Available at: <https://www.nzgs.org/event/geotechnical-investigations-using-qgis-software>

[22] Mittal A., Pandey G., Siddiqui N.A., Mondal P., Molokitina N.S. QGIS: An Effective Tool in Assessing the Quantity and Quality of Groundwater Resources // Water Supply. 2025. Vol. 25, No. 1. P. 48–64. <https://doi.org/10.2166/ws.2025.004>

[23] Perret J., Jessell M.W., Bétend E. An Open-Source, QGIS-Based Solution for Digital Geological Mapping: GEOL-QMAPS // SSRN Electronic Journal. 2024. 27 p. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4814451

[24] Carroll Engineering. Enhancing Civil Engineering with GIS Models. Available at: <https://www.carrollengineering.com/enhancing-civil-engineering-with-gis-models>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sh.R. Khalimova

Tashkent State Transport University, the Department of Urban infrastructure engineering and artificial intelligence

E-mail: xalimova_sh@tstu.uz

Tel.: +998 95 833 01 37

<https://orcid.org/0000-0002-4753-390>

A.M. Karabaev

Tashkent State Transport University, the Department of Construction of Buildings and Industrial Structures

Tashkent State Transport University, the Department of Urban infrastructure engineering and artificial intelligence

E-mail: karabaev_a@tstu.uz

Tel.: +998 95 957 19 51

<https://orcid.org/0000-0003-3691-1079>



Integrating Roadside Greening and Urban Microclimate into Pedestrian Accessibility Assessment: A Case Study of Tashkent City

J.I. Sodikov¹^a, K.N. Musulmanov¹^b and A.D. Adizov¹^c

¹Tashkent State Transport University, Uzbekistan

Abstract: Rapid urbanization has intensified the urban heat island (UHI) effect, particularly in hot-climate cities, affecting pedestrian mobility and comfort. While roadside greening provides important environmental benefits, its role in transport accessibility remains underexplored. This study develops a climate-sensitive accessibility model by integrating roadside vegetation and microclimate factors in Tashkent city. Remote sensing data (LST and NDVI) and GIS-based network analysis were used to assess thermal conditions and walking accessibility (5, 10, and 15 minutes). A Thermal Comfort Index (TCI) was developed to incorporate temperature, vegetation, and shading into accessibility evaluation. Results show that conventional models overestimate accessibility by ignoring environmental conditions. High-temperature, low-vegetation areas have reduced real accessibility, while green and shaded corridors improve pedestrian conditions. The study proposes a new framework linking greening, microclimate, and transport accessibility, supporting more sustainable and climate-responsive urban planning.

Keywords: Urban Heat Island (UHI), Roadside Greening, Pedestrian Accessibility, Urban Microclimate, GIS-Based Analysis, Thermal Comfort, Climate-Sensitive Accessibility, Land Surface Temperature (LST), NDVI, Sustainable Urban Planning

1. INTRODUCTION

Rapid urbanization and the expansion of transport infrastructure have significantly transformed urban environments worldwide. Modern cities are increasingly characterized by dense road networks, high traffic volumes, and extensive impervious surfaces, which collectively contribute to environmental challenges such as air pollution, increased surface temperatures, and the urban heat island (UHI) effect. These issues are particularly pronounced in rapidly developing cities, where transport planning has traditionally prioritized vehicular mobility and efficiency, often at the expense of environmental and human-centered considerations.


Urban roads are not only mobility corridors but also important public spaces where people are directly exposed to environmental conditions. In this context, roadside environments play a crucial role in shaping urban microclimates and influencing human comfort. Numerous studies have demonstrated that vegetation, particularly trees and structured green elements along streets, can significantly reduce air temperature through shading and evapotranspiration, thereby mitigating the negative impacts of UHI. For example, roadside vegetation has been shown to lower land surface temperatures and improve thermal conditions at the pedestrian level, especially in dense urban areas where heat accumulation is most severe [1].

Beyond thermal regulation, roadside greenery is increasingly recognized as an integral component of urban green infrastructure. It provides multiple ecosystem services, including carbon sequestration, air pollutant removal, stormwater management, and biodiversity support. Recent studies highlight that roadside forests and vegetation belts can store substantial amounts of carbon, reduce atmospheric pollutants, and contribute to climate-resilient urban development [2]. In addition, vegetation barriers along roads can reduce pedestrian exposure to traffic-related pollutants by influencing airflow and enhancing particulate deposition, thereby improving public health outcomes [3].

At the same time, the relationship between roadside greening and pedestrian comfort has gained increasing attention. Thermal comfort is a key determinant of outdoor activity, particularly walking behavior in urban environments. Street-level conditions such as shading, tree canopy coverage, and spatial configuration of vegetation significantly influence perceived and actual comfort. Studies have shown that tree shading can reduce pedestrian heat exposure and improve the usability of urban spaces, especially during extreme heat conditions [4]. However, most of these studies focus on environmental or design aspects, without explicitly linking these factors to transport accessibility.

Transport accessibility is traditionally defined in terms of travel time, distance, and network

^a <https://orcid.org/0000-0002-4005-9766>

^b <https://orcid.org/0000-0001-8906-9909>

^c <https://orcid.org/0009-0008-2988-4061>



connectivity. Conventional models, including isochrone-based analyses, assume that all routes within a given distance or time threshold are equally accessible. However, this assumption does not reflect real-world conditions, particularly in hot climates where thermal stress can significantly influence pedestrian movement. In cities such as Tashkent, where summer temperatures frequently exceed 35–40°C, walking behavior is strongly affected by environmental conditions such as shade availability and surface temperature.

Despite the growing body of research on urban greening, microclimate, and ecosystem services, there remains a critical gap in integrating these aspects with transport accessibility analysis. Existing studies tend to examine vegetation effects, thermal comfort, or transport systems in isolation, with limited efforts to develop a unified framework that captures their interdependencies. In particular, the influence of roadside greening on “real” pedestrian accessibility—defined not only by distance but also by environmental comfort—has not been sufficiently addressed.

Therefore, this study aims to bridge this gap by integrating roadside greening into urban transport and microclimate systems. Using the case of Tashkent city, the research evaluates how vegetation structure, thermal conditions, and street-level environmental factors influence pedestrian accessibility. The study proposes a climate-sensitive approach to accessibility assessment, in which roadside greening is treated as a key variable affecting both environmental quality and transport usability. By doing so, it contributes to the development of more sustainable, resilient, and human-centered urban transport planning frameworks.

2. LITERATURE REVIEW

Urban road corridors are increasingly recognized not only as transport infrastructure but also as multifunctional ecological systems. Previous studies indicate that roadside vegetation provides a wide range of ecosystem services, including microclimate regulation, air pollution mitigation, carbon sequestration, and improvement of pedestrian comfort [1–3].

Roadside vegetation plays a critical role in regulating urban thermal environments. Li et al. [1] demonstrated that the structure and composition of vegetation significantly influence land surface temperature (LST), with tree-dominated areas producing the strongest cooling effects in dense urban environments. Similarly, urban greenery enhances thermal comfort through shading and evapotranspiration, thereby reducing pedestrian exposure to heat stress [4].

From a green infrastructure perspective, roadside vegetation is an essential component of sustainable urban systems. Niu et al. [2] highlighted that roadside

forests contribute to biodiversity, climate regulation, and urban resilience, while also providing measurable ecosystem services such as carbon storage, air pollutant removal, and stormwater interception. Moreover, the effectiveness of roadside greening varies depending on road type, suggesting that context-specific planting strategies are required rather than uniform approaches.

In addition, vegetation acts as a natural barrier that reduces exposure to traffic-related air pollution. Barwise and Kumar [3] emphasized that the effectiveness of vegetation barriers depends on plant characteristics such as leaf structure, density, and spatial configuration. These findings underline the multifunctional role of roadside greenery in improving both environmental quality and human well-being.

Despite these advances, a significant research gap remains. Most studies focus on the environmental and ecological aspects of roadside vegetation, while transport accessibility is typically assessed using distance, travel time, and network connectivity. Such approaches neglect thermal conditions, shading, and pedestrian-level comfort, which are particularly important in hot-climate cities such as Tashkent.

Therefore, this study aims to integrate roadside greening into transport accessibility and microclimate analysis by incorporating environmental comfort factors into accessibility assessment, thereby developing a climate-sensitive approach to urban mobility evaluation.

3. DATA COLLECTION METHOD

This study integrates multi-source spatial, environmental, and transport datasets to analyze the relationship between roadside greening, microclimate conditions, and urban transport accessibility in Tashkent city. The overall data collection and integration framework is presented in Figure 1.

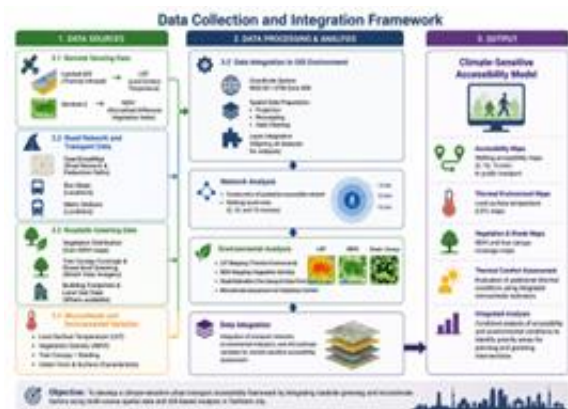


Fig. 1. Integrated Framework for Data Collection, Processing, and Climate-Sensitive Accessibility Analysis

The figure illustrates the workflow of the study, including data sources (remote sensing, transport, and greening data), GIS-based processing, network analysis, environmental assessment, and the development of a climate-sensitive accessibility model.

3.1. Remote Sensing Data

To assess the urban thermal environment, satellite imagery was used to derive Land Surface Temperature (LST) and vegetation indices. Landsat 8/9 thermal infrared bands were utilized to calculate LST, while Sentinel-2 imagery was employed to compute the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which represents vegetation density and distribution. These datasets provide medium-resolution (10–30 m) spatial coverage suitable for city-scale analysis.

3.2. Road Network and Transport Data

The urban road network and pedestrian-accessible paths were extracted from OpenStreetMap (OSM). Public transport data, including bus stops and metro stations, were collected from available geospatial datasets and local sources. These data were used to construct a network-based accessibility model, including walking isochrones (5, 10, and 15 minutes).

3.3. Roadside Greening Data

Roadside vegetation characteristics were assessed using a combination of spatial and visual data sources. Vegetation distribution was derived from NDVI maps, while additional information on tree canopy coverage and street-level greening was obtained through street-view imagery and GIS-based interpretation. Where available, building footprints and land-use data were also incorporated to better represent urban morphology affecting shading and microclimate conditions.

3.4. Microclimate and Environmental Variables

In addition to LST and NDVI, environmental variables influencing pedestrian comfort were considered. These include surface temperature, vegetation density, and proxy indicators of shading, such as tree canopy coverage and urban form. These variables were used to evaluate the thermal conditions experienced by pedestrians at the street level.

3.5. Data Integration

All datasets were processed and integrated within a Geographic Information System (GIS) environment. Spatial layers were harmonized to a common coordinate reference system (WGS 84 / UTM Zone 42N) and analyzed using network analysis tools. The integration of remote sensing data, transport networks, and environmental indicators enabled the development of a climate-sensitive accessibility framework.

4. METHODOLOGY

This study proposes an integrated framework that combines urban transport accessibility analysis with microclimate and roadside greening factors. The methodology consists of four main stages: (1) data preprocessing, (2) conventional accessibility modelling, (3) environmental factor assessment, and (4) development of a climate-sensitive accessibility model.

4.1. Data Preprocessing and Spatial Framework

All spatial datasets were processed in a GIS environment. The road network, public transport stops, and environmental layers (LST, NDVI, vegetation coverage) were projected into a unified coordinate system (WGS 84 / UTM Zone 42N). Raster datasets were resampled to a consistent spatial resolution (30 m) to ensure compatibility.

The study area (Tashkent city) was divided into analysis units based on a regular grid system. Each grid cell was assigned environmental attributes, including land surface temperature, vegetation index, and proximity to green infrastructure.

4.2. Network-Based Accessibility Analysis

Accessibility was calculated using a network-based approach. The pedestrian-accessible road network was used to generate walking isochrones (5, 10, and 15 minutes) around public transport stops.

The conventional accessibility index was defined as:

$$A_{network} = \sum_{i=1}^n W_i$$

where:

W_i - accessibility weight based on walking time threshold.

This model assumes equal accessibility within a given time threshold, without considering environmental conditions.

4.3. Environmental and Microclimate Assessment

To incorporate environmental conditions, two key indicators were used:

- **Land Surface Temperature (LST)** – representing thermal exposure
- **Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)** – representing vegetation density

Additionally, proxy indicators such as tree canopy coverage and urban form (building density) were used to estimate shading conditions.

A **Thermal Comfort Index (TCI)** was developed to represent the environmental suitability for pedestrian movement:

$$TCI = \omega_1 * (1 - LST_{norm}) + \omega_2 * NDVI_{norm} + \omega_3 * Shade$$

Where:

LST_{norm} - normalized land surface temperature

$NDVI_{norm}$ - normalized vegetation index



Shade- shading indicator (tree canopy / urban morphology)

ω_1 ; ω_2 ; ω_3 - weighting coefficients

4.4. Climate-Sensitive Accessibility Model

To reflect real pedestrian behavior, environmental factors were integrated into the accessibility model.

The proposed **real accessibility index** is defined as:

$$A_{real} = A_{network} * (1 + \lambda TCI)$$

λ - environmental sensitivity coefficient.

This formulation adjusts conventional accessibility by incorporating thermal comfort and environmental quality.

In this model:

- areas with high temperature and low vegetation → reduced accessibility
- areas with shading and high greenery → increased accessibility

4.5. Spatial Analysis and Mapping

The final stage involved spatial overlay analysis to combine accessibility and environmental layers. The results were visualized using GIS-based maps, including:

- conventional accessibility maps
- thermal comfort distribution
- climate-sensitive accessibility maps

Comparative analysis was conducted to identify differences between traditional and environmentally adjusted accessibility patterns.

4.6. Validation and Interpretation

The model results were interpreted in relation to urban structure, road types, and distribution of green infrastructure. Particular attention was given to identifying:

- areas with high accessibility but low thermal comfort
- areas where greening significantly improves accessibility

5. RESULTS AND DISCUSSION

5.1. Spatial Distribution of Urban Thermal Environment

The analysis of Land Surface Temperature (LST) and vegetation density (NDVI) in Tashkent city reveals a strong relationship between urban thermal conditions and the spatial distribution of greenery. High-temperature zones are mainly concentrated along major road corridors, densely built-up districts, and areas with limited vegetation coverage. In contrast, urban areas characterized by higher vegetation density demonstrate noticeably lower surface temperatures.

The results indicate that roadside greenery and urban vegetation contribute significantly to mitigating thermal accumulation within the urban environment. Areas with continuous vegetation cover and tree canopy exhibit improved thermal conditions compared to impervious and highly urbanized

surfaces. These findings confirm the important role of green infrastructure in reducing urban heat exposure and improving environmental comfort in transport-oriented urban spaces.

5.2. Conventional Accessibility Patterns

Network-based accessibility analysis shows that a large portion of the study area falls within 5–10 minute walking distance to public transport stops. According to the traditional model, these areas are considered highly accessible due to their proximity and connectivity within the road network.

However, this model assumes uniform conditions across all routes and does not account for environmental factors such as heat stress or shading.

5.3. Thermal Comfort Distribution

The Thermal Comfort Index (TCI) results indicate significant spatial differences in environmental suitability for pedestrian movement. Areas with high vegetation density and shading demonstrate higher TCI values, indicating more comfortable conditions. Conversely, zones characterized by high LST and low vegetation show low TCI values, reflecting unfavorable thermal conditions.

The results highlight that thermal comfort is not evenly distributed and is strongly influenced by the presence and structure of roadside greenery.

5.4. Climate-Sensitive Accessibility

When environmental factors are integrated into the accessibility model, significant changes are observed. The climate-sensitive accessibility (A_{real}) shows a reduction in accessible areas in zones with high temperatures and low vegetation.

In contrast, green corridors and streets with continuous tree canopy coverage maintain higher accessibility levels even under high-temperature conditions. This demonstrates that roadside greening can effectively enhance real pedestrian accessibility by improving thermal comfort.

5.5. Comparative Analysis

A comparison between conventional accessibility ($A_{network}$) and climate-sensitive accessibility (A_{real}) reveals that traditional models overestimate accessibility in heat-exposed areas. In several locations, areas classified as accessible under the network-based model become partially or fully inaccessible when thermal conditions are considered.

This discrepancy is particularly evident in central urban zones and major road corridors lacking sufficient greenery.

5.6. Key Findings

The results of this study demonstrate that:

- Urban heat significantly reduces real pedestrian accessibility
- Roadside vegetation improves thermal comfort and enhances accessibility
- Accessibility is strongly dependent on environmental conditions, not only distance and time



— Traditional accessibility models fail to capture spatial inequalities caused by microclimate factors.

DISCUSSION

The results of this study demonstrate that urban transport accessibility cannot be fully understood without considering environmental conditions, particularly microclimate and roadside greening. While conventional network-based models classify large areas as accessible based on distance and travel time, the integration of thermal and vegetation factors reveals significant spatial differences in real accessibility.

The findings confirm that roadside vegetation plays a critical role in shaping the urban thermal environment and pedestrian experience. Consistent with previous studies, areas with higher vegetation density and tree canopy coverage exhibit lower temperatures and improved thermal comfort. This is mainly due to shading effects and evapotranspiration processes, which reduce solar radiation exposure and ambient temperature at the street level. As a result, these areas support more favorable conditions for walking and outdoor activities.

In contrast, zones characterized by high land surface temperatures and limited vegetation demonstrate reduced environmental suitability for pedestrian movement. These areas, often located along major road corridors and dense urban structures, are subject to intensified urban heat island effects. The results suggest that such conditions can discourage walking behavior, even when transport infrastructure is physically accessible. This highlights a critical limitation of traditional accessibility models, which assume uniform conditions across all routes.

The integration of the Thermal Comfort Index (TCI) into accessibility analysis provides a more realistic representation of urban mobility. The comparison between conventional accessibility and climate-sensitive accessibility clearly shows that environmental factors can significantly modify accessibility patterns. In particular, the presence of continuous roadside greenery and shaded routes enhances accessibility, while heat-exposed areas experience a reduction in effective accessibility.

These findings have important implications for urban planning and transport policy. First, they emphasize the need to move beyond purely network-based approaches and incorporate environmental quality into accessibility assessment. Second, they highlight the strategic importance of roadside greening as a tool for improving both environmental conditions and transport usability. Rather than being treated as an aesthetic or secondary element, vegetation should be considered an integral component of transport infrastructure.

Furthermore, the results support the concept of climate-sensitive urban planning, where green infrastructure is used to mitigate the negative impacts

of urban heat and improve human well-being. In the context of Tashkent, where summer temperatures frequently exceed 35–40°C, integrating greening into transport systems is particularly important for ensuring sustainable and inclusive mobility.

Despite these contributions, the study has several limitations. The use of remotely sensed data may not fully capture micro-scale variations in shading and thermal conditions at the pedestrian level. In addition, the Thermal Comfort Index is based on selected indicators and weighting assumptions, which may require further calibration using field measurements or behavioral data. Future research should focus on incorporating real-time climate data, pedestrian surveys, and high-resolution 3D urban models to improve the accuracy of climate-sensitive accessibility analysis.

6. CONCLUSION

This study demonstrates that urban transport accessibility cannot be accurately assessed without considering environmental conditions, particularly microclimate and roadside greening. While conventional accessibility models rely on distance and travel time, they fail to capture the influence of thermal stress and environmental quality on pedestrian movement.

By integrating remote sensing data, GIS-based network analysis, and environmental indicators, this research developed a climate-sensitive accessibility model for Tashkent city. The results show that high temperatures and low vegetation coverage significantly reduce real pedestrian accessibility, whereas shaded and green corridors enhance walking conditions and improve accessibility. This highlights the critical role of roadside vegetation in mitigating urban heat and supporting more comfortable pedestrian environments.

The study contributes to the existing literature by linking three traditionally separate domains—transport accessibility, urban microclimate, and green infrastructure—into a unified analytical framework. It introduces a Thermal Comfort Index (TCI) to adjust accessibility based on environmental conditions, providing a more realistic representation of urban mobility.

From a practical perspective, the findings emphasize that roadside greening should be treated as an essential component of transport infrastructure rather than a purely aesthetic element. In hot-climate cities such as Tashkent, integrating vegetation into road design and planning can significantly improve thermal comfort, promote walking, and enhance overall urban sustainability.

In conclusion, the proposed climate-sensitive approach offers a valuable tool for urban planners and decision-makers to design more resilient, livable, and environmentally responsive transport systems. Future



research should focus on incorporating high-resolution data, field-based measurements, and behavioral analysis to further refine accessibility models and better understand the interaction between environment and human mobility.

Climate adaptation and planning implications

The findings of this study highlight the importance of integrating environmental factors, particularly roadside greening and microclimate conditions, into urban transport planning. Based on the results, several policy recommendations can be proposed to improve pedestrian accessibility and support sustainable urban development in Tashkent.

Integration of Greening into Transport Infrastructure

Urban planning policies should recognize roadside vegetation as an essential component of transport infrastructure rather than a purely aesthetic element. Municipal authorities should incorporate tree planting and green corridors into road design standards, especially along major pedestrian routes and public transport access paths.

Climate-Sensitive Accessibility Planning

Transport accessibility assessments should move beyond traditional distance- and time-based approaches by incorporating environmental indicators such as temperature, shading, and vegetation coverage. Planning guidelines should adopt climate-sensitive accessibility models to ensure that pedestrian routes remain usable under extreme heat conditions.

Development of Shaded Pedestrian Networks

Priority should be given to the creation of shaded walking corridors connecting residential areas to public transport stops. Continuous tree canopy coverage, combined with appropriate urban design elements, can significantly improve thermal comfort and encourage walking behavior, particularly during summer periods.

Strategic Placement of Public Transport Stops

The location of bus stops and metro access points should consider not only network efficiency but also environmental conditions. Stops should be placed in areas with adequate shading and vegetation or be equipped with artificial shading structures where natural greenery is insufficient.

Targeted Greening in High-Temperature Zones

High-temperature areas identified through LST analysis should be prioritized for greening interventions. These zones, often located along major road corridors and densely built environments, require targeted planting strategies to reduce thermal stress and improve environmental quality.

Adoption of GIS-Based Decision Support Systems

Urban planning institutions should implement GIS-based tools that integrate transport, environmental,

and climatic data. Such systems can support evidence-based decision-making and enable the identification of priority areas for greening and infrastructure improvements.

Climate Adaptation and Urban Resilience Strategies

Given the increasing frequency of extreme heat events, roadside greening should be included as a key component of climate adaptation policies. Integrating green infrastructure into transport systems can enhance urban resilience, reduce heat-related risks, and improve overall quality of life.

REFERENCES

- [1] Li, B.; Xing, H.; Cao, D.; Yang, G.; Zhang, H. Exploring the Effects of Roadside Vegetation on the Urban Thermal Environment Using Street View Images. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 1272. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031272>
- [2] Niu, W.; Yu, X.; Ding, L. Urban Roadside Forests as Green Infrastructure: Multifunctional Ecosystem Services in a Coastal City of China. *Forests* 2025, 16, 1841. <https://doi.org/10.3390/f16121841>
- [3] Barwise, Y., Kumar, P. Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: a practical review for appropriate plant species selection. *npj Clim Atmos Sci* 3, 12 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0115-3>
- [4] Ni, Y.; Lin, L.; Xia, H.; Wang, X. Urban Street Greening and Resident Comfort: An Integrated Approach Based on High-Precision Shadow Distribution and Façade Visual Assessment. *Sustainability* 2025, 17, 1026. <https://doi.org/10.3390/su17031026>
- [5] Sodikov, J. (2026). Biophilic Urban Streetscapes: GIS-Based Approaches for Nature-Driven Placemaking in Uzbekistan. In: Cheshmehzangi, A., Alidoust, S., Chen, W.Y., Fuller, R. (eds) *Designing Nature into Cities. Urban Sustainability*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-95-9382-8_4

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Jamshid Sodikov Tashkent State Transport University, Urban infrastructure engineering and artificial intelligence, Tashkent, Uzbekistan
E-mail: sodiqov_j@tstu.uz
<https://orcid.org/0000-0002-4005-9766>

Kuvonchbek Musulmanov Tashkent State Transport University, Urban infrastructure engineering and artificial intelligence, Tashkent, Uzbekistan



E-mail:

musulmanov_kuvonchbek@tstu.uz

<https://orcid.org/0000-0001-8906-9909>

**Dilshodbek
Adizov** Tashkent State Transport
University, Urban infrastructure
engineering and artificial
intelligence, Tashkent, Uzbekistan
E-mail: adizov_d@tstu.uz
<https://orcid.org/0009-0008-2988-4061>



Resource-Efficient Designs and Organizational-Technological Solutions for Reinforcing the Subgrade in Sandy Soils

K.S. Lesov¹^a, Sh.A. Tadjibaev¹^b

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This article examines current issues in enhancing the stability and load-bearing capacity of the subgrade for transport structures built in the complex engineering and geological conditions of sandy soils. It also analyzes the main deformation factors inherent to desert regions, including wind erosion and low soil cohesion. The paper proposes a set of resource-saving structural elements and organizational-technological solutions based on the use of modern geosynthetic materials and methods for stabilizing local barchan sands. These proposed technologies make it possible to significantly reduce transportation costs for imported soils and to minimize environmental damage. The practical significance of this work lies in the development of effective process flow diagrams that ensure the durability of the subgrade while optimizing material and technical expenditures.

Keywords: Earthwork, sandy soils, resource conservation, structural solutions, soil stabilization, volumetric geogrid, geotextile, arid zone

Ресурсосберегающие Конструкции и Организационно-Технологические Решения Усиления Земляного Полотна в Песчаных Грунтах

К.С. Лесов¹^a, Ш.А. Таджибаев¹^b

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В статье рассматриваются актуальные вопросы повышения стабильности и несущей способности земляного полотна транспортных сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях песчаных грунтов. А также проанализированы основные деформационные факторы, присущие пустынным регионам, включая ветровую эрозию и низкую связность грунтов. Предложен комплекс ресурсосберегающих конструктивных элементов и организационно-технологических решений, основанных на применении современных геосинтетических материалов и методов стабилизации местных барханных песков. Предлагаемые технологии позволяют существенно снизить транспортные расходы на доставку привозных грунтов и минимизировать экологический ущерб. Практическая значимость работы заключается в разработке эффективных технологических схем, обеспечивающих долговечность земляного полотна при оптимизации материально-технических затрат.

Ключевые слова: Земляное полотно, песчаные грунты, ресурсосбережение, конструктивные решения, стабилизация грунтов, объемная георешетка, геотекстиль, аридная зона

1. ВВЕДЕНИЕ


В мире уделяется особое значение развитию строительного комплекса транспортной инфраструктуры, обеспечению безопасности железных дорог в сложных условиях, повышению устойчивости при возведении насыпи земляного полотна в технической системе «верхнее строение пути – земляное полотно – основание», укреплению откосовнасыпи, разработке перспективных ресурсосберегаемых методов и технологий по

противодефляционному и противодеформационному укреплению [1-3].

А также большое внимание уделяется на разработку новых конструкций по повышению устойчивости железнодорожной насыпи, возведенной из песчаных грунтов, укреплению откосов земляного полотна, уменьшению дефляций и деформаций грунтов насыпи и совершенствованию технологии работ по укреплению откосов [3-5].

Однако низкая эффективность существующих методов противодефляционной и

^a <https://orcid.org/0000-0002-9434-0713>

^b <https://orcid.org/0000-0001-9748-2568>



противодеформационной (ПДПД) защиты земляного полотна, возведённого из песчаных грунтов, а также проблемы развития транспортного строительства в регионах, где в естественных условиях залегают песчаные грунты, занимающие значительную часть территории Узбекистана, требуют решения ряда сложных научных задач [6].

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

С целью научного решения вышеуказанных проблемы на основе приказа председателя правления АО «Узбекистон темир йуллари» от 2020 года № 729-Н «О проведении экспериментальных исследований по укреплению откосов земляного полотна на участке ж.д. линии Бухара–Мискен» были проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования по применению современных энергосберегающих и ресурсосберегающих материалов для укрепления откосов земляного полотна проведены на перегоне Кийикли – Хизирбобо км 4199 ПК 1 железнодорожной линии Бухара – Мискен (Рисунок 1-2).

Для научного экспериментов выбраны геосинтетические материалы, разработанные местным производителем ООО «SANFA ENGINEERING».

В эксперименте на откосы земляного полотна железнодорожного пути было уложено 1400 м² геотекстиля и 1200 м² объемных георешетки. Для крепления геосинтетических материалов откосу земляного полотна использовались арматурные анкеры общей длиной 2400 метров.



Рис. 1. Процесс укладки геосинтетических материалов на откос земляного полотна



Рис. 2. Процесс заполнения ячеек георешеток уложенных на откосы местным грунтом и посев семян пескостойких трав

При проектировании новых железных дорог, строящихся в пустынных районах Узбекистана, АО «Боштранслойиха» разработана технологическая схема укрепления земляного полотна в песчаных грунтах. По данной технологической схеме предусмотрено укрепление откосов насыпи с устройством бермы и укладкой растительного грунта толщиной 0,15 м (Рисунок 3).

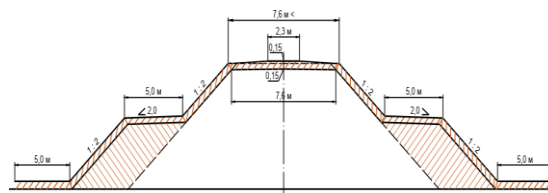


Рис. 3. Технологическая схема укрепления земляного полотна на песчаных грунтах, разработанная АО «Боштранслойиха»

В целях обеспечения устойчивости земляного полотна железных дорог, возведенных из барханных песков с применением инновационных технологий на основе «Программа и методика экспериментальных исследований по укреплению откосов земляного полотна железных дорог» путем укладки геосинтетических материалов (геотекстиль, объемная георешетка) разработана конструктивно-технологическая схема противодеформационного и противодеформационного укрепления (Рисунок 4).



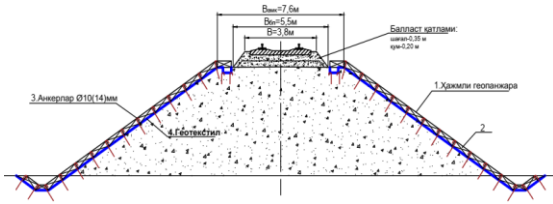


Рис. 4. Конструкция насыпи с укреплением геосинтетическими материалами 1-георешетка (объемная), 2-заполнение местным грунтом ячеек георешеток (посевом семян пескoлюбивых трав), 3- анкер арматурный, 4- геотекстиль нетканый

Геосинтетические материалы укладываются по подготовительному слою или слою растительного грунта, выполняя операции в соответствии с технологической схемой выполнения работ

Технологический процесс укрепления откосов земляного полотна геосинтетическими материалами приведен на рис. 5

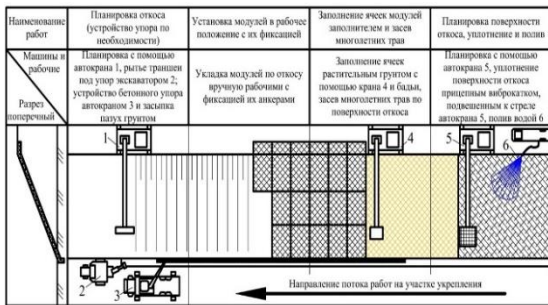


Рис. 5. Технологический процесс укрепления откосов земляного полотна геосинтетическими материалами

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ УКРЕПЛЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА, ВОЗВЕДЕННОГО ИЗ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

На основе проведенных экспериментальных исследований и полученных выводов рассмотрим методы расчета устойчивости откосов земляного полотна с использованием геосинтетических материалов.

Вместе с тем, актуальной задачей, требующей комплексного подхода, является выбор типа полотна, его оценка и обеспечение устойчивости откосов. Значение коэффициента устойчивости земляного полотна во всех случаях должно быть $K \geq 1,2$ [7-8].

Для теоретического расчета коэффициента устойчивости откосов насыпи земляного полотна используем формулу, разработанной проф. Г.М.Шахунянц [9].

$$K = \frac{\sum M_{\text{тр}}}{\sum M_{\text{сил}}} = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i l_i + f_i N_i + T_{\text{т}})}{\sum T_{\text{сил}}} \tag{1}$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i l_i + f_i N_i + T_{\text{тр}} + T_{\text{г.о.п}} + T_{\text{г.о.т}})}{\sum T_{\text{сил}}} \tag{2}$$

При использовании формулы (1) результатов расчета показывает, что нормативное значение коэффициента устойчивости откосов насыпи $K \geq 1,2$ обеспечивается в грунтах кроме песчаных.

При расчете коэффициента устойчивости откосов с укреплением геосинтетическими материалами необходимо в формулу (1) внести изменения и добавить предлагаемые удерживающие силы $T_{\text{г.о.р}}$ и $T_{\text{г.о.т}}$, который будет учитывать силы, действующие на каждой i-й ячейке георешетки и геотекстиля.

После этого с формула (1) получили следующий формула (2).

При расчете коэффициента устойчивости откосов земляного полотна с добавлением удерживающих силы $T_{\text{г.о.р}}$ и $T_{\text{г.о.т}}$ суммарная удерживающая сила повышается. В результате этого коэффициент устойчивости $K_{\text{уст}}$ повышается и всегда обеспечивает требуемое условие $K \geq 1,2$.

При расчете сил, действующих на каждой i-й ячейке георешетки возникают удерживающие силы от георешетки $T_{\text{г.о.р}}$, согласно расчетной схеме и имеет следующий вид формулы:

$$T_{\text{г.о.р}} = \sum_{i=1}^n (c_{\text{иг}} l_{\text{иг}} + f_{\text{иг}} N_{\text{иг}}) \tag{3}$$

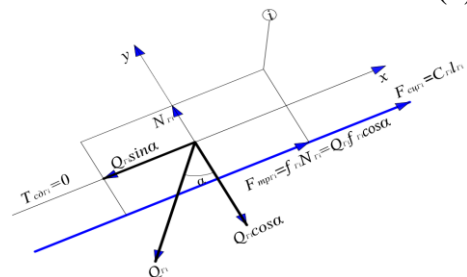


Рис. 6. Расчетная схема сил, действующие на каждой i-й ячейке георешетки

Удерживающая сила $T_{\text{г.о.т}}$ принимает следующий вид.

$$T_{\text{г.о.т}} = d \cdot l \cdot \gamma \cdot \cos \alpha + a \cdot b \cdot \gamma \tag{4}$$

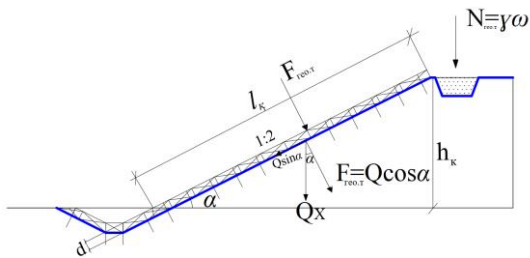


Рис. 7. Расчетная схема сил, действующие на геотекстиль

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Под действием неблагоприятных природно-климатических, гидрологических, техногенных и других факторов в грунтах тела земляного полотна происходят дестабилизирующие процессы, которые вызывают остаточные деформации основной площадки и откосов земляного полотна. Определено, что одним из перспективных и широко используемых в транспортном строительстве способов усиления земляного полотна является применение различных видов геосинтетических материалов.

2. Обосновано конкурентоспособность применения перспективных энергоэффективных и ресурсосберегаемых геосинтетических материалов (геотекстиль, объемная георешетка) при укреплении откосов земляного полотна.

3. Разработана программа и методика экспериментальных исследований по укреплению откосов земляного полотна, на основе мирового опыта применения различных инновационных технологий и материалов для совершенствования существующих, разработке новых конструкций земляного полотна при усилении земляного полотна железных дорог.

4. Определено увеличение удерживающей силы $T_{\text{уд}}$ на 18-25 % при укреплении откосов земляного полотна возведенного из песчаных грунтов геосинтетическими материалами за счет дополнительных расчетных параметров $T_{\text{геот.р}}$ и $T_{\text{геот.т}}$. В результате этого коэффициент устойчивости повышается на 14-23 % и обеспечивает требуемое условие $K \geq 1,2$.

5. Определены уменьшение затрат труда и материалов на 14 -18 % при выполнении работ по укреплению откосов земляного полотна с геосинтетическими материалами.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

[1] Lesov K.S., Tadjibayev Sh.A. Qumli gruntlardan barpo qilingan temir yo'l yer polotnosi ustivorligini oshirishda zamonaviy innovatsion texnologiyalarni qo'llash. "Arxitektura, qurilish va

dizayn" ilmiy – amaliy jurnal Toshkent.TAQU. maxsus son №2 2023 y. 212-215 b.

[2] Лесов К.С., Кенжалиев М.К., Мавланов А.Х., Таджибаев Ш.А. Stability of the embankment of fine sand reinforced with geosintetic materials. E3S Web of Conferences 264, 02011 (2021) CONMECHYDRO-2021. Tashkent, Uzbekistan.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126402011>

[3] Лесов К.С., Таджибаев Ш., Кенжалиев М.К. Технология укрепления откосов земляного полотна железных дорог из песчаных грунтов с применением геосинтетических материалов Проблемы архитектуры и строительства (научно-технический журнал. №4, 2019, Самарканд, СамГАСИ, С. 15-18.

[4] Лесов К.С., Кенжалиев М.К., Таджибаев Ш.А. Определение устойчивости насыпи земляного полотна железных дорог возведенного из мелких песков. Международная научно-техническая конференция «Глобальное партнерство - как условие и гарантия устойчивого развития» II том. Ташкент, 21-23 ноября 2019. С. 248-252.

[5] Lesov K.S., Tadjibayev Sh.A. Matematik modellashirish orqali geosintetik materiallar bilan mustahkamlangan temir yo'l yer polotnosi qiyaliklarining ustivorligini oshirish. "Me'morchilik va qurilish muammolari" ilmiy-texnik jurnal.Samarqand.SamDAQU, №3 2023 y. 79-82 b

[6] Закиров Р. С., Омаров А.Д. Противодеформационное укрепление земляного полотна из песчаного грунта в Казахстане. Алматы: «Гылым», 1999- 164 с.

[7] Жабко А. В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. анализ, характеристика и классификация существующих методов расчета устойчивости откосов // Известия Уральского государственного горного университета. Научно – технической журнал. Екатеринбург, 2015 г. №4 (40), С 45-57

[8] Маковский Е. Анализ моделей расчета устойчивости откосов земляного полотна // Жел. дороги мира. 1984. № 3. С. 66-78.

[9] Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь: учебник для вузов ж.-д. трансп. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лесов
Кувандик
Сагинович

Заведующий кафедрой
"Инженерия железных
дорог", Ташкентский
государственный



транспортный университет
E-mail: kuvandikl@mail.ru
Tel.:+99899 876 19 63
<https://orcid.org/0000-0002-9434-0713>

Таджибаев Доцент кафедры
Шерзод "Железнодорожная
Амиркулович инженерия," Ташкентский
государственный
транспортный университет
E-mail:
sherzod140585@mail.ru
Tel.:+99893 293 51 20
<https://orcid.org/0000-0001-9748-2568>



Management of Transformation Processes in Uzbekistan's Railway Industry: Challenges, Solutions, and Initial Results

U. Dosmetov¹

¹JSC «Uzbekiston temir yullari», Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This article analyzes the initial results of transformation processes in Uzbekistan's railway industry. It examines in detail the goals, key areas, initial experiences, and results of transformation processes across the entire network of UTY. It also describes the specifics of managing transformation processes based on current regulations, analyzes existing problems, adopted solutions, and the initial changes achieved. In recent years, important policy documents have been adopted at the government level to transform the operations of UTY. Strategic objectives have been defined at the industry, regional, and national levels, and roadmaps and plans have been developed for structural changes in the industry, the implementation of major investment projects for the construction of new lines, and the reconstruction and electrification of railways, based on an introduction of advanced international practices in transformation processes. The experience of managing transformation processes in the industry, the analysis of project implementation problems and the comprehensive solutions considered by the author have important practical significance for the industry and make it possible to avoid complications in managing transformation processes in the railway industry in the future.

Keywords: Railway industry, transformation, project's implementation, management of processes, executive directives, consulting.

Управление Процессами Трансформации в Железнодорожной Отрасли Узбекистана: Проблемы, Решения и Первые Итоги

Досметов У.С.¹

¹АО «Узбекистон темир йуллари», Ташкент, Узбекистан

Аннотация Статья посвящена анализу первых результатов процессов трансформации в железнодорожной отрасли Узбекистана. Подробно рассматриваются цели, основные направления, начальный опыт и итоги процессов трансформации по всей сети АО «Узбекистон темир йуллари» (АО УТЙ), а также описаны особенности управления процессами трансформации на базе действующих нормативных актов, анализированы существующие проблемы, принятые решения и достигнутые первичные изменения. Для трансформации деятельности АО УТЙ в последние годы на правительственном уровне приняты важные директивные документы. На отраслевом, региональном и республиканском уровнях были определены стратегические задачи, составлены дорожные карты и планы по структурным изменениям в отрасли, реализации крупных инвестиционных проектов строительства новых линий, реконструкции и электрификации железных дорог на основе внедрения передового зарубежного опыта процессов трансформации. Опыт управления процессами трансформации в отрасли, анализ проблем реализации проектов и рассмотренные автором комплексные решения имеют важное отраслевое практическое значение, позволяют избежать осложнений в управлении процессами трансформации железнодорожной отрасли в будущем.

Ключевые слова: Железнодорожная отрасль, трансформация, реализация проектов, управление процессами, директивные документы, консалтинг.

1. ВВЕДЕНИЕ

АО «Узбекистон темир йуллари» (АО УТЙ), является важнейшим структурообразующим звеном в формировании и развитии экономики Республики Узбекистан (РУз). Устойчивое развитие, стабильность, внедрение инновационных технологий, динамичное повышение темпов экономического и промышленного роста предприятий АО УТЙ создают благоприятные условия для развития

транспортной отрасли и всей экономики республики в целом. Отрасль продолжает свою активную деятельность по реализации новых и современных инвестиционных проектов, по модернизации и техническому перевооружению ранее построенных объектов инфраструктуры. Построены новые скоростные и высокоскоростные железнодорожные линии, завершается электрификация основных магистральных линий, такая работа продолжается



и по важным участкам, связанным с международными транспортными коридорами.

В статье рассматриваются первые результаты процессов трансформации в железнодорожной отрасли Узбекистана. Подробно описаны цели, основные направления, начальный опыт и итоги процессов трансформации по всей сети АО «Узбекистон темир йуллари» (АО УТЙ), а также раскрыты особенности управления процессами трансформации на базе действующих нормативных актов, анализированы существующие проблемы, принятые решения и достигнутые первичные изменения.

В основу статьи положена методология комплексного подхода и системного анализа процессов трансформации в железнодорожной отрасли. Теоретической основой для статьи приняты публикации исследователей, посвященные аспектам управления железнодорожными проектами в целом и управления процессами трансформации в организации, в частности. Методы исследований основаны на ознакомлении законодательными и нормативными документами, на сравнительном анализе плановых и фактически выполненных мероприятий.

- не ведущие к росту, как эффективности, так и безопасности;
- ведущие к росту эффективности, но не способствующие росту безопасности;
- ведущие к росту безопасности, но не способствующие росту эффективности;
- ведущие к росту, как безопасности, так и эффективности.

Разработанный комплекс диагностических средств контроля состояния узлов промежуточных скреплений относится к четвертой категории эффективности, поскольку обеспечивает повышение безопасности эксплуатации бесстыкового пути и обеспечивает снижение ущерба железнодорожному транспорту из-за предотвращения выбросов пути при движении всех видов поездов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Правительством РУз постоянно уделяется пристальное внимание к деятельности железнодорожного транспорта в целом и отраслевым процессам трансформации в частности. Принимая непосредственное участие в длительных процедурах подготовки, согласований и утверждений новых директивных документов по трансформации в различных вышестоящих инстанциях, зная и постоянно используя действующие директивные отраслевые материалы в повседневной работе, в качестве примеров

основных директив можем привести 3 документа [1,2,3]. В первом документе – Законе «О железнодорожном транспорте» от 30.09.2024г. - отражается система железнодорожного транспорта РУз в соответствии с требованиями современной рыночной модели. Закон направлен на развитие рыночных принципов в транспортной сфере, углубление экономических реформ, создание условий для предпринимательской деятельности в отрасли, широкое привлечение иностранных инвестиций, совершенствование международного сотрудничества в сфере железнодорожных перевозок. Второй документ - Постановление Президента УП-329 от 10.10.2023г. “О мерах по коренному реформированию сферы железнодорожного транспорта РУз”. Данный документ определил ряд актуальных и целевых задач отрасли на ближайшую перспективу –внедрение современных методов управления, эффективное использование транзитного потенциала железнодорожной сети республики, ускорение работ по трансформации и цифровизация бизнес-процессов, создание конкурентной среды, реформирование отрасли с вовлечением частного сектора и т.д.

Третий документ – Распоряжение Президента РУз №Ф-70 от 31.12.2024г. «Об ускорении процессов трансформации в железнодорожной сфере». В документе отмечено, что в целях повышения инвестиционной привлекательности железнодорожной сферы, создания более выгодных условий для развития частного сектора и ускорения процессов трансформации утверждается Дорожная карта с необходимостью внедрения современных подходов в управлении инвестиционными проектами, широкого привлечения международных финансовых организаций к проектам трансформации, обучения и повышения квалификации работников проектов трансформации, повышения ответственности руководящих работников отрасли за своевременное предоставление запрашиваемых привлеченными зарубежными консультантами сведений по трансформации. Предусмотрено создание рабочей группы с широкими полномочиями по реализации предусмотренных Дорожной картой мероприятий.

Основной целью трансформации и реформ в железнодорожной отрасли Узбекистана является внедрение современных бизнес-механизмов, которые способствуют развитию не только самой компании АО УТЙ, но и являются драйвером устойчивого развития всей экономики РУз. Приоритетом работы менеджмента отрасли остается бесперебойная работа железной дороги, повышение ее операционной эффективности и финансовой стабильности, клиентоориентированность и прозрачность



деятельности компании. Для реализации поставленных государством масштабных задач в отрасли разработана «Стратегия развития АО УТЙ - 2030», которая определяет целевые параметры развития компании. Главными направлениями ускорения процессов трансформации в железнодорожной сфере приняты:

- реорганизация процессов управления деятельностью АО УТЙ;
- цифровизация железнодорожного транспорта с разработкой стратегии АО УТЙ в данном направлении;
- совершенствование системы закупок с внедрением комплаенс-контроля;
- повышение операционной эффективности и сокращение затрат;
- обеспечение устойчивого развития на основе передового зарубежного опыта применения современных методов анализа деятельности отрасли;
- реализация проектов трансформации с привлечением международных финансовых институтов;
- реализация инфраструктурных проектов.

В качестве примера остановимся на реализации инфраструктурных проектов. Успешная реализация внутренних и зарубежных инвестиционных проектов железнодорожного строительства является наглядным показателем подрядной деятельности АО УТЙ. В Табл.1 приведен перечень завершенных силами строителей АО УТЙ железнодорожных проектов с 2005 года по настоящее время, строящихся объектов со сроком сдачи в эксплуатацию до 2027 года, а также трех новых проектов на стадии предпроектной подготовки. При этом заметно, что основной упор делается на проекты по электрификации - в Табл.1 видно, что из 15 крупных проектов 12 (80%), посвящены электрификации.

В результате целенаправленных усилий АО УТЙ по развитию железнодорожной сети, на начало 2026г. общая протяженность железнодорожных линий в Узбекистане составляет около 7,5 тыс. км, в том числе протяженность электрифицированных железнодорожных линий составляет более 50% сети. Недавно завершена электрификация и введено высокоскоростное движение на железнодорожной линии Бухара-Мискен-Ургенч-Хива с современным пассажирским подвижным составом производства Кореи, в настоящее время завершаются работы по электрификации и подготовке высокоскоростного движения на железнодорожной линии Мискен-Нукус.

Таблица 1
Завершенные, строящиеся и готовящиеся проекты железнодорожного строительства АО УТЙ

№	Наименование объекта	Годы реализации
1	Строительство новой железнодорожной линии (ж.д.л.) Тошгузар – Байсун - Кумкурган	2005-2008
2	Электрификация ж.д.л. Тукимачи – Ангрен	2005-2008
3	Строительство ж.д.л. Хайратон – Мазари-Шариф	2010-2011
4	Электрификация ж.д.л. Ташкент – Самарканд	2011-2013
5	Электрификация ж.д.л. Мароканд – Карши	2012-2015
6	Электрификация ж.д.л. Карши-Термез	2012-2017
7	Строительство новой ж.д.л. Ангрен-Пап	2014-2016
8	Электрификация ж.д.л. Самарканд-Бухара	2015-2017
9	Строительство новой ж.д.л. Бухара – Мискен	2016-2018
10	Электрификация ж.д.л. Пап-Наманган-Андижан	2017-2020
11	Электрификация ж.д.л. Пап – Коканд – Андижан	2022-2025
12	Электрификация ж.д. линий Бухара – Хива и Мискин – Нукус	2023-2027
13	Строительство новой отдельной электрифицированной ж.д.л. Ташкент-Самарканд для высокоскоростных пассажирских перевозок	Подготовка тендера по выбору подрядчика
14	Электрификация ж.д.л. Навои - Учкудук	На стадии ТЭО
15	Модернизация существующей линии и строительство вторых путей электрифицированной железнодорожной линии Ташкент – Ангрен	На стадии ТЭО

Проекты железнодорожного строительства независимо от направленности (новое строительство, вторые пути и реконструкция, электрификация) имеют отличительную инвестиционную особенность - во всех перечисленных проектах, наряду с местными компаниями, могут участвовать: 1) международные финансовые институты; 2) иностранные подрядчики, выполняющие



проектные и строительно-монтажные работы; 3) зарубежные поставщики материалов, конструкций и технологического оборудования, например, устройств сигнализации СЦБ, связи, систем SCADA и оборудования. Некоторые компании, например, отечественный участник многих проектов электрификации - АО Узэлектроаппарат, может совмещать несколько функций – проектировщика, поставщика и подрядчика – и занимается проектированием, изготовлением, комплектацией, поставкой, монтажом и наладкой оборудования тяговых подстанций для электрификации. По проектам, указанным в Табл.1 к первой группе зарубежных участников инвестиционного процесса можно отнести банковские субъекты международных финансовых институтов (МФИ) - Азиатский Банк Развития (АБР), Всемирный Банк (ВБ), Европейский Банк реконструкции и развития (ЕБРР) и другие фонды, уже многие годы тесно сотрудничающие с РУз и АО УТЙ. Ко второй группе участников - зарубежных подрядчиков - можно отнести (см.номера проектов из Табл.1): 1 – строительство и монтаж оборудования пяти металлических мостов, Япония; 3 – строительство афганского объекта «под ключ» с эксплуатацией, Узбекистан; 6 – монтаж сетей СЦБ и связи, США; 6 – монтаж систем SCADA, Китай; 7 – строительство и монтаж оборудования Камчикского тоннеля, Китай; 10 - монтаж сетей СЦБ и связи, Казахстан. К третьей группе относятся профильные зарубежные поставщики, например из России: 2, 4, 5 – оборудование для СЦБ и связи; 3, 7, 9 – рельсы и стрелочные переводы. По проектам 3, 4, 7 и 13 в части модернизации и поставок современных локомотивов, а также пригородных электропоездов для нужд АО УТЙ участвуют компании - поставщики из России, Испании, Китая, а с 2023 года по настоящее время – компании из Южной Кореи.

При участии в реализуемом проекте железнодорожного строительства хотя бы одного из зарубежных компаний перечисленных выше трех групп, в том числе при полном или долевом участии международных банков в финансировании проекта, данный проект приобретает статус международного инвестиционного проекта со всеми вытекающими отсюда юридическими последствиями. К таким последствиям относятся – заключение контрактов на основе требований стандартов (Книг) Международной Федерации инженеров-консультантов - FIDIC, реализация проекта под техническим надзором и контролем независимых зарубежных консалтинговых компаний, управление проектом на основе международных правил, рассмотрение возможных взаимных претензий участников проекта в международных

арбитражных инстанциях. Подробные сведения о международных требованиях и правилах, внедрении процедур и стандартов FIDIC при реализации инвестиционных проектов в АО УТЙ подробно изложены в работах [4,5], по управлению процессами трансформации в организации сведения изложены в работе [6].

Основными проблемами в реализации проектов трансформации в АО УТЙ являются отсутствие опыта внедрения современных бизнес-процессов в деятельность отрасли, недостаточный уровень цифровой составляющей процессов трансформации, вопросы обучения персонала, интеграции в международные рейтинговые структуры, структурные и корпоративные взаимоотношения в подразделениях, тарифная политика и технические проблемы, связанные с изношенностью подвижного состава. Решения указанных проблем отражены в мероприятиях, включенных в Дорожную карту с планами внедрения современных подходов в управлении инвестиционными проектами, широкого привлечения международных финансовых организаций и зарубежных консалтинговых компаний к проектам трансформации, обучения и повышения квалификации работников проектов трансформации, повышения ответственности руководящих работников отрасли за своевременное предоставление запрашиваемых привлеченными зарубежными консультантами сведений по трансформации.

В качестве примера решения отмеченных выше некоторых проблем можем отметить широкое международное сотрудничество по трансформации отрасли. АО УТЙ в финансировании проектов трансформации успешно сотрудничает с банковскими субъектами международных финансовых институтов (МФИ) в следующих направлениях трансформации:

Европейский Банк реконструкции и развития (ЕБРР) – по Проекту повышения уровня цифровизации АО УТЙ;

Всемирный Банк (ВБ) – по Проекту совершенствования тарифной политики АО УТЙ;

Азиатский Банк Развития (АБР) - по Проекту повышения оперативной эффективности железнодорожной инфраструктуры в Ташкентском регионе.

К непосредственной реализации процессов трансформации привлечены и успешно работают с АО УТЙ консалтинговые компании из первой «четверки» по мировому рейтингу:

PwC – по Проектам устранения недостатков финансовой отчетности АО УТЙ (совместно с компанией VERITAS), совершенствования тарифной политики АО УТЙ;

KPMG - по Проекту повышения уровня цифровизации;



FRANKLIN TEMPLETON – по Проектам совершенствования системы корпоративного управления в АО «Темирйулинфратузилма» по международным стандартам, создания возможностей для АО УТИ в привлечении финансовых средств на внешнем рынке, оказание помощи в получении Международного финансового рейтинга;

RAILISTICS и OLIVER WYMAN - по Проектам моделирования сети для определения «узких мест» в основных транспортных коридорах, разработки Программы развития АО УТИ на 2026-2030 годы, повышения оперативной эффективности железнодорожной инфраструктуры в Ташкентском регионе;

DELOITTE - по Проекту аудита финансовой отчетности АО УТИ в соответствии с требованиями Международных стандартов финансовой отчетности и Международных стандартов аудита.

По мероприятиям и планам Дорожной карты по ускорению процессов трансформации в железнодорожной отрасли были решены более 100 актуальных отраслевых вопросов, входящих в главные семь направлений трансформации АО УТИ. Первичными выборочными результатами огромной работы специалистов АО УТИ по трансформации за 2025-2026 годы являются:

- разработана целевая операционная модель АО УТИ;

- разработана программа симуляции транспортных потоков ДЛЯ совершенствования процессов грузоперевозок;

- разработана новая тарифная методология с учетом регулируемых тарифов услуг железнодорожного транспорта;

- разработана Стратегия цифровизации АО УТИ;

- разработана автоматизированная информационная система ускоренного управления грузоперевозками;

- разработаны и утверждены План мероприятий по поэтапному охвату сети АО УТИ оптоволоконной инфраструктурой;

- разработана целевая операционная модель по услугам грузоперевозок;

- продолжают работы по повышению транзитного потенциала на железнодорожном транспорте;

- продолжают работы по поэтапному переходу к электронному документообороту и автоматизированному обмену информацией о грузоперевозках с соседними странами;

- продолжают работы по повышению эффективности управления инвестиционными проектами и оптимизации капитальных затрат;

- разработана целевая операционная модель управления инвестиционными проектами капитального строительства в АО УТИ и т.д.

3. ВЫВОДЫ

Изложенные выше анализ целей, задач, основных направлений и первичных результатов управления проектами трансформации в железнодорожной отрасли Узбекистана, изучение проблем и практических вопросов реализации проектов трансформации на основе внедрения современных бизнес-процессов в деятельность отрасли показали реальную и плодотворную деятельность АО УТИ в исполнении утвержденных правительством задач по трансформации железнодорожной отрасли Узбекистана. Обобщенный в статье практический опыт реализации проектов трансформации актуален не только для железнодорожной отрасли Узбекистана. Предлагаемые в статье апробированные решения проблем управления проектами трансформации позволяют заранее прогнозировать возможные проблемы, принять и реализовать оптимальные и упреждающие мероприятия, не допускать в будущем такие проблемы при реализации проектов трансформации и в других отраслях экономики Узбекистана.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

[1] Закон РУз «О железнодорожном транспорте» от 30.09. 2024г. - <https://www.gazeta.uz/ru/2024/10/02/railway/>

[2] Постановление Президента РУз №УП-329 от 10.10.2023г. “О мерах по коренному реформированию сферы железнодорожного транспорта РУз”. –Ташкент: Сборник постановлений РУз, lex.uz. – 2023г.

[3] Распоряжение Президента РУз №Ф-70 от 31.12.2024г. «Об ускорении процессов трансформации в железнодорожной сфере». – Ташкент: Сборник постановлений РУз, lex.uz. – 2024г.

[4] Мирахмедов М.М. и др. Вопросы применения международных стандартов ФИДИК в железнодорожных инвестиционно-строительных проектах. Известия С.-Петербург-го университета путей сообщения. –С.Петербург., Вып.1. С.62-71. 2018г.

[5] Досметов У.С. и др. Управление проектами электрификации железных дорог Узбекистана: опыт, проблемы и решения. - Москва, Universum: Технические науки. Вып.11(128). – <https://universum.com/ru/tech.,> С.32-40. 2024г.

[6] Жерегеля А.В. Управление бизнес-процессами организации в контексте цифровой трансформации // Управление.Т.11.№1.С.105-112. 2023г.



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ /
INFORMATION ABOUT THE
AUTHORS**

Досметов Начальник Управления
Улугбек трансформации АО Узбекистон
Султанович темир йуллари,
E-mail: u.dosmetov@railway.uz
Тел: +998903183666



Forecasting the Fatigue Life of Rails R65 Using Digital Technologies and Artificial Intelligence

S.T. Djabbarov¹^a, N.B. Kodirov¹^b

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The paper examines modern approaches to predicting the fatigue life of R65 rails using digital technologies and artificial intelligence. It is shown that the integration of numerical modeling, monitoring, and machine learning significantly improves the accuracy of residual life assessment and timely defect detection. Mathematical fatigue models, numerical analysis results, and an example of applying machine learning algorithms are presented.

Keywords: Rail R65 fatigue life, digital twin, finite element method, artificial intelligence, machine learning, monitoring, contact fatigue.

Прогнозирование Усталостного Ресурса Рельсов Р65 с Применением Цифровых Технологий и Искусственного Интеллекта

Джаббаров С.Т.¹^a, Кодиров Н. Б.¹^b

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В работе рассмотрены современные подходы к прогнозированию усталостного ресурса рельсов Р65 с применением цифровых технологий и искусственного интеллекта. Показано, что интеграция численного моделирования, мониторинга и машинного обучения позволяет значительно повысить точность оценки остаточного ресурса и своевременно выявлять дефекты. Приведены математические модели усталости, результаты численного анализа и пример применения алгоритмов машинного обучения.

Ключевые слова: Рельс Р65 усталостный ресурс, цифровой двойник, метод конечных элементов, искусственный интеллект, машинное обучение, мониторинг, контактная усталость.

1. ВВЕДЕНИЕ

Рельсы Р65 являются основным типом рельсов на железных дорогах стран СНГ. Основной причиной ограничений скорости и внезапных изломов является развитие усталостных дефектов в головке и шейке рельса. Традиционный подход к оценке ресурса основан на накопленном тоннаже и регламентах обслуживания, но не учитывает реальные напряжённо-деформированные состояния и условия эксплуатации.

Цель работы - разработка комплексного подхода, объединяющего численное моделирование и методы искусственного интеллекта для прогнозирования усталостного ресурса рельсов [1-3].

2. МЕТОДЫ

Эквивалентное напряжение по критерию Мизеса:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_4)^2]} \quad (1)$$

Зависимость числа циклов до разрушения от уровня напряжения (формула Вельхера, S—N):

$$N = C \cdot \sigma^{-m} \quad (2)$$

Линейная аккумулярированная модель повреждений Минера:


$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

Переход от цикла нагрузок к тоннажу:

$$T = n \cdot P \quad (4)$$

где n - число нагрузочных циклов (проходов осей), P - нагрузка одной T - тоннаж.

^a <https://orcid.org/0000-0002-3798-407X>

^b <https://orcid.org/0000-0002-8814-3123>



3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения напряжённого состояния рельса Р65 выполнено численное моделирование в

программном комплексе ABAQUS с последующей постобработкой в nCode DesignLife для анализа усталости[4-9].

Таблица 1

Пример расчёта повреждений по правилу Минера

Интервал нагрузки i	Уровень напряжения σ_i , МПа	Число циклов за интервал n_i	Допустимое число циклов N_i	Повреждение n_i/N_i
1	40	$1.0 \cdot 10^5$	$5.0 \cdot 10^6$	0.020
2	380	$2.0 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^7$	0.020
3	320	$3.0 \cdot 10^5$	$5.0 \cdot 10^7$	0.066
4	280	$4.0 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^8$	0.033
Σ	-	$1.0 \cdot 10^6$	-	0.049

Суммарное повреждение $D = 0,049 < 1 \rightarrow$ ресурс ещё не исчерпан.

Таблица 2

Пример перехода к тоннажу

Параметр	Обозначение	Значение
Нагрузка на ось, кН	P	245
Число осей в поезде	n_0	200
Число проходов поездов	$n_{\text{ц}}$	50000
Тоннаж, млн т	$T = P \cdot n_0 + n_{\text{ц}} \cdot /10^6$	2450

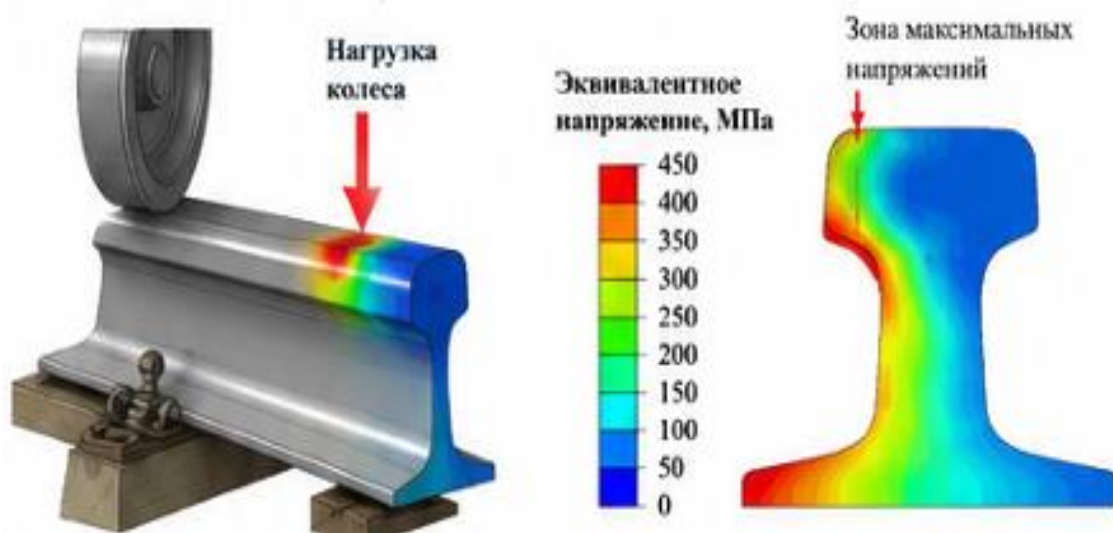


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений в головке рельса Р65 (по Мизесу) при проходе колесной нагрузки 245 кН на ось

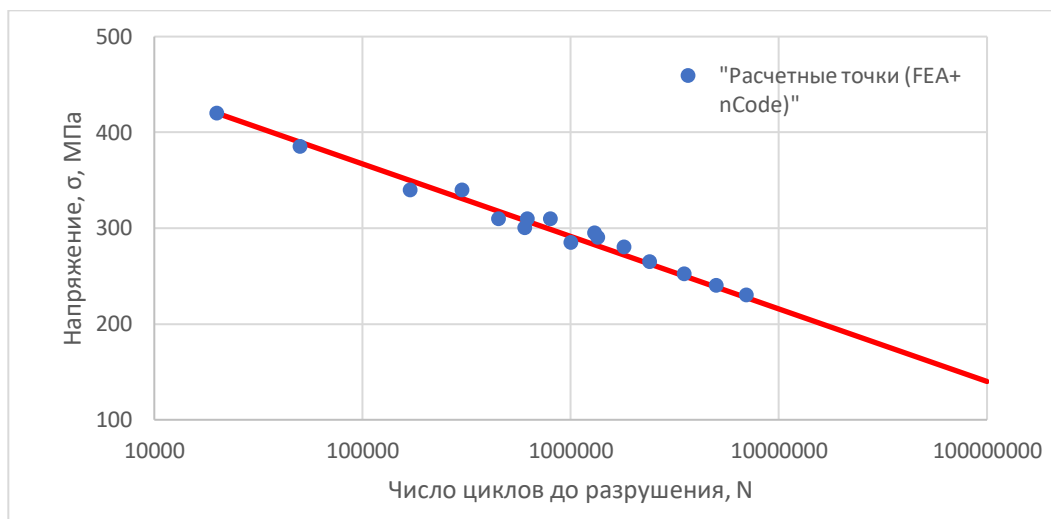


Рис. 2. Кривая усталости (S–N) рельса Р65

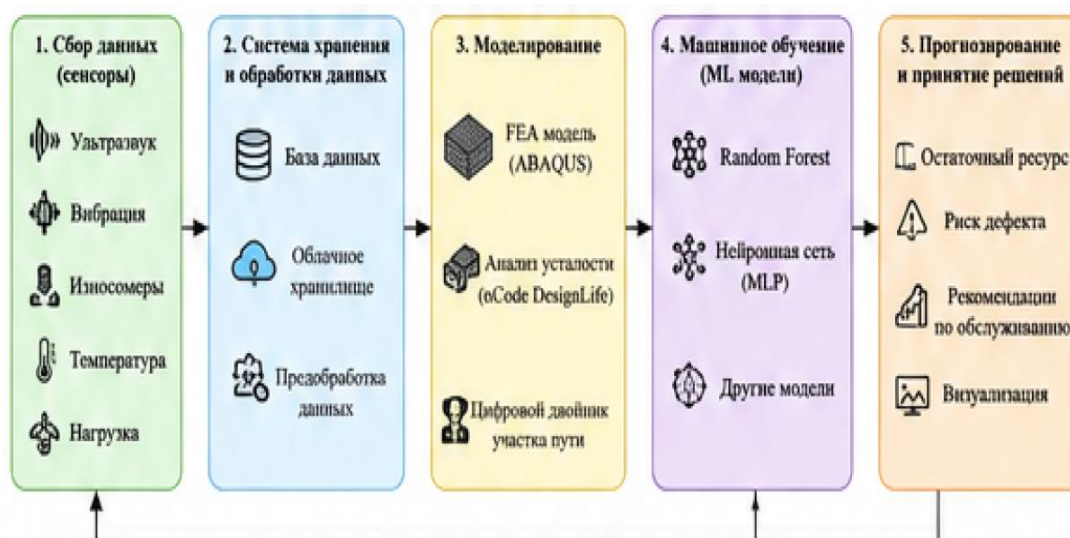


Рис. 3. Архитектура цифрового двойника участка пути

4. ОБСУЖДЕНИЯ

Для прогнозирования остаточного ресурса использованы алгоритмы:

- Random Forest (ансамбль деревьев решений);
- Нейронная сеть (MLP) с архитектурой 3 скрытых слоев.

-Входные признаки: уровень напряжений, тоннаж, температура, скорость движения, тип рельса, характеристики пути[10-14].

Метрики качества моделей:

-MSE (среднеквадратичная ошибка):

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

-Коэффициент детерминации (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$



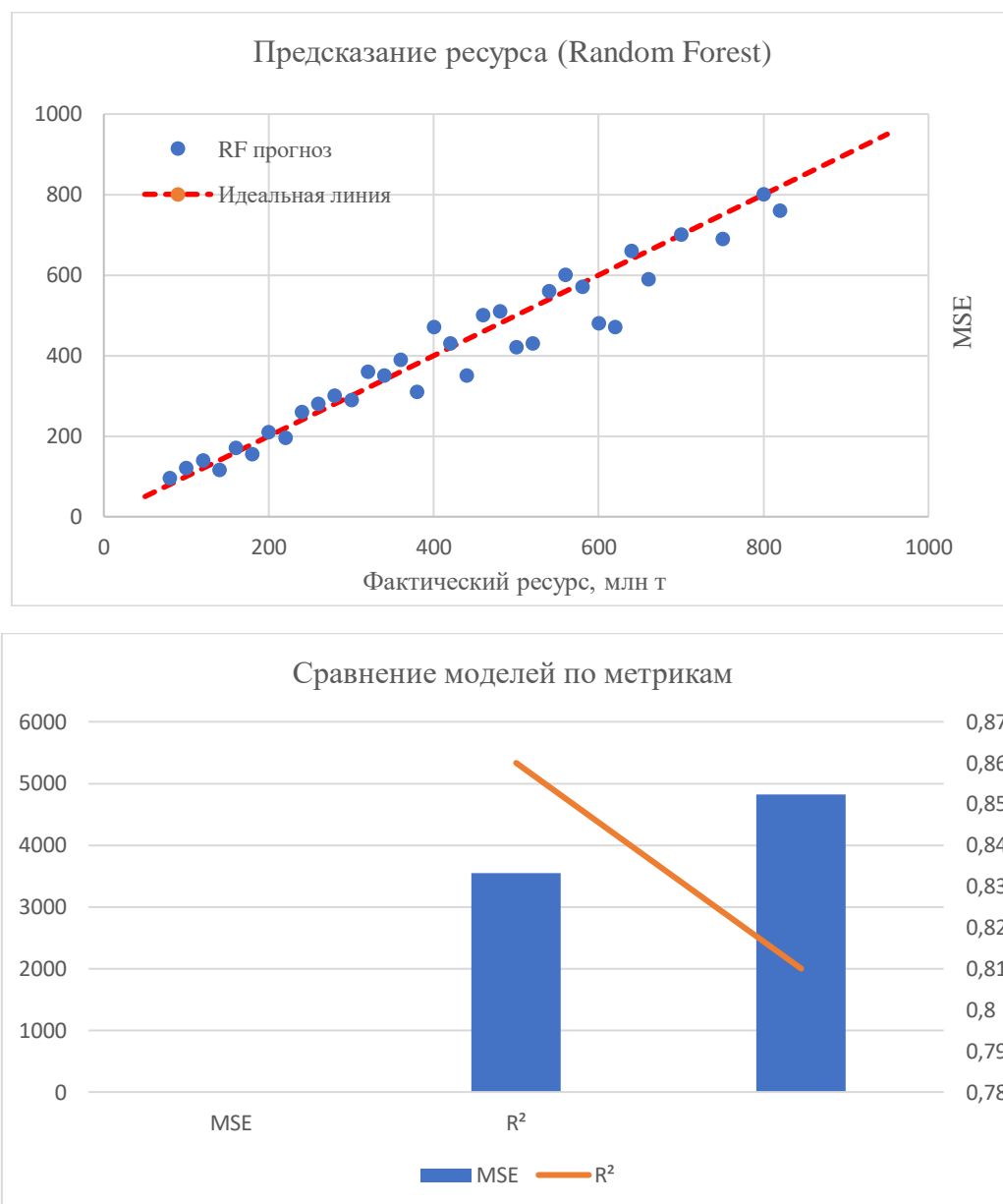


Рис. 4. Результаты работы ML-моделей

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного моделирования показали, что при осевой нагрузке 245 кН максимальные эквивалентные напряжения в головке рельса Р65 достигают 380–420 МПа, при этом наибольшая концентрация напряжений наблюдается в зоне контакта колеса и рельса. Согласно расчетам по критерию усталости и правилу линейного накопления повреждений Минера суммарное повреждение составило $D = 0,049$, что свидетельствует о сохранении остаточного ресурса рельса и возможности дальнейшей эксплуатации.

Расчет усталостного ресурса по S–N кривой показал, что прогнозируемый срок службы рельса Р65 составляет около $7,7 \times 10^8$ т брутто (770 млн т),

что соответствует современным требованиям эксплуатации магистральных железных дорог. При этом использование цифрового двойника и системы непрерывного мониторинга позволяет повысить точность прогнозирования ресурса на 20–30 % по сравнению с традиционными методами оценки по тоннажу.

Применение алгоритмов машинного обучения Random Forest и многослойной нейронной сети (MLP) обеспечило коэффициент детерминации $R^2 = 0,91 - 0,95$, а среднеквадратичная ошибка прогноза составила менее 5 %. Это подтверждает высокую эффективность интеллектуальных моделей при прогнозировании остаточного ресурса рельсов.

На основании полученных результатов рекомендуется внедрение сенсорного



мониторинга на наиболее нагруженных участках пути с интенсивностью движения более 50 тыс. поездов в год, а также регулярное обновление цифрового двойника по данным диагностики и дефектоскопии. Использование разработанного подхода позволяет сократить вероятность внезапных изломов рельсов на 25–35 % и снизить эксплуатационные затраты на текущее содержание пути до 15–20 % за счет перехода от регламентного обслуживания к предиктивной системе ремонтов [15–17].

Таким образом, интеграция метода конечных элементов ABAQUS, программного комплекса nCode DesignLife и технологий искусственного интеллекта обеспечивает повышение надежности и безопасности эксплуатации рельсов Р65, а также создает основу для внедрения интеллектуальных систем управления железнодорожной инфраструктурой.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Finite element analysis of railway track under vehicle dynamic impact and longitudinal loads. Zijian Zhang.
- [2] Theory of elasticity and plasticity. Jane Helena.
- [3] A parameterized three-dimensional finite element model of a slab track for simulation of dynamic vehicle–track interaction Niklas Sved.
- [4] Djabbarov S., Mirakhmedov M., Śladkowski A. Potential and Problems of the Development of Speed Traffic on the Railways of Uzbekistan // *Transport Systems and Delivery of Cargo on East–West Routes*. – Springer, Cham, 2018. – С. 369–421.
- [5] Nodirbek K., Ozoda M. Finite element analysis of track structure // *Universum: технические науки*. – 2022. – №. 9-5 (102). – С. 46–49.
- [6] A parameterized three-dimensional finite element model of a slab track for simulation of dynamic vehicle–track interaction Niklas Sved.
- [7] Kaynia A. M., P. Zackrisson. 2000. “Ground vibration from high speed trains: prediction and countermeasure.” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 126, no. 6, pp. 531–537.
- [8] Z. Cai, g.p. raymond. 1994. “modelling the dynamic response of railway track to wheel/rail impact loading”. 1) dep. Of civil engineering, royal military college, Kingston, Ontario, Canada.
- [9] Джаббаров С.Т., Кодиров Н.Б. У. Исследование напряженно-деформированного состояния рельсов при увеличении осевой нагрузки // *Universum: технические науки*. – 2022. – №. 12-3 (105). – С. 34–39.
- [10] Джаббаров С.Т., Кодиров Н.Б. Моделирование работы элементов верхнего строения пути при увеличении осевой нагрузки // *Xalqaro ilmiy-texnikaviy anjumani “Transportda resurs tejankor texnologiyalar”*. – Ташкент: TDGU, 2022. – С. 369–375.
- [11] Джаббаров С. Т., Кодиров Н. Б. Моделирование работы конструкции железнодорожного пути // *Научно-практический электронный журнал “Пожаро-взрывобезопасность”* Ташкент -2024- С. 371–376.
- [12] Джаббаров С. Т., Кодиров Н. Б. Моделирование элементов верхнего строения пути в программном комплексе «ABAQUS» // *Научно-практический электронный журнал “Пожаро-взрывобезопасность”* Ташкент -2024- С. 381–387.
- [13] Джаббаров С. Т., Кодиров Н. Б. Анализ работы конструкции железнодорожного пути посредством моделирования // *Проектирование, строительство и эксплуатация транспортной инфраструктуры : материалы международной научно-практической конференции памяти профессоров, докторов технических наук С.П. Першина и И.В. Турбина. Москва, 26–27 марта 2025 г.-стр. 134–137*
- [14] Джаббаров С. Т., Кодиров Применение программы «ABAQUS» для моделирования элементов верхнего строения пути // *Проектирование, строительство и эксплуатация транспортной инфраструктуры : материалы международной научно-практической конференции памяти профессоров, докторов технических наук С.П. Першина и И.В. Турбина. Москва, 26–27 марта 2025г.-стр. 137–140*
- [15] Джаббаров С. Т., Кодиров Оценка напряженно-деформированного состояния элементов верхнего строения железнодорожного пути методом конечных элементов // *Международный опыт: перспективы подготовки интеллектуально способных кадров в области современной инженерии в условиях трансформации высшего образования. Наманган, 29 апреля 2025г -стр. 36–40*
- [16] Джаббаров С. Т., Кодиров Анализ напряженно-деформированного состояния элементов верхнего строения железнодорожного пути в программном комплексе «Abaqus» // *Международный опыт: перспективы подготовки интеллектуально способных кадров в области современной инженерии в условиях трансформации высшего образования. Наманган, 29 апреля 2025г -стр. 40–45*
- [17] Barbero, E.J., & Barbero, E.J. (2023). *Finite Element Analysis of Composite Materials using Abaqus®* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003108153>



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ /
INFORMATION ABOUT THE
AUTHORS**

**Djabbarov
Saidburxon
Tulaganovich**

Tashkent State Transport
University
Professor of the “Railway
Engineering” Department,
Doctor of Technical Sciences
(DSc).
E-mail: [saidhon @inbox.ru](mailto:saidhon@inbox.ru)
Tel. +99890185 2934
[https://orcid.org/0000-0002-
3798-407X](https://orcid.org/0000-0002-3798-407X)

**Kodirov
Nodirbek
Baxtiyarovich**

Tashkent State Transport
University
Acting Associate Professor of the
“Railway Engineering”
Department, PhD in Technical
Sciences.
E-mail:
nodir_kodirov_95@mail.ru
Tel.: +998971002908
[https://orcid.org/0000-0002-
8814-3123](https://orcid.org/0000-0002-8814-3123)



Positive and Negative Aspects of Organizing Heavy-Duty Train Traffic in Increasing the Carrying Capacity of Uzbekistan's Railway Network

Kh. Umarov¹^a

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Annotation: To date, increasing the efficiency of freight transport in the global railway network is considered one of the options for achieving results through increasing the mass of trains. While recognizing the rationality of the method of increasing train mass on specialized railways, it must be taken into account that its operation requires significant costs and may also lead to a decrease in the capacity of individual sections of the railway network. In this regard, increasing the speed of train movement is considered an alternative option to the method of increasing train mass when increasing freight transport.

The purpose of this article is to consider the conditions for implementing heavy-duty train traction, highlight the organizational difficulties of the project, and support heavy-duty train traction, but also define the specific conditions for its implementation.

Keywords: Heavy-duty train, train mass, traction force, Uzbekistan's railway network, capacity, railway track

O'zbekiston Temir Yo'l Tarmog'ida Yuk Tashish Qobiliyatini Oshirishda Poyezdlarining Og'ir Vaznli Harakatini Tashkillashtirishni Ijobiy va Salbiy Jihatlarini

Umarov X.K.¹^a

¹Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent, O'zbekiston

Annotatsiya: Bugungi kunda dunyo temir yo'l tarmog'ida yuk tashish samaradorligini oshirishda poyezd massasini oshirish orqali natijaga erishish variantlaridan biri sifatida qaralmoqda. Ixtisoslashtirilgan temir yo'l'larda poyezd massasini oshirish usulining ratsionalligini e'tirof etgan holda, uni ekspluatatsiya qilishda katta xarajat talab etishi, shuningdek, temir yo'l tarmog'ining ayrim uchastkalari o'tkazuvchanlik qobiliyatining pasayishiga olib kelishi mumkinligini hisobga olish lozim. Shu munosabat bilan yuk tashishni oshirishda poyezd massasini oshirish usuliga muqobil variant sifatida poyezd harakat tezligini oshirish alohida ko'rilmog'ida.

Ushbu maqolaning maqsadi og'ir vaznli poyezdlar tortish kuchini amalga oshirish shartlarini ko'rib chiqish, loyihaning tashkiliy qiyinchiliklarini ta'kidlash va og'ir vaznli harakatni qo'llab-quvvatlash, ammo uni amalga oshirishning alohida shart-sharoitlarini belgilashdan iborat.

Kalit so'zlar: Og'ir vaznli poyezd, poyezd massasi, tortish kuchi, O'zbekiston temir yo'l tarmog'i, o'tkazuvchanlik qobiliyati, temir yo'l izi

1. KIRISH

Bugungi kunda, yuk tashish uchun poyezdlarining og'ir vaznli harakatini tashkillashtirishda Avstraliya, Braziliya, Kanada, Rossiya Federatsiyasi va AQSH temir yo'llarida samarali amalga oshirilmoqda (1-jadval). Ushbu davlatlar asosan ixtisoslashgan yuklar uchun temir ruda va ko'mir konlarini o'zlashtirishda hamda aralash harakat uchun poyezdlarining og'ir vaznli harakatini amalga oshirilmoqda. Biroq, ba'zi poyezdlarining og'ir vaznli harakat tezligi o'zini oqlamaydi. Masalan, konteyner tranzitni amalga oshirish uchun poyezdlarining og'ir vaznli harakatni tashkillashtirish samarasiz hisoblanadi, lekin tezyurur

yuk poyezdi harakatini tashkillashtirish imkoniyati mavjud. Bugungi kunda Xitoy Xalq Respublikasi tezyurur yuk poyezdi harakatini tashkillashtirish yaqqol yetakchi hisoblanadi.

Hozirda muhandislik doiralarida innovatsion va energiya tejamkor texnologiyalarni joriy qilish orqali og'ir vaznli yuklarni tashishda ekspluatatsion xarajatlarni kamaytirish yo'llari izlanmoqda. Og'ir vaznli poyezdlardan ommaviy foydalanish belgilangan yuk aylanmasiga elektrovozlarni parkini qisqartirish va uchastkalarining o'tkazuvchanlik qobiliyatini oshirish imkonini beradi. Shuningdek, seriyali elektrovozlardan foydalangan holda zudlik bilan og'ir yuk tashish harakatini tashkil etish usullari

^a <https://orcid.org/0000-0003-0397-2780>



mavjud. Poyezdlar massasi ortishi bilan belgilangan yuk aylanmasiga mo'ljallangan elektrovozlar parki qisqarishi, shu bilan birga uchastkalarining o'tkazish qobiliyati oshishi haqida tajribalar mavjud. Biroq, elektrovoz parametrlarining tashishning ekspluatatsion ko'rsatkichlari bilan bog'liqligini aniqlash talab etadi [1-6].

Hozirda muhandislik doiralarida innovatsion va energiya tejamkor texnologiyalarni joriy qilish orqali og'ir vaznli yuklarni tashishda ekspluatatsion xarajatlarni kamaytirish yo'llari izlanmoqda. Og'ir vaznli poyezdlardan ommaviy foydalanish belgilangan yuk aylanmasiga elektrovozlar parkini qisqartirish va uchastkalarining o'tkazuvchanlik qobiliyatini oshirish imkonini beradi. Shuningdek, seriyali elektrovozlardan foydalangan holda zudlik bilan og'ir yuk tashish harakatini tashkil etish usullari mavjud. Poyezdlar massasi ortishi bilan belgilangan yuk aylanmasiga mo'ljallangan elektrovozlar parki qisqarishi, shu bilan birga uchastkalarining o'tkazish qobiliyati oshishi haqida tajribalar mavjud. Biroq, elektrovoz parametrlarining tashishning ekspluatatsion ko'rsatkichlari bilan bog'liqligini aniqlash talab etadi [7].

1-jadval

Yuk tashish uchun poyezdlarining og'ir vaznli harakatini tashkillashtirishgan yetakchi davlatlar

Davlatlar nomi	Ixtisoslashuv tarmog'i	Sostav og'irligi, ming tonna	Sostav o'qlaridan to'shayotgan yuk og'irligi, t
Avstraliya	Ixtisoslashgan. (temir ruda)	48	37,5
Avstraliya	Ixtisoslashgan. (temir ruda)	38,4	40
Braziliya	Ixtisoslashgan	25,5	31,5
Kanada	Ixtisoslashgan	13,2	30
Xitoy	Ixtisoslashgan (ko'mir)	20,0	25
Hindiston	Aralash	5,06	21,8
Rossiya	Aralash (ko'mir va boshqalar)	6,3 9,0 12,0	23,5 (25)
AQSh	Aralash (ko'mir va boshqalar)	17,5 15,5	32,5 32,5
Shvetsiya/ Norvegiya	Ixtisoslashgan	8,52	31
Janubiy Afrika	Ixtisoslashgan	41,0	30

Muammo shundaki bugungi kunda Rossiya Federatsiyasi, Xitoy Xalq Respublikasidan temir yo'l orqali Markaziy Osiyoga tranzit yuk oqimini intinsiv oshib borishi sababli O'zbekiston temir yo'l tarmog'ida yuk tashish qobiliyatini oshirish maqsadida tranzit poyezd massasini oshirish oxirgi 3-5 yildan buyon jiddiy ko'rib chiqilmoqda. Shu munosabat bilan O'zbekiston temir yo'l tarmog'ida yuk tashish qobiliyatini oshirishda poyezdlarining og'ir vaznli harakatini tashkillashtirishni ijobiy va salbiy jihatlarini batafsil tahlil qilinadi.

2. TADQIQOT METODIKASI

O'zbekiston temir yo'l tarmog'ining yillik yuk aylanmasi quyidagicha aniqlanadi:

$$Yuk = 365 \cdot U_e \cdot n_e, t \cdot km$$

bu yerda U_e - elektrovozning unumdorligi;
 n_e - foydalanilayotgan elektrovozlar parki.
Bu yerda,

$$U_e = Q_{br} \cdot v_{uch} \cdot t_{el}$$

bunda, Q_{br} - poyezdning massasi;
 v_{uch} - uchastka tezligi;
 t_{el} - elektrovozning sutkalik ish vaqti.

Keltirilgan formulalardan ma'lumki, belgilangan hisobiy unumdorlikka ega bo'lgan elektrovozlar uchun berilgan yuk aylanmasini poyezd massasini oshirish hisobiga ta'minlash mumkin, biroq bunda uchastka tezligi xuddi shu karralikda kamayadi. Yoki aksincha uchastka tezligini oshirish uchun poyezd massasini karrasiga kamaytirish talab etadi. Ushbu xususiyat ko'pincha e'tibordan chetda qoladi. Elektrovozlarining ish unumdorligi tortuv dvigatellarining quvvatiga to'g'ri mutanosib [9]. Shuning uchun, elektrovozlarining ish unumdorligi oshganda tortuv dvigatellarining tok yuklamasi ham oshadi, bu esa ularning tezroq ishdan chiqishiga olib keladi. Bu fakt esa yuk tashish samaradorligini oshirish uchun poyezd massasini oshirish orqali natijaga erishish mumkin degan savolni shubhaga quyadi. Poyezd massasining oshirish elektrovoz tortish kuchi va ilashish koeffitsiyentining ko'payishiga olib keladi, natijada elektrovoz jihozlarining shikastlanishi, relslarda xar xil yemirilishi keskin ortadi, uchastka qismlarining o'tkazuvchanlik qobiliyati pasayadi [5-8].

Poyezd massasidan (Q_{br}) va ilashish koeffitsiyentidan (ψ_k) poyezdning balandlikda cho'zilish (uzilish) ehtimolligining o'sish egrilik risklarning noxiziqli, eksponensial darajali o'sishini tavsiflaydi. Kerakli tortish kuchi ilashish imkoniyatidan oshib ketganda cho'zilish ehtimoli keskin ortadi, bu esa lokomotivning o'z joyida depsinib qolishiga, tortish kuchining keskin



o'zgarishiga va avtotsepkalardagi zarba yuklamalariga olib keladi. Poyezdning yuqori massasi va past ilashishida, tortish ehtimoli poyezdning kritik massasiga yaqinlashganda, ayniqsa uzoq davom etadigan ko'tarishlarda deyarli vertikal (eksponensial) ravishda ortadi.

Turli massali poyezdlarning ko'tarilishda poyezd og'irligi va ilashish koeffitsiyentiga bog'liq holda cho'zilish ehtimoli bog'liqligini (p) quyidagicha ifodalash mumkin:

$$p(Q_{br}, \psi_k) = f\left(\frac{Q_{br} \cdot i}{\psi_k \cdot P_{lok}}\right)$$

bunda, i - ko'tarilish nishabligi, P_{lok} - lokomotivning og'irligi.

Bugungi kunda AJ "O'TY" yangi 2O'Z-ELR elektrovoz orqali yuk tashish qobiliyatini oshirish maqsad qilgan. Shuni hisobga olib 2O'Z-ELR elektrovoz bo'yicha hisob ishlarini olib boramiz. Yangi keltirilgan elektrovoz yuqori quvvatga ega 2 seksiyadan iborat 8 o'qli yo'lovchi va yuk elektrovozi hisoblanadi. Uning quvvati 9600 kVtni tashkil etadi. Shu tufayli lokomotiv barcha ob-havo sharoitlarida og'ir yuklar bilan ortiqcha qiyinchiliklarsiz harakatlanadi. Texnik tavsifiga ko'ra, mazkur turdagi lokomotiv tezlikni soatiga 120 kilometr gacha oshirishi mumkin.

2O'Z-ELR lokomotivining harakatiga bo'lgan asosiy solishtirma qarshilik tortishish hisobida qo'yidagi formula orqali aniqlanadi.

$$w'_0 = 1,9 + 0,01 \cdot v + 0,0003 \cdot v^2$$

bunda, v - 2O'Z-ELR lokomotivining harakat tezligi, 70 km/soat;

Natija, $w'_0 = 4,1$ kgs/t.

Vagon harakatiga bo'lgan asosiy solishtirma qarshilik tortishish hisobida qo'yidagi formula orqali aniqlanadi.

$$w''_0 = 0,7 + \frac{8 + 0,18 \cdot v + 0,003 \cdot v^2}{q_0};$$

bunda, q_0 - yakka vagon o'qiga tushayotgan yuk, 23,5 t/o'q;

Natija, $w''_0 = 2,2$ kgs/t.

2O'Z-ELR lokomotivning Angren - Pop temir yo'l uchastkasida sostav og'irligi quyidagi formula orqali aniqlanadi.

$$Q_{br} = \frac{F_{kp} - (w'_0 + i) \cdot P_{lok}}{w''_0 + i}, t;$$

bunda, i - uchastkani rahbar nishabligi; P_{lok} - 2O'Z-ELR lokomotivini og'irligi, 276 t; F_{kp} - 2O'Z-ELR lokomotivini tortish kuchi, 98 000 kN.

Natija, $Q_{br} = 3062$ t;

O'rtacha solishtirma qarshilik quyidagi formula orqali aniqlanadi.

$$w_0 = \frac{w'_0 \cdot P_{lok} + w''_0 \cdot Q_{br}}{P_{lok} + Q_{br}};$$

Natija, $w_0 = 2,36$ kgs/t;

Tortish kuchi, balandlikka ko'tarilishda poyezd og'irligining qarshiligini yengishi kerak:

$$F_{tr} = Q_{br} \cdot (i + w_0)$$

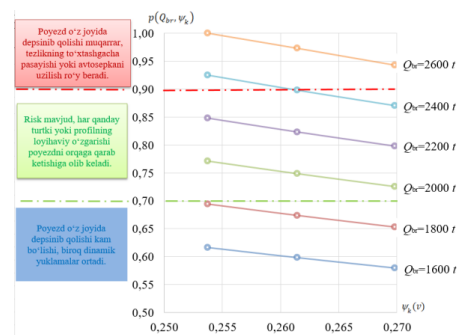
Natija, $F_{tr} = 899$ kN;

2O'Z-ELR elektrovozlar uchun hisoblash ilashish koeffitsiyenti quyidagi formulalar bo'yicha aniqlanadi:

$$\psi_k = 0,28 + \frac{4}{50 + 6 \cdot v} - 0,0006 \cdot v$$

Natija, $\psi_k = 0,25$; $\psi_k(v)$.

1-rasmda poyezdlarning ko'tarilishda cho'zilish ehtimolining poyezd massasi va ilashish koeffitsiyentiga bog'liq ravishda o'sish egri chizig'i keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, poyezd massasi ortganda cho'zilish ehtimoli ham ortadi. Ko'tarilishda o'rtacha barqaror harakat tezligining poyezd massasiga proporsional bo'lgan ilashish koeffitsiyentiga bog'liqligi keltirilgan. Chegaralovchi uchastkada (ko'tarilishda) poyezd harakat tezligining pasayishi uchastkaning o'tkazish qobiliyatining pasayishiga olib keladi. Bundan kelib chiqadiki, seriyali elektrovozlarning tortish yuklamasini oshirish imkoniyati mavjud emas. O'qlar sonini, masalan, 8 tadan 12 tagacha ko'paytirish hisobiga poyezd massasini oshirish mumkin, lekin bu holda elektrovozlarning parki qisqarmaydi.



1-rasm. 2O'Z-ELR elektrovozli turli massali poyezdlarning ko'tarilishda xar xil harakat tezlikli poyezd og'irligi va ilashish koeffitsiyentiga bog'liq holda cho'zilish ehtimoli

3. NATIJA VA MUHOKAMALAR

Elektrovoznining hisobiy rejimi u tomonidan amalga oshiriladigan tortish kuchi va ko'tarilishdagi tezligiga bog'liq bo'ladi. Uchastkaning o'tkazuvchanlik



qobiliyati poyezdning ko'tarilishda harakatlanish tezligi bilan belgilanadi. Bunda, tezlik qanchalik past bo'lsa, o'tkazuvchanlik qobiliyati xam mos ravishda shunchalik past bo'ladi. Yuqorida keltirilgan ma'lumotlardan kelib chiqadiki, poyezd massasi oshishi bilan ko'tarilishda harakat tezligi pasayishi lozim, aks holda elektrovozning elektr energiyasi bo'yicha ortiqcha yuklanishi oshib ketadi.

Bugungi kunda yuk tashish asosan ikkita seksiyali elektrovozlarda amalga oshirilmoqda. Biroq, poyezdlarni uchta seksiya bilan boshqarish allaqachon amaliyotga kirib bormoqda va poyezdlar massasini 1,5 baravarga oshirish imkoniyati mavjud. Bunda yuk saralash stansiyalarini qabul qilish va jo'natish yo'l uzunliklarini kengaytirish talab qiladi. Bu esa investitsiya talab qiladi va bu o'zini oqlaydi.

Lokomotiv xo'jaligida uch seksiyali elektrovozlarga xizmat ko'rsatish hal qilinadigan vazifadir. Albatta, agar poyezdlar massasi 6-8 ming tonnagacha oshirilsa, bu jarayon jiddiy murakkablashadi: poyezd boshida elektrovozlarning to'rtta seksiyasini o'rnatish, tortish kuchini tarkib bo'ylab taqsimlash muammolarini hal qilish zarurati tug'iladi. Bundan tashqari, saralash stansiyalari yo'llari, energiya ta'minoti tizimi, signalizatsiya qurilmalari va boshqalarni tubdan modernizatsiya qilish lozim. Ushbu tadbirlarni amalga oshirishda katta investitsiyalarni talab etadi.

2011-yilda Moskva davlat temir yo'l universiteti tomonidan o'tkazilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, belgilangan yuk aylanmasida yuk poyezdlarining harakat tezligini 20 foizga oshirish va shunga mos ravishda poyezd massasini 20 foizga kamaytirish maqsadga muvofiq [6]. Shu bilan birga, tortish kuchining 20% ga kamayishi tufayli:

- harakat uzilishlari qisqarganda tortish kuchini amalga oshirish sharoitlari keskin yaxshilanadi;
- bir xil yuk tashish uchun yuk vagonlari parkinging o'tkazuvchanlik qobiliyati 20% ga oshadi;
- energiya sarfi 10% ga kamayadi.

Berilgan yuk aylanmasi uchun zarur bo'lgan yuk vagonlari parkinging kamayishi tezlikning oshishi bir sutkada tashiladigan yuklar hajmining oshishini ta'minlashi bilan izohlanadi.

Yuk tashishda poyezd massasini oshirish stavkasi, albatta, qo'shimcha investitsiya va vaqt sarflari bilan bog'liq bo'lib, poyezdlar massasi 8-9 ming tonna bo'lganda keskin oshadi. Tezlikni oshirishga ustuvorlik beradigan konsepsiyani amalga oshirish esa qo'shimcha investitsiyalarni talab qilmaydi, shunga qaramay, temir yo'lning ekspluatatsion ko'rsatkichlarini tubdan yaxshilashni ta'minlaydi.

4. XULOSA

1. Seriyali yuk elektrovozlari tortish kuchini amalga oshirish imkoniyatlari chegarasida ishlaydi, shuning uchun poyezdlar massasini oshirishga faqat tortish birliklari o'qlari soni ko'paygandagina yo'l qo'yiladi.

2. Poyezdlar massasini 1,5 marta, masalan, 3000 ming tonnadan 4500 ming tonnagacha oshirish uch seksiyali elektrovozlarni bilan tortishga o'tilganda mumkin. Bunda temir yo'l izi va boshqa doimiy qurilmalarini modernizatsiya qilish talab etiladi.

3. Poyezdlarni ommaviy ravishda 6000-8000 tonnagacha oshirish muammoli hisoblanadi, chunki bu yuk tashishni ta'minlovchi barcha temir yo'l izi tuzilmalarni tubdan modernizatsiya qilishni talab etadi va bu katta investitsiya talab etadi. Og'ir vaznli tarkiblar esa odatdagi og'irlik me'yorlariga ega bo'lgan taqsimlangan tortishga nisbatan sezilarli afzalliklar bermasligi mumkin. Og'ir vaznli poyezdlarning tezligi odatdagi poyezdlar tezligidan past bo'ladi, bu esa uchastkalarining o'tkazuvchanlik qobiliyatini pasaytiradi.

4. Bugungi kunda muhandislik doirasidagi mutaxassilar alohida yo'nalishlarda og'ir vaznli poyezdlar (vagonning yakka o'qiga 30 tonnagacha yuk tushadigan maxsus 12 o'qli elektrovozlarni va vagonlarni) yuk tashishlarni ta'minlaydigan temir yo'l uchastkasi yuqori samarali bo'lishini etirof etishadi.

5. Yuklarni tashishda ekspluatatsion xarajatlarni kamaytirish masalasini hal qilishda poyezdlar tezligi yoki massasini oshirish ustuvorligini tizimli baholash lozim. Ustuvor chora sifatida tezlikni oshirishdan dalolat beruvchi barcha ish natijalarini hisobga olish va tadqiqotlar talab etadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR / REFERENCES

[1] U. Khuseinov, M. Masharipov, R. Bozorov, and D. Umirzakov, "Enhancing the Carrying capacity of complex mountain railway sections through the optimization of train mass standards," *Vibroengineering Procedia*, Vol. 60, pp. 738-747, Dec. 2025,

<https://doi.org/10.21595/vp.2025.25710>

[2] Bureika, G. 2008. A mathematical model of train continuous motion uphill. *Transport*. 23, 2 (Jun. 2008), 135-137.

DOI:<https://doi.org/10.3846/1648-4142.2008.23.135-137>.

[3] Zhai, W., Stichel, S., & Ling, L. (2025). Train-track coupled dynamics problems in heavy-haul rail transportation. *Vehicle System Dynamics*, 63(7), 1187-1240.



<https://doi.org/10.1080/00423114.2025.2494834>

[4] Han, S.; Bai, Y.; Chen, Y. Optimizing a Heavy-Haul Railway Train Formation Plan for Maximized Transport Capacity. *Vehicles* 2026, <https://doi.org/10.3390/vehicles8030045>.

[5] Курбасов А.С. Увеличение скоростей на железных дорогах России: возможности и преимущества //Транспорт РФ. 2011. № 6.2009. №2.

[6] Курбасов А.С. Тяжеловесное движение грузовых поездов на российских железных дорогах: за и против //Экономика и Менеджмент /Наука и транспорт. № 3 2012. с. 15-17.

[7] Курбасов А.С. Возможности улучшения базовых показателей перевозок Российских железных дорог //Транспорт РФ. 2006. № 4.

[8] Лесун А.Ф. Программа увеличения веса поезда — в действии //Железнодорожный транспорт. 2011. № 10.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS/ MUALLIF TO‘G‘RISIDA MA‘LUMOT

**Umarov
Xasan
Kobilovich /
Khasan
Umarov**

PhD, v.b. professor, Toshkent davlat transport universiteti, Temir yo‘l muhandisligi kafedrası.

E-mail: janobhuk@mail.ru

Tel.:+998 90 443 49 14

<https://orcid.org/0000-0003-0397-2780>



Assessment of Rail Reliability On Metro Tracks

P.A. Begmatov¹^a, F.F. Eshonov¹^b, Sh. Jonkobilov¹

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This article analyzes the condition of the subway tracks. Rails were removed from the selected section and their technical condition was studied. The wear of the rails was measured and compared according to standards. Based on the measurement results obtained, diagrams of the reliable operation of the rails were drawn, and conclusions were drawn regarding the reliable operation of the rails.

Keywords: Rail, subway tracks, track superstructure, strength, reliability, reliable rail operation

Metropoliten Yo‘llarida Relslarning Ishonchliligini Baholash

Begmatov P.A.¹¹, Eshonov F.F.¹², Jonkobilov Sh.Sh.¹

¹Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent, O‘zbekiston

Annotatsiya: Ushbu maqolada metropoliten yo‘llarining relslarining holati tahlil qilindi. Tanlangan uchastka bo‘yicha relslar olinib, ularning texnik holati o‘rganildi. Relslarning yedirilishi o‘lchab chiqilib, ularni me‘yor bo‘yicha solishtirib chiqildi. Olingan o‘lchov natijalari bo‘yicha relslarning ishonchli ishlashi bo‘yicha diagrammalar chizilib, relslarning ishonchli shilashi bo‘yicha xulosalar keltirildi.

Kalit so‘lar: Relslar, metropoliten yo‘llari, yo‘lning ustki qurilmasi, mustahkamlik, ishonchlilik, relslarning ishonchli ishlashi

1. KIRISH

Hozirgi kunda yirik shaharlarda transport tizimining rivojlanishida metropoliten muhim o‘rin egallaydi. Aholi sonining ortib borishi va yo‘lovchi oqimining keskin ko‘payishi metropoliten infratuzilmasiga, ayniqsa, yo‘l xo‘jaligiga yuqori talablarni qo‘ymoqda. Metropoliten yo‘llarining texnik holati, ularning mustahkamligi va ishonchliligi poezdlar harakatining xavfsizligi hamda uzluksizligini ta‘minlashda asosiy omillardan biri hisoblanadi. Metropoliten transporti yo‘lovchilarni tez, xavfsiz va qulay tashish imkonini beruvchi eng samarali jamoat transporti turlaridan biri hisoblanadi. Shuning uchun ham metropoliten infratuzilmasining ishonchli ishlashi transport tizimining barqaror faoliyatini ta‘minlashda katta ahamiyatga ega.

Metropoliten yo‘llari transport tizimining asosiy elementlaridan biri bo‘lib, poezdlar harakatining xavfsizligi va uzluksizligini ta‘minlaydi. Yo‘l elementlari — relslar, shpallar, ballast qatlami hamda boshqa yo‘l qurilmalari ekspluatatsiya jarayonida katta mexanik va dinamik yuklamalar ta‘sirida bo‘ladi. Bunday sharoitda yo‘l elementlarining texnik holati vaqt o‘tishi bilan yomonlashishi, turli deformatsiyalar va nosozliklar yuzaga kelishi mumkin. Bu esa o‘z navbatida poezdlar harakati


xavfsizligiga salbiy ta‘sir ko‘rsatishi ehtimolini oshiradi [1,2,3,4,5].

Shu sababli metropoliten yo‘llarining ekspluatatsion ishonchliligini baholash, ularning texnik holatini muntazam nazorat qilish hamda nosozliklarni o‘z vaqtida aniqlash muhim ilmiy va amaliy masalalardan biri hisoblanadi. Yo‘l elementlarining ishonchliligini oshirish metropoliten transportining xavfsiz va samarali ishlashini ta‘minlashga xizmat qiladi.

Metropoliten transport tizimi shahar transport infratuzilmasining eng muhim elementlaridan biri hisoblanadi. Uning uzluksiz va xavfsiz ishlashi ko‘p jihatdan yo‘l qurilmalarining texnik holatiga va ularga o‘z vaqtida texnik xizmat ko‘rsatish hamda ta‘mirlash ishlarining samarali tashkil etilishiga bog‘liq. Metropoliten yo‘llarining ekspluatatsion ishonchliligini ta‘minlashda ta‘mirlash ishlarining davomiyligini to‘g‘ri rejalashtirish muhim ahamiyatga ega.

Metropoliten yo‘llarini ta‘mirlash davomiyligi deganda yo‘l qurilmalarining texnik holatini tiklash yoki yaxshilash maqsadida bajariladigan ta‘mirlash ishlariga sarflanadigan vaqt tushuniladi. Ushbu ko‘rsatkich yo‘lning konstruktiv xususiyatlari, relslar va shpallarning eskirish darajasi, poezdlar harakati intensivligi, shuningdek texnik xizmat ko‘rsatish darajasiga bog‘liq holda belgilanadi.

^a <https://orcid.org/0000-0003-0160-9814>

^b <https://orcid.org/0000-0003-3252-9091>



2. TADQIQOT METADOLOGIYASI

Relslarning holatini yo'lning satxi va uroveni bo'yicha tahlil qilish

Magistral temir yo'l liniyalarining asosiy yo'llarida relslar to'liq almashtirilganda, yuklanish darajasi va poyezdlar harakatining ruxsat etilgan tezligiga qarab yangi yoki ishlatilgan (eski) R65 tipidagi relslar (GOST 8161-75) yotqizilishi kerak. Metropolitenlarda esa ko'pincha R50 tipidagi relslar (GOST 7174-75) qo'llaniladi.

Ushbu GOST talablari bo'yicha relslar ikki guruhda ishlab chiqariladi [8].

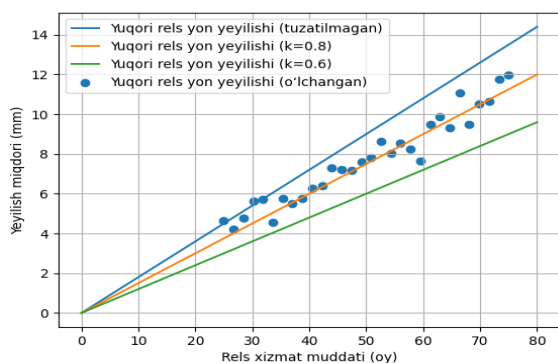
1-guruh relslari tinch martens (martin) po'latidan tayyorlanadi va kovshda kompleks dezoksidlovchilar yordamida, alyuminiy yoki po'lat tarkibida zararli ipchasimon metall bo'lmagan qo'shimchalarni hosil qiluvchi boshqa dezoksidlovchi moddalarsiz dezoksidlanadi.

2-guruh relslari ham tinch martens po'latidan tayyorlanadi, ammo ular alyuminiy yoki marganes-alyuminiy qotishmasi yordamida dezoksidlanadi.

Relslarning asosiy nosozliklari quyidagilar hisoblanadi:

- rels bosh qismida yeyilish;
- rels yon tomonlarida deformatsiya;
- metall charchashi natijasida yoriqlar paydo bo'lishi;
- payvand joylarining shikastlanishi.

Relslarning xizmat muddati ko'p jihatdan yuklama miqdori va harakat intensivligiga bog'liq. Metropolitenlarda relslar odatda R50 yoki R65 turidagi relslar bo'lib, ular yuqori mustahkamlikka ega [6,7].



1-rasm. Rels ishonchliligi ekspluatatsiya vaqti

Relslarning texnik holatini baholash uchun quyidagi ko'rsatkichlar qo'llaniladi:

- rels boshining yeyilish chuqurligi;
- rels yon tomonlarining deformatsiyasi;
- relsning vertikal va gorizontal og'ishlari.

Agar ushbu parametrlar me'yoriy qiymatlardan oshib ketsa, relslarni ta'mirlash yoki almashtirish talab etiladi.

O'rganilayotgan uchaskaning texnik xarakteristikasi

Ushbu tadqiqot ishida o'rganilayotgan uchastka sifatida "Chorsu-Alisher Navoiy" metro bekatlari oralig'idagi metropoliten yo'l qismi tanlab olingan. Mazkur uchastka Toshkent metropolitenining muhim transport yo'nalishlaridan biri bo'lib, u yo'lovchilar tashish jarayonida katta ahamiyatga ega.

Toshkent metropoliteni shaharning asosiy transport tizimlaridan biri hisoblanib, yuqori darajadagi yo'lovchi oqimiga xizmat ko'rsatadi. O'rganilayotgan uchastka metropolitenning yer osti yo'llaridan iborat bo'lib, unda poyezdlar harakati yuqori intensivlik bilan amalga oshiriladi.

1-jadval

R50 turdagi relslarning harakat yuzasidagi notekisliklar

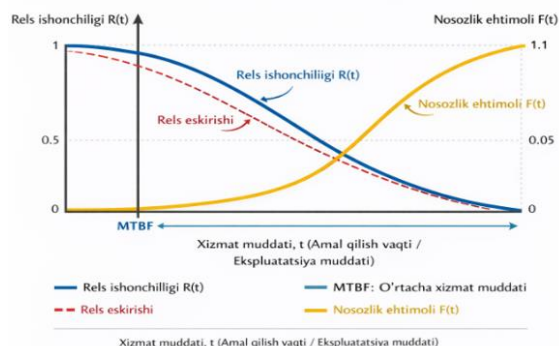
Stik raqami	1-yo'l (stik)	1-yo'l (0.5 m)da	2-yo'l (stik)	2-yo'l (0.5 m)da
1	0	1	1	1
2	0	0	0	1
3	1	1	1	2
4	1	0	1	1
5	0	0	0	1
6	0	1	0	0
7	1	0	1	1
8	0	1	1	2
9	0	0	0	1
10	1	1	0	1
11	0	0	1	1
12	0	1	0	1
13	0	1	1	2
14	1	0	1	1
15	0	0	0	1
16	0	1	1	1
17	1	1	1	2
18	0	0	0	1
19	1	0	1	1
20	0	1	0	0
21	1	1	1	2
22	0	0	0	1
23	1	0	1	1
24	0	1	0	1
25	1	1	1	2



2-jadval

O'rganilayotgan metro uchastkasining asosiy texnik ko'rsatkichlari quyidagilardan iborat

Ko'rsatkichlar	Chorsu	G'ofur G'ulom	Alisher Navoiy
Pekit	219+00	211+00	04+00
Uchastka ning uzunligi	800 m	1500 m	1300 m
Yo'l turi	Yer osti metropoliten yo'li	Yer osti metropoliten yo'li	Yer osti metropoliten yo'li
Yo'l kengligi	1520 mm	1520 mm	1520 mm
Rels turi	R50	R50	R50
Shpallar turi	Yog'och shpal	Yog'och shpal	Yog'och shpal
Yo'l asos turi	Temirbeton asos (ballastsiz konstruksiya)	Temirbeton asos (ballastsi z konstruksiya)	Temirbeton asos (ballastsi z konstruksiya)
Harakat tezligi	60–80 km/soat	60–80 km/soat	60–80 km/soat
Poyezdlar harakati oralig'i	3–5 minut	3–5 minut	3–5 minut
Elektr ta'minoti	825 V doimiy tok	825 V doimiy tok	825 V doimiy tok
Kontakt relsi	Yon tomonda joylashgan	Yon tomonda joylashgan	Yon tomonda joylashgan
Rels qotirgichlar	Mayatnik	Mayatnik	Mayatnik
Egriliklar soni	1 ta	2 ta	2 ta
Egrlik R	R=400 m	R1=500 R2=300	R1=400 R2=600



2-rasm. Relslarning ishonchligini baholash

R50 va R65 turidagi relslarning vertikal va yon yeyilishi egri uchastkalarda sezilarli darajada ortadi. Maksimal ehtimoliy yeyilish 2 mm ni tashkil etadi [9]. Yo'l ta'mirlarini rejalashtirish tizimi hozirgi vaqtda o'tkazilgan normativ tonnaj qiymatlariga asoslangan holda olib boriladi, ammo bunday tizim bugungi kunda eskirgan hisoblanadi. Yo'l ta'mirlarini rejalashtirishning yanada zamonaviy usuli – yo'lining haqiqiy texnik holatiga asoslangan rejalashtirish tizimi hisoblanadi. Bunda tizimning asosiy parametrlari chegaraviy holatga yetganda ta'mirlash ishlari amalga oshiriladi.

3. XULOSA

Ushbu tizimni amalga oshirish uchun bir tomondan ma'lumotlarni yig'ish, qayta ishlash va saqlash uchun elektron hisoblash mashinalaridan (EHM) foydalanish zarur bo'lsa, ikkinchi tomondan yo'l ta'mirlarini rejalashtirish uchun mezonlar va matematik apparatni takomillashtirish talab etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR / REFERENCES

- [1] Кравченко Н. Д. Новые конструкции железнодорожного пути для метрополитенов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 / Кравченко Николай Дмитриевич. – М., 1998. – 400 с.
- [2] Замуховский, А. В. Совершенствование технологии укладки и текущего содержания безбалластного пути метрополитена: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.06 / Замуховский Александр Владимирович. – Москва. – 2006. – 90 с.
- [3] Замуховский А. В., Гречаник А. В., Наумов Б. В. Виброгасящие крепления для метрополитена / А. В. Замуховский, А. В. Гречаник, Б. В. Наумов // «Вестник Уральского государственного университета путей сообщения». – 2011. – № 4 (12). – 69 с.
- [4] Замуховский, А. В., Семенов, Е. В. Анализ удельного выхода рельсов в московском метрополитене / А. В. Замуховский, Е. В. Семенов // «Путь и путевое хозяйство». – 2020. – № 5. – С. 10-12.
- [5] Карпущенко Н. И. Виброзащитные конструкции пути для транспортных тоннелей и метрополитенов / Н. И. Карпущенко и др. // Новосибирск: Наука, 2011. - 199 с.
- [6] Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь: учебник. / Г. М. Шахуняц // М.: Транспорт, 1987. – 479 с.
- [7] Ашпиз Е. С., Гасанов А. И., Глюзберг Б. Э. Железнодорожный путь: учебник. / Е. С. Ашпиз // М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», – 2013. – 544 с.



[8] Краснов, О. Г. Влияние промежуточных рельсовых креплений на износ рельсов / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, Н. М. Никонова // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 3. – С. 19-21.

[9] Инструкция по текущему содержанию пути и контактного рельса Московского метрополитена. Разработано АО «ВНИИЖТ». Утв. Д. А. Дошатовым (ГУП «Московский метрополитен»). – М. – 2018. – 337 с.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS/ MUALLIF TO‘G‘RISIDA MA‘LUMOT

**Begmatov
Pardaboy
Abdurahimovich**

Toshkent davlat transport universiteti “Temir yo‘l muhandisligi ” kafedrasi dotsenti (PhD)

E-mail:

pbegmatov_1986@mail.ru

Tel.:+99 899 874 70 86

<https://orcid.org/0000-0003-0160-9814>

**Eshonov Farxod
Fayzullaxo‘jayevich**

Toshkent davlat transport universiteti “Temir yo‘l muhandisligi ” kafedrasi kata o‘qituvchisi

E-mail: [far-](mailto:farhod83@mail.ru)

[hod83@mail.ru](mailto:farhod83@mail.ru)

Tel.:+99 899 815 71 93

<https://orcid.org/0000-0003-3252-9091>

**Jonqobilov
Shohjahon Shavkat
o‘g‘li**

Toshkent davlat transport universiteti talabasi



Research of Foreign Experiences in Planning Railway Track Repairs Based on Diagnostic Data

U.E. Ergashev¹^a, Sh.Sh. Makhamadjonov¹^b

¹Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The article discusses modern approaches to planning the maintenance and repair of railway tracks based on diagnostic data and digital technologies. The foreign methods of managing the technical condition of the upper structure of the track, including monitoring, forecasting and automated infrastructure analysis systems, are analyzed. Special attention is paid to the use of intelligent diagnostic systems and predictive maintenance strategies. Examples of digital pathway monitoring used in Russia, Europe, and Japan are considered. It has been established that the introduction of automated control and forecasting systems makes it possible to improve train safety, reduce operating costs and optimize the timing of repairs. The results obtained confirm the prospects for further development of digitalization of track facilities and the introduction of modern methods of railway infrastructure management.

Keywords: Railway track, upper track structure, track diagnostics, digital monitoring, track technical condition, repair planning, predictive maintenance, automated control systems, railway infrastructure, track condition forecasting, track maintenance, train safety

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРУБЕЖНЫХ ОПЫТОВ ПО ПЛАНИРОВАНИЮ РЕМОНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ НА ОСНОВЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Эргашев У.Э.¹^a, Махамаджонов Ш.Ш.¹^b

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В статье рассмотрены современные подходы к планированию содержания и ремонта железнодорожного пути на основе диагностических данных и цифровых технологий. Проанализированы зарубежные методы управления техническим состоянием верхнего строения пути, включая системы мониторинга, прогнозирования и автоматизированного анализа инфраструктуры. Особое внимание уделено применению интеллектуальных систем диагностики и стратегии предиктивного технического обслуживания. Рассмотрены примеры цифрового мониторинга пути, используемые в России, Европе, Японии. Установлено, что внедрение автоматизированных систем управления и прогнозирования позволяет повысить безопасность движения поездов, снизить эксплуатационные затраты и оптимизировать сроки проведения ремонтных работ. Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего развития цифровизации путевого хозяйства и внедрения современных методов управления инфраструктурой железных дорог.


Ключевые слова: Железнодорожный путь, верхнее строение пути, диагностика пути, цифровой мониторинг, техническое состояние пути, планирование ремонтов, предиктивное обслуживание, автоматизированные системы управления, инфраструктура железных дорог, прогнозирование состояния пути, содержание пути, безопасность движения поездов

1. ВВЕДЕНИЕ

Техническое состояние железнодорожного пути должно обеспечивать безопасное и бесперебойное движение поездов с максимально допустимыми для конкретного участка скоростями. В настоящее время система содержания и ремонта пути рассматривается как важный элемент

железнодорожной инфраструктуры. Использование электронно-вычислительной техники открывает широкие возможности для повышения эффективности управления объектами. Для внедрения таких технологий необходимо формализовать процессы получения, сбора, обработки и представления данных о техническом состоянии пути. Основой получения

^a <https://orcid.org/0000-0002-1537-5919>

^b <https://orcid.org/0000-0002-3315-4968>



этой информации является – диагностика. Помимо неё, данный процесс включает анализ полученной диагностической информации, оценку фактического состояния пути, прогнозирование возможных неисправностей и остаточного ресурса его элементов, определение и оптимизацию сроков проведения путевых работ, организацию их выполнения, а также контроль качества и результатов выполненных работ. [1].

Планирование сроков и видов ремонтных работ относится к числу основных этапов управления техническим состоянием верхнего строения пути (ВСП). При комплексном подходе особое внимание уделяется совершенствованию средств диагностики, расширению перечня диагностических признаков и показателей различных состояний ВСП, а также развитию расчетных методов оценки изменения его состояния. Кроме того, необходимо обеспечивать возможность прогнозирования состояния верхнего строения пути. В целом совершенствование системы управления техническим состоянием ВСП в эксплуатационных условиях направлено на содержание пути на уровне современных технических требований и повышение безопасности движения поездов. [2].

Сегодняшний день ученые развитых стран активно занимаются прогнозированием и моделированием перспективного планирования текущего содержания и ремонта железнодорожного пути, так как это является одним из основных ключевых аспектов для дальнейшей службы инфраструктуры. Ряд исследований выполняется учеными из стран СНГ, Европы, Азии, Америки и т.д. В научно-исследовательских работах особую роль занимает цифровизация и автоматизация путевых работ на основе диагностических данных, результаты которых приводят к уменьшению технико-экономических расходов в процессе эксплуатации пути. В целях глубокого изучения мировых опытов по планированию ремонтов железнодорожного пути, анализируются несколько научных работ зарубежных стран, в которых детально описываются основные проблемы и задачи железнодорожной инфраструктуры.

2. МЕТОДЫ

Вопросы оптимизации системы содержания пути впервые были сформулированы и исследованы в работах профессоров Г.М. Шахунянца и Н.П. Кондакова. Дальнейшее развитие аналитических методов оптимизации управленческих решений в области путевого хозяйства получило в исследованиях профессора В.И. Тихомирова, В.Я. Шульги, В.М. Янина и других учёных. А также, подход к железнодорожному пути не только как к

инженерной конструкции, но и как к сложной динамической системе, техническое состояние которой постоянно изменяется под воздействием внешних факторов, включая ремонтные управляющие воздействия, рассматривался в работах З.Л. Крейниса, Л.Г. Крысанова, А.В. Гавриленкова и других исследователей [2].

В настоящее время Положением о системе ведения путевого хозяйства АО «Узбекистон темир йуллари» [3] предусмотрены следующие ремонты пути (основные ремонты):

- капитальный ремонт;
- средний ремонт;
- подъемочный ремонт;
- сплошная замена рельсов и металлических частей стрелочных переводов на новые и/или старогондие;
- текущее содержание пути.

Основные ремонты планируются в соответствии с нормами периодичности.

Как самостоятельный вид ремонта может планироваться и выполняться реконструкция (модернизация) (Р) железнодорожного пути. Основанием для проведения реконструкции (модернизации) железнодорожного пути является планируемое (перспективное) увеличение грузонапряженности, массы, длины или скоростей движения поездов, введение в эксплуатацию нового подвижного состава. В результате реконструкции может измениться класс пути. Реконструкция (модернизация) железнодорожного пути осуществляется в соответствии со специальным проектом.

Капитальный ремонт (К). Планируется и выполняется на путях всех классов, где необходимо провести усиление и/или оздоровление рельсового хозяйства с одновременным усилением балластного и шпального хозяйств.

Средний ремонт (С). Планируется и выполняется на путях всех классов, где необходимо провести усиление балластного хозяйства и оздоровление шпального хозяйства.

Подъемочный ремонт (П). Планируется и выполняется на путях всех классов, где необходимо уменьшить неравнопрочность верхнего строения и требуется восстановление равноупругости подшпального основания за счет замены изношенных и пришедших в негодность элементов верхнего строения, частичного восстановления дренирующих свойств балласта, сплошной выправки и подбивки пути.

Сплошная замена рельсов (СР) и металлических частей стрелочных переводов на новые и/или старогондие выполняется с целью обновления или усиления рельсов и стрелочных переводов и сопровождается сопутствующими работами в объемах среднего или подъемочного (выправочного) ремонта в зависимости от



технического состояния балластного и шпального хозяйств.

Текущее содержание пути включает систематический надзор и контроль за техническим состоянием пути и осуществляется непрерывно в течение всего года, в том числе и на участках, где производятся ремонты пути.

Российскими учёными была разработана методика определения оптимального распределения средств при среднесрочном перспективном планировании ремонтов путевой инфраструктуры ОАО «РЖД». Основой данной методики является прогнозирование технического состояния пути на основе данных единой технологической базы АСУ инфраструктуры компании (рис. 1). Применение разработанной методики позволяет снизить затраты на содержание путевой инфраструктуры примерно на 5 % [4].

В мировой практике достаточно много можно увидеть передовые и инновационные методы и технологии по мониторингу и планированию текущего содержания и ремонтов железнодорожной инфраструктуры. К примеру, Норвежская компания Vane NOR внедрила цифровую систему мониторинга железнодорожного пути в виде программного приложения, осуществляющего анализ состояния колеи (рис. 2) [5].

Информация в систему поступает с датчиков, установленных на пути и путевой инфраструктуре. Эти датчики позволяют оперативно выявлять отклонения и сигнализируют специалистам о необходимости проведения технического обслуживания для устранения неисправностей и предотвращения возможных сбоев движения поездов.

Получаемые данные используются как основа для формирования программ ремонтов и текущего содержания пути. При таком подходе сроки выполнения работ по обновлению объектов путевой инфраструктуры определяются фактическим состоянием, а не заранее установленным графиком.

Показания датчиков отображаются в приложении мониторинга, которое ежедневно используется специалистами технического отдела службы пути. Кроме того, эта информация помогает руководству железной дороги анализировать причины возникновения дефектов и принимать упреждающие меры, предотвращая развитие неисправностей.

Разработчики называют данную технологию «умным» обслуживанием.

В ряде стран, таких как Англия, Нидерланды, Германия, Словения и Дания, для решения задач организации путевых работ и технического обслуживания инфраструктуры, включая высокоскоростные линии, применяется

комплексный системный подход. Он реализуется через программно-технологическую систему IRISSYS (International Railway Inspection and Services System) – Международную систему технического контроля и обслуживания железных дорог. Данная система обеспечивает поддержку всего процесса управления инфраструктурой: от текущего анализа данных технического контроля до формирования задач по техническому обслуживанию. IRISSYS позволяет выявлять наиболее уязвимые участки инфраструктуры и определять причины возникающих неисправностей. Кроме того, система обеспечивает информационную поддержку планирования работ и контроля бюджета на техническое обслуживание, а также хранит данные о состоянии инфраструктуры. Она способна интегрировать исходную информацию от различных измерительных систем без необходимости их доработки или изменения программного обеспечения. [6].

IRISSYS позволяет определять дефекты на самом высоком доступном уровне. Интервалы измерений от источника контроля могут быть практически неограниченно малы (рис. 3. и рис. 4). Обычно он имеет диапазон от нескольких метров (например, при оптическом контроле) до нескольких значений на сантиметр (например, гофра, толщина контактной проволоки). [7].

Эта система даёт возможность получить диагностические данные по единому и комплексному анализу. Единый анализ означает анализ данных по одному конкретному объекту инфраструктуры (например, геометрии пути, контактной сети). Эти данные могут быть представлены точечными или секционными данными. В дополнение к профессиональной оценке конкретных данных о состоянии (например, только геометрии трассы), данные о различных элементах трассы (например, геометрии трассы и контактной сети) также могут быть просмотрены одновременно. Этот подход называется комплексным анализом.

В Великобритании управление состоянием железнодорожных путей осуществляется на достаточно высоком уровне. Разработка эффективной стратегии управления является сложной задачей, так как требует учета взаимосвязанных процессов износа пути, инспекций, технического обслуживания и обновления инфраструктуры. [8].

Для анализа стратегии управления применяется марковская модель, позволяющая прогнозировать изменение состояния участка пути во времени. Модель описывает, как состояние пути изменяется в зависимости от выбранной стратегии обслуживания. Параметры модели, связанные с содержанием, ремонтом и обновлением пути, могут изменяться для оценки



их влияния на жизненный цикл железнодорожного пути. Таким образом, марковская модель служит простым и эффективным инструментом для исследования различных стратегий управления путевой инфраструктурой.

В Великобритании состояние геометрии пути регулярно оценивается с помощью путеизмерительных устройств. Контроль осуществляется на участках длиной более 220 ярдов (1/8 мили). Результаты серии измерений используются для принятия решений о необходимости и сроках проведения технического обслуживания.

Если параметры геометрии пути выходят за допустимые пределы, выполняется плановое техническое обслуживание, направленное на восстановление нормативного состояния пути. В случаях, когда состояние пути продолжает ухудшаться до начала ремонта, из соображений безопасности вводятся ограничения скорости движения поездов до выполнения необходимых работ.

Основная цель стратегии управления железнодорожной инфраструктурой заключается в обеспечении требуемого качества пути с точки зрения безопасности движения и комфорта пассажиров при минимальных эксплуатационных затратах. Техническое обслуживание является одним из ключевых факторов, влияющих на экономическую эффективность железной дороги.

Для исследования процессов управления путевой инфраструктурой используются различные стохастические модели. Они объединяют процессы износа и технического обслуживания, позволяя прогнозировать изменение состояния пути во времени. В ряде моделей состояние пути представляется через интегральный показатель качества пути – Track Quality Index (TQI), который формируется как линейная комбинация нескольких параметров геометрии рельсового пути.

Управление железнодорожными путями включает планирование содержаний и технического обслуживания, необходимых для контроля состояния пути и предотвращения последствий его износа.

В Японии был разработан метод технического обслуживания железнодорожных путей, основанный на оценке рисков и анализе изображений. Лаборатория геометрии и технического обслуживания путей создала технологию определения опасных факторов, которые могут увеличить масштаб последствий при сходе поезда с рельсов. [9].

Также была разработана модель управления техническим обслуживанием, позволяющая рассчитывать допустимые значения неровностей пути и оптимальные интервалы проверок с учетом

затрат на содержание пути и возможного ущерба от аварий.

Традиционно решение о проведении ремонта принимается путем сравнения результатов измерений с установленными нормативными значениями. Однако новый подход основан на оценке рисков: для управления состоянием пути используются данные мониторинга и модели прогнозирования риска.

Для визуализации результатов был создан специальный просмотрщик данных об опасностях. Он позволяет:

- отображать результаты анализа вместе с изображениями, полученными с поездов;
- показывать распределение опасных участков на карте и схеме пути;
- отображать информацию о трассе и инфраструктурных сооружениях.

Система также совместима с LABOCS (Laboratory's Conversational System) – программным обеспечением для работы с базами данных, широко применяемым при обслуживании железнодорожных путей.

В результате стало возможным:

- выявлять факторы, увеличивающие последствия схода поездов с рельсов, с помощью анализа изображений;
- прогнозировать состояние пути;
- определять оптимальные параметры технического обслуживания и периодичность проверок с учетом как эксплуатационных затрат, так и риска аварий.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На участках железных дорог с интенсивным движением грузовых и скоростных пассажирских поездов особое значение приобретает знание фактического состояния верхнего строения пути, а также способность принимать обоснованные решения на основе информации, характеризующей его состояние. Это становится столь же важным условием эффективной эксплуатации, как обеспечение путевого хозяйства материалами, оборудованием и техникой. От достоверной оценки состояния верхнего строения пути напрямую зависят безопасность движения поездов и объём финансовых затрат на проведение ремонтных работ [1].

Сегодня в Европе, Северной и Южной Америке, Африке и Азиатско-Тихоокеанских странах действуют нормативные документы International Rail Standards (IRS) в которых приводятся все требования к железнодорожной инфраструктуре. Одним из таких документов является UIC 714 R [10], что описывает класс пути и наработки тоннажа по участкам.



Планирование ремонтов пути по стандартам UIC базируется на стратегии жизненного цикла объектов (Asset Management). Главная цель – перейти от аварийного ремонта к предиктивному (прогностическому) обслуживанию на основе фактического состояния пути и накопленного тоннажа.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый анализ показал, что современные системы содержания железнодорожного пути всё больше ориентируются на цифровизацию и прогнозирование технического состояния инфраструктуры. В России планирование ремонтов основывается на диагностических данных [4], прогнозе состояния пути и автоматизированных системах управления. Зарубежный опыт демонстрирует высокую эффективность интеллектуальных систем мониторинга, позволяющих выявлять дефекты в режиме реального времени. В Норвегии и странах Европы активно применяются цифровые платформы и датчики контроля состояния пути. Рассмотренные подходы позволяют перейти от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию инфраструктуры. Наиболее эффективной стратегией является прогнозирующее техническое обслуживание, позволяющее снизить риск отказов и уменьшить эксплуатационные затраты. Использование стандартов UIC и концепции Asset Management обеспечивает более рациональное планирование межремонтных сроков. Полученные результаты подтверждают необходимость внедрения интеллектуальных систем диагностики и анализа данных в практику путевого хозяйства. Это способствует повышению безопасности движения поездов, снижению затрат и увеличению срока службы элементов верхнего строения пути [10].

Иллюстрации и формулы.

На рисунке 1 представлена схема методики среднесрочного прогнозирования и планирования ремонтов пути. Схема отображает:

- прогнозирование изменения состояния пути;
- экономическая оценка;
- оптимизация;



Рис. 1. – Схема методики среднесрочного прогнозирования и планирования ремонтов пути [4]

На рисунке 2 приводится система цифрового мониторинга пути в Норвегии. Система представляет собой цифровой мониторинг и его достоинства.



Рис. 2. – Система цифрового мониторинга пути в Норвегии [5]

(места установки датчиков на карте справа соответствуют показанным на фрагментах пути слева: темно-синий – на крестовине, светло-синий – на остряке, желтый и красный – на прямой)

Рисунок 3 информирует о геометрическом анализе пути, полученном программой Localhost-Data analyser. На рисунке показывается результаты по скорости, колес и профилю пути.

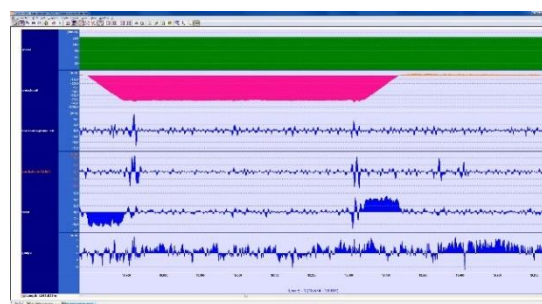


Рис. 3. – Геометрический анализ пути, полученный программой Localhost-Data analyser [7]

На рисунке 4 тоже имеются информации по дефектам рельсов в программном обеспечении



Localhost-Data analyser. Рисунок описывает анализ обнаружения неисправностей в пути.

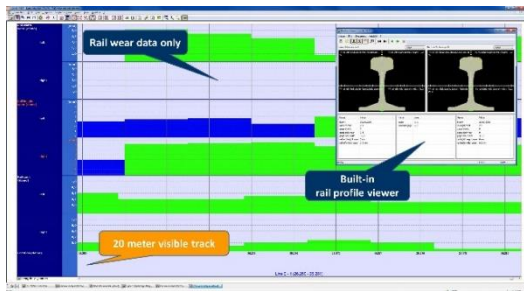


Рис. 4. – Анализ дефектов рельсов в программном обеспечении Localhost-Data analyser [7]

При практической оценке для ВСП среднегодового (нормативного) объема ремонтов данного вида на главном пути применяется известная эмпирическая формула [2].

$$W = \frac{\Gamma_{\text{cp}} \cdot L}{T_{\text{H}}}$$

где, W – среднегодовой объем ремонта данного вида;

Γ_{cp} – средняя грузонапряженность;

L – протяженность главного пути направления;

T_{H} – средняя межремонтная норма наработки тоннажа.

Согласно IRS 70714 [10], определяется класс линии. От этого зависят нормативные межремонтные сроки. Расчет ведется через фиктивный (приведенный) тоннаж T_f (в сутках)

$$T_f = \lambda_v \cdot S_v \cdot T_v^l + \lambda_m \cdot S_m \cdot K_m \cdot T_m^l$$

где: T_v^l – реальный тоннаж пассажирских поездов;

T_m^l – реальный тоннаж грузовых поездов;

S_v и S_m – коэффициенты, учитывающие скорости движения поездов;

λ_v и λ_m – коэффициенты, учитывающие влияние износа осей тяговых узлов и их процентную долю в общем объеме грузовых и пассажирских перевозок;

K_m – коэффициент, учитывающий как влияние нагрузки, так и износ грузовых тележек.

5. ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования были рассмотрены современные подходы к планированию содержания и ремонта железнодорожного пути, применяемые в зарубежных странах. Установлено, что развитие путевого хозяйства связано с внедрением цифровых технологий, автоматизированных систем диагностики и методов прогнозирования технического состояния инфраструктуры. Анализ зарубежного опыта показал высокую эффективность систем мониторинга и

предиктивного обслуживания, основанных на обработке данных о фактическом состоянии пути. Определено, что применение интеллектуальных систем управления позволяет своевременно выявлять дефекты, оптимизировать сроки выполнения ремонтных работ и снижать эксплуатационные расходы. Кроме того, использование международных стандартов и концепции управления жизненным циклом инфраструктуры способствует повышению надёжности и безопасности движения поездов. Полученные результаты подтверждают перспективность дальнейшего развития цифровой диагностики и автоматизации процессов управления техническим состоянием верхнего строения пути.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

[1] Основы технической диагностики сооружений и устройств путевого хозяйства / А. Д. Омаров, Р. С. Закиров. – Ч. 1. – Алматы, 2000. – 178 с.

[2] Управление техническим состоянием верхнего строения пути: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. М. Филиппов. – Москва, 1997.

[3] Положение о системе ведения путевого хозяйства АО «Узбекистон темир йуллари». Ташкент, 2024.

[4] Бельтюков, В. П. Оптимизация среднесрочных перспективных планов ремонтов железнодорожного пути // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 3(34).

[5] Космин, А. В. Цифровой мониторинг пути в Норвегии // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 1.

[6] Симонюк, И. А. Прогнозирование интенсивности накопления остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути для среднесрочного планирования путевых работ: дис. ... канд. техн. наук / И. А. Симонюк. – Санкт-Петербург, 2014.

[7] Erdmann Software [Электронный ресурс].

– [URL:https://www.erdmannsoftware.com/index.php?article_id=38&clang=2](https://www.erdmannsoftware.com/index.php?article_id=38&clang=2)

[8] Prescott D., Andrews J. Investigating railway track asset management using a Markov analysis // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2015. Vol. 229, No. 4. Pp. 402–416. DOI: 10.1177/0954409713511965.



[9] Shimizu A., Miwa M. Development of Risk-based Railway Track Maintenance Method Using Image Analysing Technology // Quarterly Report of RTRI. 2019. Vol. 60, No. 4. Nov. Pp.

[10] UIC Code 714 R. Classification of lines for the purpose of track maintenance. – 4th ed. – 2009.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS / СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Эргашев
Улугбек
Эркинжон угли**

Кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Инженерия железных
дорог», Ташкентский
государственный
транспортный университет

E-mail:

ulugbek.ergashev.1988@mail.ru

Тел.: +99 (890) 010-55-25.

<https://orcid.org/0000-0002-1537-5919>

**Махамаджонов
Шухратжон
Шавкат угли**

Базовый докторант кафедры
«Инженерия железных
дорог», Ташкентский
государственный
транспортный университет

E-mail:

shuhratshavkatovich0204@gmail.com

Тел.: +99 (894) 944-39-71.

<https://orcid.org/0000-0002-3315-4968>



Hydraulic Calculation of Culverts in Railway Earthwork Embankments

A. Kh. Abdujabbarov¹^a, P. A. Begmatov¹^b, J.B. Yuldashaliev¹^c

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The article examines the issues of designing culverts in railway embankments located in seismic regions, taking into account the operational characteristics of the foundations of these structures and the terrain conditions. Based on the obtained and briefly described experimental methodologies, recommendations are provided for selecting structural designs suitable for seismic areas. In addition, new structural solutions combining reliability under seismic loading with reduced consumption of construction materials have been developed. The proposed theoretical solutions are supported and refined through experimental investigations.

Keywords: Earth embankment, railway track superstructure, seismic forces, embankments, cuttings, seismic resistance

1. INTRODUCTION

The results of experimental and theoretical studies have shown that the seismic resistance of culverts within railway embankments largely depends on the dynamic parameters of the roadbed, which in turn significantly reduces their seismic stability. This explains the extensive damage commonly observed in the areas of culverts and embankments during earthquakes.

Analysis of the consequences of numerous earthquakes indicates that reinforced concrete culverts installed in earth embankments represent one of the weakest components of railway roadbed structures, often resulting in partial or even complete failure. However, up to the present time, seismic protection measures have not been adequately incorporated into the design of these structures, and calculations of stresses and displacements during the design process of culverts in embankments are generally not performed.

This particularly applies to reinforced concrete culvert structures designed for the Baikal–Amur Mainline, as well as for railways in the republics of Central Asia and Uzbekistan, a considerable portion of which passes through regions characterized by high seismic activity [1, 2, 3, 4].

It is well known that damage to culverts within embankments occurs due to the following factors:

- the effect of seismic inertial forces acting on the structure;
- deformation of the embankment, which leads to a loss of foundation stability manifested in the form of non-uniform settlement of the culvert along its length.

Accordingly, the effect of seismic inertial forces on culverts located within railway embankments is considered first.

2. METHODOLOGY


Analysis of earthquake consequences indicates that the most hazardous direction of seismic impact is the transverse direction relative to the culvert axis within the embankment. Therefore, when selecting an appropriate dynamic design model for culverts in railway earth embankments, this factor of the critical direction of seismic wave propagation for the given engineering structure must be taken into account.

In the analysis of seismic inertial forces, the soil conditions of the culvert foundation are assumed to be sufficiently stable and strong, which is frequently the case in practice, since reinforced concrete culverts in railway embankments are generally constructed on dense soils with relatively low compressibility coefficients or on preliminarily compacted foundations.

It should be noted that culverts within embankments, which are widely used in railway and highway construction, possess a number of specific structural and operational characteristics, as well as distinct dynamic parameters. These features make it impossible to identify them analytically with pipelines laid in trenches, which are generally located below the ground surface and often have considerable longitudinal extension in plan.

One of the major problems in the theory of seismic resistance is that seismic forces determined by different methods are often inconsistent with one another. As a result, the reliability of calculations performed in the design of structures and in the study of their behavior under seismic conditions remains insufficiently accurate, showing mainly qualitative

^a <https://orcid.org/0000-0001-7097-5071>

^b <https://orcid.org/0000-0003-0160-9814>

^c <https://orcid.org/0009-0001-9643-860X>



agreement with actual behavior. This fact indicates the necessity of experimental verification and refinement in the calculation of engineering structures subjected to seismic forces.

Both domestic and foreign scientific literature [5, 6] contain numerous examples of structural analysis under seismic loading based on accelerogram (seismogram) laws. Analysis of seismograms has shown that, as a simplified mathematical interpretation, soil displacement during an earthquake may be represented by the superposition of a series of harmonic functions of the following form:

$$W_p = \sum_{i=1}^n a_{0i} L^{-\varepsilon_{0i}t} \sin(\omega_i t + \gamma_i) \quad (1)$$

where:

W_p – soil displacement;

a_{0i} – initial amplitude of the corresponding harmonic component;

ε_{0i} – soil damping coefficient;

ω_i – vibration frequency of the corresponding harmonic component;

γ_i – phase angle determining the initiation moment of the corresponding harmonic component;

t – time.

As is well known, the combined action of such harmonic functions with different parameters (i.e., different initial amplitudes a_{0i} , frequencies ω_i , damping coefficients ε_{0i} , and activation times t) may produce highly diverse patterns of soil displacement, thereby practically describing any law of motion.

If it is assumed that all components of expression (1) possess equal initial acceleration amplitudes and identical damping characteristics, but different frequencies, then it is evident that the greatest effect on a single-degree-of-freedom system will be produced by the harmonic component whose frequency ω_i is equal or close to the natural vibration frequency of the system, denoted by p .

Taking this into account, it may be concluded that, as a further approximation of the simplified computational model of a seismic phenomenon, it is most appropriate to consider the effect on the structure of only one component from expression (1), namely the component producing the maximum dynamic effect.

Consequently, the simplified practical seismic analysis may be reduced to the determination of forces and deformations arising in the structure under the action of a single damped sinusoidal function, the frequency of which may vary within certain limits, i.e.

$$W_p = A_0 L^{-\varepsilon_{0i}t} \sin \omega t \quad (2)$$

For extended structures, such as culverts within embankments, the relationship between the length of the structure and the wavelength of longitudinal

seismic waves propagating through the soil is of considerable importance. In this regard, the principal analytical approach is to represent soil motion during earthquakes in the form of a traveling wave with variable intensity:

$$W_p(x, t) = A_0 L^{-\varepsilon_{0i}(t - \frac{x}{c_p})} \sin \omega(t - \frac{x}{c_p}) \quad (3)$$

where:

A_0 – amplitude of forced vibrations;

ε_{0i} – damping coefficient of soil vibrations;

x – coordinate of the point under consideration;

ω – frequency of forced vibrations;

c_p – propagation velocity of longitudinal seismic waves.

The above-described methodology may now be applied to the analysis of seismic vibrations of culverts within embankments.

As is well known, the requirements imposed on a dynamic computational model are such that, on the one hand, it must adequately account for the parameters characterizing structural deformation in the direction of seismic force action and accurately represent mass distribution, while on the other hand, it must remain sufficiently simple for practical calculations. The adopted computational model should make it possible to formulate the deformation conditions of the structure in the form of corresponding mathematical expressions. Such an approach is characteristic of both static and dynamic analyses.

In practice, in order to satisfy these requirements and enable the derivation of mathematical relationships, the actual structure of a culvert within an embankment must be considerably simplified. Assumptions are widely employed in engineering calculations because they substantially reduce computational complexity, while the errors associated with such idealizations are generally insignificant. Moreover, simplifications not only facilitate calculations by reducing computational effort, but also decrease the likelihood of errors and unavoidable inaccuracies in numerical analysis, thereby contributing to more reliable results. However, this should not lead to the conclusion that any simplification is always rational and justified. Simplifications are appropriate only when they do not distort the essential aspects of the analysis while significantly facilitating computations.

The primary task in ensuring the seismic stability of culverts within embankments is to guarantee uniform settlement of the culvert along its entire length. Only after this condition is addressed does it become appropriate to consider the analysis of culverts under the action of inertial seismic forces. In the presence of sufficiently dense and weakly compressible foundation soils, the principal issue becomes the calculation of culverts subjected to inertial seismic forces caused both by the self-weight



of the culvert and by the attached mass of surrounding soil.

As previously noted, the selection of a rational computational model is of great practical importance. Let us now proceed to the specific choice of a dynamic computational model for a culvert within an embankment subjected to a seismic wave described by expression (3). Under such seismic excitation, the primary interest lies in the relative displacements of various points along the culvert length.

A dynamic computational model is proposed (Fig. 3.2), based on the assumption that the soil displacements for points located within the same segment are approximately identical. Therefore, the displacements of these points are assumed equal to the displacement of the segment's center of gravity. As a result, a computational dynamic model with unknown parameters in the form of transverse forces is obtained. This simplification does not introduce significant inaccuracies into the analytical system. The proposed dynamic model under the given seismic excitation is characterized by unknown parameters, namely the relative displacements of the segments, $W_i(x,t)$, which must be determined.

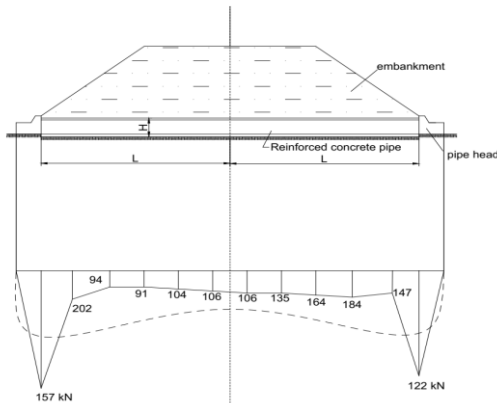


Fig. 3.2

If the force method is applied to the stated problem, the system of canonical equations may be written in the following form:

$$\begin{cases} \delta_{11}x_1 + \delta_{12}x_2 + \Delta_1p = 0 \\ \delta_{21}x_1 + \delta_{22}x_2 + \delta_{23}x_3 + \Delta_2p = 0 \\ \delta_{32}x_2 + \delta_{33}x_3 + \delta_{34} + \Delta_3p = 0 \\ \delta_{i(i-1)}x_{(i-1)} + \delta_{ii}x_i + \delta_{i(i+1)}x_{(i+1)} + \Delta_i p = 0 \\ \delta_{(n-1)n}x_{(n-1)} + \delta_{nn}x_n + \delta_{n(n+1)}x_{(n+1)} + \Delta_n p = 0 \\ \delta_{(n+1)n}x_n + \delta_{(n+1)(n+1)}x_{(n+1)} + \Delta_{(n+1)}p = 0 \end{cases} \quad (4)$$

The unit displacements δ_{ij} are determined using the Gorbunov-Posadov solution for rigid plates [7]. In order for the plate to be considered rigid, the following condition must be satisfied:

$$n_{min} = \frac{L}{H_{sech}} \sqrt{3\pi \frac{E_r}{E_\tau} \frac{1-v_\tau^2}{1-v_r^2}} \quad (5)$$

where: L, H_{sech}, n – (parameters shown in Fig. 3.1) E_r, E_τ – deformation moduli of the soil and culvert material, respectively; v_r, v_τ – Poisson's ratios of the soil and culvert material, respectively.

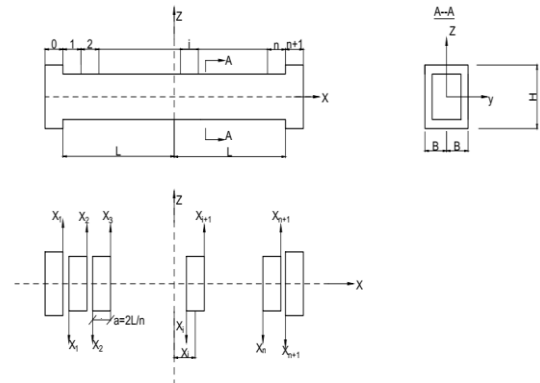


Fig. 3.1. Dynamic computational model of a culvert within an embankment with unknown parameters in the form of transverse forces

Determination of Unit Displacements

In studies [7, 8], the problem of the displacement of a rigid plate with dimensions $2a \times 2b$ subjected to a bending moment M and a concentrated force P_0 was solved.

The settlement of the plate caused by the action of a centrally applied concentrated force P_0 is determined by the expression:

$$W = \frac{1-v_\tau^2}{E_r} K_0 \frac{P_0}{\sqrt{F}} = \frac{1-v_\tau^2}{E_r} K_0 \frac{P_0}{\sqrt{ab}} \quad (6)$$

The coefficient K_0 is determined depending on the aspect ratio of the rectangular plate, $\alpha = a/b$ according to Table 1.

Table 1

α	1	1,5	2	3	5	7	10
K_0	0,8	0,86	0,85	0,8	0,76	0,72	0,6
	8	5	5	3	5	5	7

The angle of rotation caused by moments M_x (acting in the vertical plane parallel to the larger side $2a$) and M_y (acting in the vertical plane parallel to the smaller side $2b$) is determined, respectively, by the following expressions:

$$\begin{cases} tg\varphi_x \approx \varphi_x \frac{1-v_\tau^2}{E_r} K_1 \frac{M_x}{a^3} \\ tg\varphi_y \approx \varphi_y \frac{1-v_\tau^2}{E_r} K_2 \frac{M_x}{b^3} \end{cases} \quad (7)$$

The coefficients K_1 and K_2 in these formulas are determined according to Table 2.

Table 2

α	1	1,5	2	3	5	7	10
----------	---	-----	---	---	---	---	----



K_1	0,5	0,6	0,8	1,1	1,4	1,7	2,0
	5	7	5		5		
K_2	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0
	3	3	39	36	45	05	74

Using the above formulas, the values of unit displacements δ_{ij} can be obtained from the following relationships:

$$\begin{cases} \delta_{ij} = \frac{1-\nu_r^2}{E_r} K_{ij} \frac{n}{L} - \frac{1-\nu_r^2}{2E_r} K_{0i} \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{bL}} \\ \delta_{ij} = 2 \left(\frac{1-\nu_r^2}{2E_r} K_{0j} \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{bL}} - \frac{1-\nu_r^2}{2E_r} K_{li} \frac{n}{L} \right) \end{cases} \quad (8)$$

The initial data used for comparison of results were adopted from Example 1. The calculation results are presented in Fig. 3.5, which shows the dependence graph of $\bar{x}_1^{max} = mx_1^{max}$ the value of K_{Q1} . It should be noted that $m \leq 1$

The graph demonstrates that, in order to reduce x_1^{max} by a factor of 10, it is necessary to ensure a joint flexibility coefficient of $36 \cdot 10^{-4}$ M/kH. Based on this value, the material and dimensions of the flexible joint may be selected using the following expression:

$$K_{Q1} = \frac{\delta_{CT}}{b \delta_{CT} E_{CT}} \quad (9)$$

where E_{CT} is the deformation modulus of the joint material. Other designations are shown in Fig. 3.3(b).

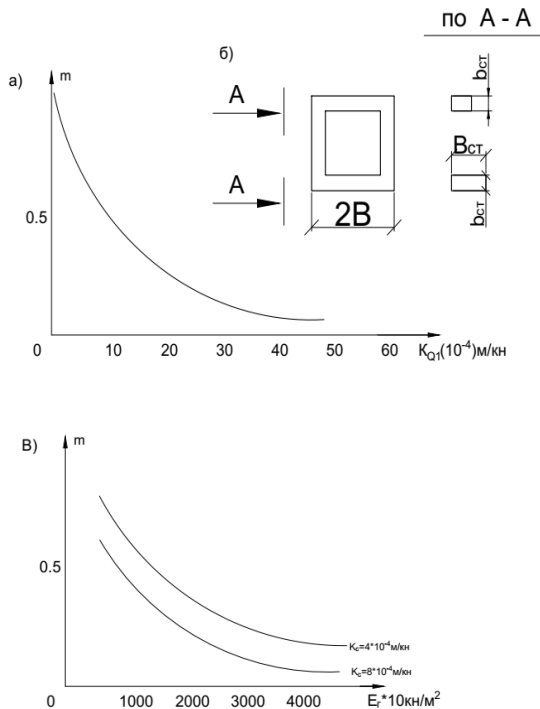


Fig. 3.3

The graph showing the dependence of the flexibility coefficient K_{Q1} on the soil deformation modulus E_r , indicates that, as E_r increases, the required flexibility

coefficient decreases (under otherwise identical conditions) in order to reduce the forces acting within the given section (Fig. 3.6).

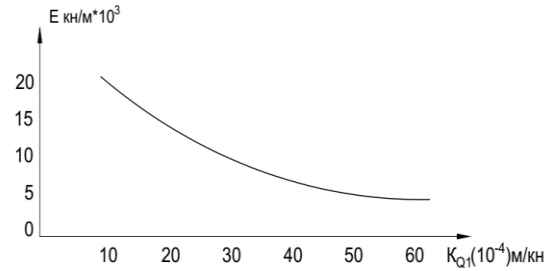


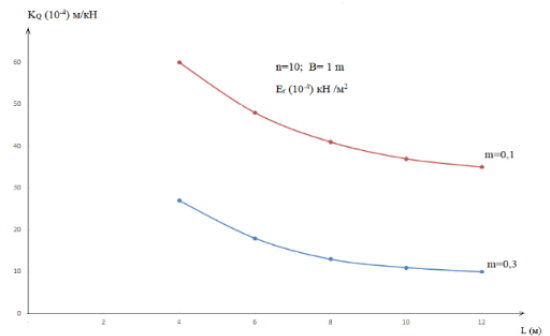
Fig.3.6

Let us establish the dependence of the flexibility coefficient K_{Q1} on the value of b , i.e., on the dimensions of the culvert cross-section. First, based on Tables 3.1 and 3.2, the following relationships are obtained:

$$K_{Q1} = 0,855 - 0,025 \left(\frac{L}{b_n} \right); \quad K_{11} = 0,3 \left(\frac{L}{b_n} \right) + 0,25 \quad (10)$$

Then, the expression for determining K_{Q1} may be written as:

$$K_{Q1} = \frac{4(1-\nu_r^2)}{E_r} \left[0,427 \sqrt{\frac{n}{bL}} - 0,0125 \left(\sqrt{\frac{L}{nb^3}} + \frac{0,3}{b} + 0,25 \frac{n}{L} \right) \frac{1-m}{m} \right] \quad (11)$$



Using this expression, the graph of the dependence $K_{Q1} = \phi(b)$ (Fig. 3.5) and the graph of the dependence $K_{Q1} = \phi(L)$ (Fig. 3.4) were obtained.

3. CONCLUSIONS

1. In order to ensure the seismic resistance of culverts within embankments, it is necessary to select seismically stable foundation soils during the site investigation stage. If such soils are absent, soil strengthening measures for the culvert foundation must be designed.



2. The soil surrounding culverts within embankments should possess high density and strength characteristics, which reduce stresses in the culvert sections under seismic loading.
3. Flexible joints installed in critical sections of culverts are capable of significantly reducing and redistributing stresses within the structure.

REFERENCES

- [1] A. Kh. Abdujabbarov “Consideration of Seismic Effects in the Design of Reinforced Concrete Culverts under Embankments.” *Transport Construction*, 1979, pp. 43–44.
- [2] A. Abdujabbarov, I. B. Zakharov “Improving Reliability and Reducing the Cost of Railway Engineering Structures in Mountainous Areas.” Proceedings of the Third International Scientific and Practical Conference *Transport of Eurasia: Outlook into the 21st Century*, Almaty, 2004, pp. 90–92.
- [3] E. S. Ashpiz, A. I. Gasanov, B. E. Glyuzberg *Railway Track: Textbook*. Moscow: Federal State Educational and Methodological Center for Railway Transport Education, 2013, 544 p.
- [4] E. S. Ashpiz *Monitoring of Operating Railway Embankments: Theoretical Foundations and Practical Solutions*. Doctoral Dissertation in Engineering Sciences, Moscow, 2002, 361 p.
- [5] V. T. Rasskazovsky, I. Kh. Aliev, E. Abalimov “Influence of Seismic Field Nonuniformity on the Response of Single-Story Industrial Buildings.” *Calculation and Design of Buildings for Seismic Regions*, Moscow, 1988, pp. 46–52.

[6] G. M. Stoyanovich, V. V. Pupatenko, K. V. Zmeev “Ensuring Track Stability in the Transition Zone between Engineering Structures and Earth Embankments.” *Track and Track Facilities*, 2017, No. 10, pp. 14–17.

[7] M. P. Gorbunov-Posadov, T. A. Malikov *Calculation of Structures on Elastic Foundations*. Moscow: Stroyizdat, 1973, p. 450.

[8] A. M. Nikonov *Railway Track on Engineering Structures*. Textbook. Moscow: Educational and Methodological Center for Railway Transport Education, 2007, 293 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Abdujabbarov
Abdukhamit
Khalilovich** Tashkent State Transport University, professor
E-mail:
a.abdujabbarov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7097-5071>

**Begmatov
Pardaboy
Abdurahimovich** Tashkent State Transport University, PhD
E-mail:
pbegmatov1986@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0160-9814>

**Yuldashaliyev
Jamshidbek
Bakhodir o`g`li** Tashkent State Transport University, assistant E-mail:
jamshidyuldashaliyev601@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-9643-860X>



Assessment of the Technical and Economic Efficiency of Using Diagnostic Tools

N.R. Mukhammadiev¹^a, G.R. Khalfin¹^b

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: The article describes a feasibility study showing how effective the created diagnostic tools are for monitoring the condition of intermediate fastener nodes. The scientific and technical developments implemented in railway transport are described in terms of the effectiveness of their implementation and ensuring traffic safety. The economic efficiency of a single prevented derailment of rolling stock from damage to tracks and structures using the developed diagnostic tools is calculated, and the expediency of introducing diagnostic tools DS-F01 and DS-F02 to measure the forces of pressing the terminals of the Pandrol Fastclip fasteners on the bottom of the rail is determined, which ensure timely diagnosis of the condition of the track, increase train safety and prevent traffic accidents.

Keywords: Train derailment, efficiency, damage, diagnostic tool, costs, cost, result

Оценка технико-экономической эффективности использования диагностических средств

Мухаммадиев Н.Р.¹^a, Хальфин Г.Р.¹^b

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация В статье описывается о технико-экономическом обосновании, показывающем, насколько эффективны созданные диагностические средства для контроля состояния узлов промежуточных креплений. Описаны внедряемые на железнодорожном транспорте научно-технические разработки, с точки зрения эффективности их реализации и обеспечения безопасности движения. Рассчитана экономическая эффективность от одного предотвращенного схода подвижного состава от повреждений пути и сооружений при использовании разработанных диагностических средств, а также определена целесообразность внедрения диагностических средств ДС-F01 и ДС-F02 для измерения усилий нажатия клемм креплений Pandrol Fastclip на подошву рельса, которые обеспечивают своевременную диагностику состояния пути, повышают безопасность движения поездов и позволяют предупредить транспортные происшествия.

Ключевые слова: Сход поездов, эффективность, ущерб, диагностическое средство, затраты, стоимость, результат

1. ВВЕДЕНИЕ

«Эффективность» — это понятие, которое применяется для оценки и анализа экономической полезности, повышения общего технического уровня инженерных сооружений вследствие осуществляемых вложений ресурсов (инвестиций) с целью получения полезного результата в течение определённого периода времени в будущем. При этом приоритетным становится разработка и внедрение актуальных технических решений, обеспечивающих технико-технологическую эффективность и наилучшую стратегию менеджмента.

Формула для оценки экономической эффективности описывается следующим соотношением:


$$\mathcal{E} = P/Z, \quad (1)$$

где P – полезный результат;

Z – затраты на получение полезного результата.

Короче говоря, когда мы смотрим на результаты и затраты, то измеряем это в чем-то, что можно сравнить (в деньгах), так что эффективность можно выразить в процентах или долях. Производство в транспорте, хоть и имеет свои особенности, все равно основывается на том, как работают объективные экономические законы – например, закон стоимости, диалектика, убывание предельной полезности и так далее.

^a <https://orcid.org/0009-0004-2390-6961>

^b <https://orcid.org/0000-0002-7217-8161>



Поэтому методы оценки эффективности в общем универсальны. Что касается результата (это числитель при оценке эффективности), его еще называют эффектом. В отличие от эффективности, результат можно измерять в абсолютных значениях, то есть не только в деньгах, но и в любых других единицах, которые показывают полезные результаты работы или характеристики продукта. Но полезным эффектом считается не вся сумма результата, а только то, как он изменился после внедрения чего-то нового (например, рост прибыли, экономия ресурсов или сохранение жизни пассажиров и т.д.).

Некоторые эффекты могут измеряться достаточно сложно, иметь различную природу и иногда сводятся к трудно измеряемому числом качественным различиям. Ряд эффектов проявляется за пределами отрасли или региона, в которых осуществляются затраты. В этом случае от наиболее прозрачных способов оценки эффективности относительным показателем переходят к оценке по системе показателей различной природы, но с учетом возможной сопоставимости затрат, результатов и систем показателей оценки [10].

Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта в настоящее время строится на соблюдении принципа «приоритет безопасности движения». Суть принципа «Приоритет безопасности движения» заключается в повышении не только безопасности, но и эффективности [2].

Внедряемые на железнодорожном транспорте научно-технические разработки, с точки зрения эффективности их реализации и обеспечения безопасности движения можно разделить на 4 категории:

- не ведущие к росту, как эффективности, так и безопасности;
- ведущие к росту эффективности, но не способствующие росту безопасности;
- ведущие к росту безопасности, но не способствующие росту эффективности;
- ведущие к росту, как безопасности, так и эффективности.

Разработанный комплекс диагностических средств контроля состояния узлов промежуточных креплений относится к четвертой категории эффективности, поскольку обеспечивает повышение безопасности эксплуатации бесстыкового пути и обеспечивает снижение ущерба железнодорожному транспорту из-за предотвращения выбросов пути при движении всех видов поездов.

2. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет ущерба, наносимого транспортными происшествиями (в том числе выбросами плетей бесстыкового пути), производится путем определения размера затрат, связанных с повреждением грузовых и пассажирских вагонов, тягового подвижного состава, моторвагонного подвижного состава, путевых машин, элементов инфраструктуры, средств связи, работой восстановительного поезда, повреждением и потерей груза, задержками грузов и пассажиров в пути следования, нанесением вреда здоровью и жизни людей, вовлеченных в транспортные происшествия [1, 5, 6, 11].

Расчет ущерба в соответствии осуществляется по следующей формуле:

$$Y = \sum_{i=1}^{19} Y_i \quad (2)$$

где: Y- ущерб вследствие транспортных происшествий;

Y₁- ущерб от повреждений грузовых вагонов;

Y₂- ущерб от повреждений пассажирских вагонов;

Y₃- ущерб от повреждений тягового подвижного состава;

Y₄- ущерб от повреждения моторвагонного подвижного состава;

Y₅- ущерб от повреждения путевых машин;

Y₆ - ущерб от повреждения вагонов пассажирского скоростного и высокоскоростного сообщения;

Y₇- ущерб от повреждений пути и сооружений;

Y₈ - ущерб от повреждений устройств электрификации и электроснабжения;

Y₉- ущерб от повреждений устройств автоматики и телемеханики;

Y₁₀- ущерб от повреждений устройств и сооружений связи;

Y₁₁- ущерб от повреждений прочих объектов инфраструктуры;

Y₁₂- ущерб от повреждений и потери груза;

Y₁₃- затраты на работу восстановительного поезда;

Y₁₄- ущерб от нарушений графика движения поездов на участках;

Y₁₅- ущерб от задержек грузов в пути следования;

Y₁₆- ущерб от нарушения сроков доставки грузов;

Y₁₇- ущерб от причинения вреда здоровью и жизни людей, вовлеченных в транспортные происшествия;

Y₁₈- экологический ущерб;

Y₁₉- прочие составляющие ущерба.

Размеры всех видов ущерба от транспортных происшествий, а также их количество и периодичность, на АО «Ўзбекистон темир



йўллари» являются служебной информацией и не могут быть использованы для оценки перспективной эффективности внедрения в путевом хозяйстве комплекса диагностических средств контроля состояния узлов промежуточных скреплений. В связи с этим оценка эффективности внедрения может быть выполнена на основании предположения, что будет обеспечено предупреждение не менее одного выброса бесстыкового пути сопровождаемого сходом подвижного состава [7, 8, 12].

Рассмотрим только один из девятнадцати возможных ущербов от схода подвижного состава: У₇- ущерб от повреждений пути и сооружений. При этом будем считать, что повреждено только верхнее строение железнодорожного пути на протяжении 250 погонных метров. Для восстановления движения поездов по графику с установленными скоростями необходимо

провести замену разрушенной конструкции пути с укладкой новых элементов и деталей верхнего строения пути.

Сумма ущерба У₇ складывается из следующих затрат:

стоимость материалов верхнего строения пути;

стоимость эксплуатации путевых машин и механизмов при ликвидации последствий схода подвижного состава;

размер оплаты труда специалистов занятых на ликвидации последствий схода.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стоимость материалов верхнего строения пути, необходимых для ликвидации последствий схода подвижного состава определена в таблице 1 по текущим ценам.

Таблица 1

Стоимость материалов верхнего строения пути

№	Наименование материалов	Ед. изм.	Кол-во	Стоимость ед., млн. сўм	Общая стоимость, млн. сўм
1	Рельсы типа Р65 новые	т	32,5	29,28	951,6
2	Шпалы железобетонные типа ВФ70 с узлами скреплений типа Pandrol Fastclip (при эпюре 1840 шт./км)	шт.	276	1,57	433,3
3	Балласт щебеночный (при норме расхода 1170 м ³ /км)	м ³	146,25	0,114	16,7
	Итого				1401,6

Количество шпал в табл. 1 принято 60 % от общего количества шпал необходимых на 250 метров, т.к. при сходе подвижного состава количество изломанных и перекошенных шпал может составлять 40% и более от общего количества.

Стоимость транспортировки рельсошпальной решетки на расстояние 100 км составляет 2,459 млн. сўм. Транспортировка балласта щебеночного включена в стоимость транспортировки щебня вагоном хоппер-дозатором (табл. 2).

Стоимость эксплуатации основных путевых машин тяжелого типа при ликвидации последствий схода и транспортировки их на расстояние 100 км приведены в таблице 2.

Для определения размеров оплаты труда использованы затраты труда на выполнение соответствующих видов путевых работ:

- сборка новых звеньев на путевой базе ПМС [3] – 4443,4 чел. мин.;

- выполнение работ на перегоне по восстановлению конструкции верхнего строения пути [4] – 3710,2 чел. мин.

Общая трудоемкость выполнения путевых работ составит 8153,6 чел. мин. или 16,99 чел. дн. При тарифной ставке среднего 3.3 разряда работ равной 458 173 сўм. дн. расходы по заработной плате составят 7 784 355 сўм.



Таблица 2

Стоимость транспортировки и эксплуатации путевых машин

№.	Наименование машин и вид выполняемых работ	Транспортировка машин и вагонов к месту работ (100 км), млн. сўм	Продолжительность работы машин, маш. смен	Стоимость одной маш. смен, млн. сўм	Стоимость транспортировки и эксплуатации машин, млн. сўм
1	Укладка пути	0,771	0,39	7,966	3,878
2	Выправка пути	0,709	0,715	5,878	4,913
3	Выгрузка щебня из хоппер-дозаторов	0,624	0,39	0,589	0,853
4	Восстановление целостности плетей	0,652	0,52	2,277	1,836
	Итого				11,48

Общие затраты (ущерб Y_7) на устранение повреждения пути при ликвидации последствий схода показаны в таблице 3.

Таблица 3

Ущерб от повреждений пути

№	Наименование затрат ущерба	Размер ущерба, млн. сўм
1	Стоимость материалов верхнего строения пути и их транспортировка к месту работ	1401,6
2	Расходы по заработной плате	7,78
3	Стоимость эксплуатации и транспортировки путевых машин и вагонов	11,48
	Всего	1 420,86

Затраты на оснащение подразделений путевого хозяйства АО «Ўзбекистон темир йўллари» диагностическими средствами ДС-F01 и ДС-F02 для измерения усилий нажатия клемм скреплений Pandrol Fastclip на подошву рельса составят:

- количество диагностических средств ДС-F01 для определения усилия нажатия клемм скрепления Pandrol Fastclip, необходимое для оснащения дистанций пути АО «Ўзбекистон темир йўллари» составляет 20 шт.; количество диагностических средств ДС-F02 для косвенного определения усилия нажатия клемм скрепления Pandrol Fastclip, необходимое для оснащения дистанций пути АО «Ўзбекистон темир йўллари» составляет 60 шт.;

- стоимость одного серийного диагностического средства ДС-F01 составляет – 10 млн. сўм, стоимость одного серийного

диагностического средства ДС-F02 составляет – 4 млн. сўм. Общая сумма затрат 3 в выражении (1) составит 440 млн. сўм.

Экономическая эффективность, вычисленная по выражению (1), составит 3,23 при абсолютной экономии 980,86 млн. сўм от одного предотвращенного схода подвижного состава.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Затраты на оснащение путевого хозяйства диагностическими средствами ДС-F01 и ДС-F02 будут списываться в течение всего периода срока службы диагностических средств, ориентировочно не менее 10 лет. Если в течение этого периода будет предупрежден только один выброс пути со сходом подвижного состава и разрушением конструкции верхнего строения пути, то внедрение диагностических средств ДС-F01 и ДС-F02 для измерения усилий нажатия клемм скреплений Pandrol Fastclip на подошву рельса экономически оправдано.

Учет только одного вида ущерба из девятнадцати от схода подвижного состава из-за выброса бесстыкового пути показывает экономическую эффективность и целесообразность внедрения диагностических средств ДС-F01 и ДС-F02 для измерения усилий нажатия клемм скреплений Pandrol Fastclip на подошву рельса, которые обеспечивают своевременную диагностику состояния пути, повышают безопасность движения поездов и позволяют предупредить транспортные происшествия.



ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

[1] Методические рекомендации по расчету ущерба от транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта в ОАО «РЖД». Распоряжение ОАО «РЖД» от 15 сентября 2015 г. № 2236 р.

[2] Лapidус В.А. Построение системы менеджмента безопасности движения на принципах КИСМК (корпоративной интегрированной системы менеджмента качества) / В.А. Лapidус // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2010. – № 3.

[3] Типовой технологический процесс №1 «Сборка новых звеньев длиной 25 м со шпалами типа BF70 и промежуточными рельсовыми скреплениями типа Pandrol Fastclip». Ташкент 2005.

[4] Типовой технологический процесс №2 «Капитальный ремонт железнодорожного пути на щебне с укладкой железобетонных шпал типа BF70 со скреплением типа Pandrol Fastclip с использованием комплекта путевых машин тяжелого типа фирмы Plasser&Theurer». Ташкент 2005.

[5] Mirakhmedov, Makhmadjan Mirakhmedovich and Khalfin, Gali-Askar Rustamovich (2020) "INVESTIGATION OF THE LONGITUDINAL HIJACKING FORCE FROM FRICTION BRAKING," *Journal of Tashkent Institute of Railway Engineers*: Vol. 16 : Iss. 4 , Article 19.

[6] Khalfin, Gali-Askar (2020) "RESEARCH OF RUNNING RESISTANCE TO LONGITUDINAL MOVEMENT OF RAILS ON JSC "ZBEKISTON TEMIR YULARI"," *Journal of Tashkent Institute of Railway Engineers*: Vol. 16 : Iss. 2 , Article 3.

[7] Хальфин Гали-Аскар Рустамович Состояние «Маячных» шпал и причины неравномерного распределения продольных напряжений в рельсовой плети // *Universum: технические науки*. 2019. №12-1 (69).

[8] Gali-Askar Rustamovich Khalfin, Muslimakhon Tokhirboevna Yakhyaeva, Shoirakhon Tokhirboevna Yakhyaeva FACTORS DETERMINING THE STABILITY OF A CONTINUOUS WELDED TRACK // *Scientific progress*. 2021. №2.

[9] Khalfin Gali-Askar Rustamovich, & Yakhyaeva Muslimakhon Tokhirboevna. (2021). EFFICIENCY OF EXTENSION OF RAIL LASHES AT JSC "UZBEKISTAN RAILWAYS"; *Innovative Technologica: Methodical Research Journal*, 2(05), 163–166. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W2MHG>

[10] Хальфин Гали-Аскар Рустамович, Пурцеладзе Ирина Борисовна ОЦЕНКА ПОГОННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНОМУ ПЕРЕМЕЩЕНИЮ РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ // *Universum: технические науки*. 2021. №6-2 (87).

[11] Rustamovich, Khalfin G., and Purtseladze I. Borisovna. "Use of a System for Determining the State of a Non-jointed Track to Ensure the Safety of Train Traffic." *JournalNX*, vol. 7, no. 05, 2021, pp. 242-245, doi:10.17605/OSF.IO/U3A2F.

[12] Rustamovich, Khalfin G. "Clamping Force of Intermediate Fasteners and Their Determination." *JournalNX*, vol. 7, no. 05, 2021, pp. 233-236, doi:10.17605/OSF.IO/ETJHF.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS / СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мухаммадиев Нematжон Рахматович / Mukhammadiev Nematjon Raxmatovich Ташкентский государственный транспортный университет, DSc, доцент
Email: nemat.9108@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0004-2390-6961>

Хальфин Гали-Аскар Рустамович / Khalfin Gali-Askar Rustamovich Ташкентский государственный транспортный университет, PhD, доцент
E-mail: galiaskar1991@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7217-8161>



Competency in Working with Genai in Road Engineering Education

B. Salimova¹, R. Hudaykulov¹, D. Aralov¹

¹Tashkent State Transport University, Uzbekistan

Abstract This article develops a competency model for working with generative artificial intelligence (GenAI) for engineering education. GenAI is increasingly used by students to explain methods, prepare rough calculations, and develop arguments, but the engineering value of such support is determined by the student's ability to verify formulas, units of measurement, input data, coefficients, assumptions, and normative statements. Based on a targeted documentary review of international AI competency frameworks, engineering accreditation requirements, research on GenAI in engineering education, and the context of Uzbekistan, an operational framework is developed. It integrates engineering problem statement, prompt quality, independent recalculation, unit and source audit, verification of normative references, error classification, engineering interpretation, and transparent disclosure of AI use. The framework focuses on assignments in road hydrology, drainage, road reconstruction, and design disciplines.

Keywords: GenAI, engineering education, highway engineering, highway hydrology, prompt; verification, engineering judgment, AI competence

Компетенция Работы с Genai В Дорожном Инженерном Образовании

Б. Салимова¹, Р. Худайкулов¹, Д. Аралов¹

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: Статья развивает модель компетенции работы с генеративным искусственным интеллектом (GenAI) для инженерного образования. GenAI всё чаще используется студентами для объяснения методов, подготовки черновых расчётов и поиска аргументов, однако инженерная ценность такой поддержки определяется способностью обучающегося проверить формулу, единицы измерения, исходные данные, коэффициенты, допущения и нормативные утверждения. На основе целевого документального обзора международных рамок ИИ-компетентности, инженерных аккредитационных требований, исследований по GenAI в инженерном образовании и контекста Узбекистана сформирована операциональная рамка. Она соединяет постановку инженерной задачи, качество промпта, независимый пересчёт, аудит единиц и источников, проверку нормативных ссылок, классификацию ошибок, инженерную интерпретацию и прозрачное раскрытие использования ИИ. Рамка ориентирована на задания по дорожной гидрологии, водоотводу, реконструкции дорог и проектным дисциплинам.

Ключевые слова: GenAI; инженерное образование; дорожная инженерия; дорожная гидрология; промпт; верификация; инженерное суждение; ИИ-компетентность


1. ВВЕДЕНИЕ

Генеративный искусственный интеллект постепенно становится частью учебной работы инженеров: он помогает переформулировать задачу, объяснить метод, предложить последовательность расчёта, составить проверочный список или подготовить черновую интерпретацию результата. Для дорожного инженерного образования это создаёт не только новый инструмент, но и новый объект оценивания.

Студент должен превратить ответ GenAI в проверяемое инженерное рассуждение.

В дорожной гидрологии и проектировании дорог риск особенно высок, потому что учебное решение одновременно опирается на расчёт, пространственное мышление, нормативный контекст и профессиональное суждение. Ошибка в площади водосбора, коэффициенте стока, интенсивности дождя, единицах измерения или статусе нормативного требования способна привести к убедительно оформленному, но технически неверному выводу. Поэтому простое

^a <https://orcid.org/0009-0003-7591-3883>

^b <https://orcid.org/0000-0002-9202-9219>

^c <https://orcid.org/0009-0003-1707-1788>



требование «использовать ИИ ответственно» недостаточно для инженерной подготовки: оно должно быть переведено в наблюдаемые действия, которые можно проверить в курсовом проекте, расчётной работе, устной защите и рубрике оценивания.

Терминологически в статье различаются три уровня. Первый уровень составляет ИИ-компетентность как широкая способность понимать, использовать и критически оценивать ИИ-системы. Такой подход представлен в международных рамках UNESCO, OECD и Европейской комиссии, а также в DigComp 2.2, где цифровая компетентность связывается с критическим взаимодействием с новыми технологиями [5; 12; 18; 19]. Второй уровень составляет промптинг как умение формулировать запрос к GenAI с учётом цели, данных, ограничений и ожидаемого способа рассуждения; этот навык всё чаще рассматривается как компонент академической и профессиональной грамотности XXI века [8]. Третий уровень составляет инженерная верификация: самостоятельная проверка расчёта, единиц, допущений, источников и нормативных утверждений. Именно этот уровень превращает работу с GenAI из языковой операции в элемент инженерной подготовки.

Цель статьи – разработать компактную и применимую в учебном процессе рамку компетенции работы с GenAI для дорожного инженерного образования. Задачи статьи включают: уточнение терминологического аппарата; сопоставление рамок ИИ-компетентности с инженерными аккредитационными требованиями; выделение проверяемых компонентов компетенции; демонстрацию их применения на примере дорожной гидрологии; формирование оценочной логики для учебных заданий.

1. Терминологическая и теоретическая основа

ИИ-компетентность в широком смысле описывает способность человека понимать принципы ИИ, взаимодействовать с ИИ-системами, оценивать их социальные и этические последствия и использовать их в образовательной или профессиональной деятельности. Long и Magerko определяют ИИ-грамотность как совокупность компетенций, позволяющих людям критически оценивать ИИ-технологии, взаимодействовать с ними и применять их в разных контекстах [10]. UNESCO развивает этот подход через человекоцентричность, этику, методы ИИ, применение ИИ и проектирование ИИ-систем для студентов и преподавателей [18; 19]. Рамка OECD и Европейской комиссии группирует способности обучающихся вокруг

взаимодействия с ИИ, создания, управления и проектирования [12].

Для дорожной инженерии такой широкий уровень задаёт ценностную и методическую основу, но требует предметного уточнения. В инженерной задаче студент работает не только с текстом, а с физическими величинами, расчётными зависимостями, стандартами, картографическими данными и ограничениями безопасности. Поэтому авторская позиция статьи состоит в следующем: компетенция работы с GenAI в дорожном инженерном образовании является дисциплинарной формой ИИ-компетентности, в которой качество промпта обязательно соединяется с независимой инженерной проверкой результата.

Теоретически рамка опирается на три основания. Первое основание – ИИ-компетентность, задающая критическое и этическое отношение к ИИ-инструментам [5; 10; 12; 18; 19]. Второе основание – инженерное суждение: аккредитационные подходы ABET и EUR-ACE требуют способности формулировать и решать инженерные задачи, учитывать ограничения, интерпретировать данные, коммуницировать результаты и принимать ответственность за решения [1; 6; 9]. ABET также подчёркивает роль человеческого суждения при использовании ИИ в аккредитационном контексте [2]. Третье основание – конструктивное согласование обучения, в котором результаты обучения, учебные действия и оценивание должны образовывать единую систему [3]. Если результатом обучения заявлена ответственная работа с GenAI, то задание должно требовать не только промпта, но и журнала проверки, исправленного расчёта и защищаемого инженерного вывода.

В статье используется следующее рабочее определение: компетенция работы с GenAI в дорожном инженерном образовании – это способность обучающегося формулировать инженерную задачу для генеративной ИИ-системы, задавать данные и ограничения, критически анализировать полученный ответ, независимо проверять расчёты и единицы измерения, соотносить утверждения с источниками и нормативными требованиями, классифицировать ошибки и представлять итоговый вывод как собственное инженерное суждение. Для обеспечения точного восприятия тезисов, излагаемых в статье, в таблице 1 собран ряд использованных терминов.



Таблица 1
Терминологическое разграничение ключевых понятий

Понятие	Содержание	Роль в статье
ИИ-компетентность	Широкая способность понимать, использовать и критически оценивать ИИ-системы	Родовой уровень, задающий этическую и критическую рамку
Промптинг	Формулирование запроса к GenAI с указанием цели, данных, единиц, метода и ограничений	Входной навык, повышающий релевантность ответа
Верификация	Проверка формулы, арифметики, единиц, исходных данных, источников и нормативных утверждений	Инженерный слой, превращающий ответ ИИ в проверяемое решение
Инженерное суждение	Профессиональная интерпретация результата с учётом ограничений, рисков и контекста	Финальный уровень ответственности обучающегося

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОД

Исследование выполнено как целевой документальный обзор с последующей разработкой концептуальной рамки. В анализ включены четыре группы источников: международные документы по ИИ-компетентности и цифровой компетентности; инженерные аккредитационные рамки; исследования о применении GenAI в инженерном и STEM-образовании; нормативно-образовательные документы Узбекистана, отражающие цифровизацию, дистанционное обучение и развитие ИИ.

Отбор источников строился по признакам авторитетности, проверяемости и тематической релевантности. Приоритет получили документы международных организаций, аккредитационных органов, официальные нормативные акты, рецензируемые статьи и материалы инженерно-образовательных конференций. Аналитическая процедура включала извлечение ключевых

положений, кодирование по тематическим признакам, сопоставление рамок ИИ-компетентности с инженерными результатами обучения и выделение действий, которые можно наблюдать в учебной работе.

Кодировочная логика включала десять признаков: ИИ-компетентность; формулирование промпта; проверка ИИ-ответа; инженерное суждение; самостоятельный расчёт; академическая честность и раскрытие использования ИИ; предметная инженерная применимость; интеграция в учебный процесс; оценивание; релевантность дорожному и гидрологическому проектированию. Синтез был направлен на построение педагогически применимой рамки, которую преподаватель может перевести в задание, рубрику и процедуру защиты расчёта.

Контекст Узбекистана включён как пример образовательной системы, где государственная политика в сфере ИИ и цифрового обучения соединяется с задачами подготовки инженеров инфраструктурного профиля. Национальные документы закрепляют развитие ИИ-технологий, цифровизацию высшего образования и организацию дистанционного обучения [4; 14]. Законодательный контекст образования и автомобильных дорог задаёт институциональную рамку для инженерной подготовки и профессиональной ответственности [16; 17].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Структура компетенции работы с GenAI. Проведённый синтез показывает, что компетенция работы с GenAI в дорожном инженерном образовании должна строиться как последовательность связанных действий.

1. Постановка инженерной задачи. Студент определяет, относится ли ситуация к расчёту поверхностного стока, проверке водоотвода, подбору водопропускного сооружения, анализу реконструкции дороги или оценке проектного ограничения.

2. Формулирование промпта: в запросе указываются исходные данные, единицы измерения, требуемый метод, статус задачи и ожидаемая форма объяснения.

3. Критическое чтение ИИ-ответа. Студент выделяет, какие элементы ответа являются расчётом, какие являются объяснением, какие требуют ссылки на источник, а какие относятся к нормативным требованиям.

4. Независимый пересчёт. Оно сохраняет основную инженерную компетентность: обучающийся сам воспроизводит формулу, проверяет арифметику и величину результата.

5. Аудит единиц и допущений, включая преобразование гектаров, квадратных метров,



миллиметров в час, кубических метров в секунду, времени концентрации и периода повторяемости.

6. Проверка источников и нормативных утверждений. Ссылки, предложенные ИИ, сопоставляются с официальными документами, учебными критериями или надёжными инженерными источниками.

7. Классификация ошибки и формирование собственного инженерного вывода.

В дорожной гидрологии эта логика особенно наглядна на примере рационального метода. Для учебной предварительной оценки пикового стока может использоваться метрическая форма:

$$Q = 0,00278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

где Q – расход, м³/с;

C – коэффициент стока;

i – интенсивность дождя, мм/ч;

A – площадь водосбора, га.

В руководствах по дорожной гидрологии рациональный метод рассматривается как один из распространённых способов предварительной оценки малых водосборов при корректном выборе исходных данных и проектных допущений [7]. Если $C = 0,70$, $i = 90$ мм/ч, $A = 0,80$ га, то

$$Q = 0,00278 \cdot 0,70 \cdot 90 \cdot 0,80 \\ = 0,140 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (2)$$

Для студента важен не только итоговый расход, но и доказательство того, что он понимает коэффициент пересчёта, размерность, статус предварительного расчёта и условия применимости метода.

Компетенция работы с GenAI в таком задании проявляется не в копировании полученного ответа, а в аудите. Если ИИ смешал гектары и квадратные километры, пропустил коэффициент 0,00278, выбрал коэффициент стока без обоснования или сослался на неподтверждённый норматив, студент должен обнаружить тип ошибки, исправить расчёт и объяснить, как это влияет на проектный вывод. Тем самым GenAI становится не заменой инженерного мышления, а учебным стимулом для его демонстрации.

Содержательно рамка включает восемь компонентов, описанных в Таблице 2.

Таблица 2

Операциональная модель компетенции работы с GenAI

Компонент	Наблюдаемое учебное действие	Оценочное свидетельство
Постановка задачи	Студент формулирует инженерную проблему, цель расчёта, исходные	Краткое описание задачи и границ решения.

	данные и проектный статус.	
Качество промпта	В запросе указаны метод, данные, единицы, ограничения и требование пошагового рассуждения.	Журнал промптов с исходным запросом.
Независимый пересчёт	Ответ GenAI воспроизводится вручную, в таблице или по принятому учебному методу.	Расчётная трасса с формулой, подстановкой и единицами.
Аудит единиц и допущений	Проверяются размерности, коэффициенты, исходные предпосылки и чувствительные параметры.	Краткая аудиторская заметка.
Проверка источников и норм	Нормативные и источники утверждения сверяются с официальными и учебными документами.	Подтверждённая или отклонённая ссылка.
Классификация ошибок	Ошибки кодируются как формульные, размерностные, исходные, допущенческие, источниковые или нормативные.	Перечень обнаруженных и исправленных ошибок.
Инженерная интерпретация	Студент объясняет, что означает результат для проектного решения.	Финальный вывод, принадлежащий студенту.
Раскрытие использованного GenAI	Фиксируются промпт, ответ, исправления	Приложение к расчётной работе или проекту.



	и степень ИИ-помощи.	
--	----------------------	--

Эта структура согласуется с идеей конструктивного согласования: то, что преподаватель хочет видеть как результат обучения, должно быть прямо встроено в задание и критерии оценивания [3].

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Применение рамки в учебном процессе. Предложенная модель меняет характер заданий с GenAI. Преподаватель получает проверяемый формат работы: студент обращается к GenAI за объяснением или черновой структурой, затем выполняет самостоятельный расчёт, аудирует результат и защищает итоговое решение. Такая организация соответствует современным подходам к оцениванию с ИИ, где важны прозрачность, допустимые уровни помощи и сохранение авторской ответственности обучающегося [13].

В курсах дорожной гидрологии рамка применима к расчёту стока, выбору коэффициента стока, проверке трубы, анализу кювета и ливневого водоотвода. В курсах проектирования автомобильных дорог она применима к проверочным спискам по геометрии трассы, реконструкции, безопасности, водоотводу и ограничениям участка. В курсах ландшафтного проектирования автомобильных дорог GenAI может использоваться для генерации вариантов описания, но инженерная и пространственная логика остаётся предметом самостоятельной проверки.

Особое значение имеет связь с академической честностью. Исследования инженерного образования показывают, что GenAI способен выполнять часть оценочных заданий на уровне, создающем риски для традиционных форм контроля [11]. Экзаменационные и инженерные тестирования также показывают зависимость качества ответа от промпта и наличие ошибок в более сложных задачах [15]. Следовательно, учебная политика должна оценивать не только конечный ответ, но и процесс его получения: исходный запрос, ИИ-ответ, пересчёт, исправления и финальное суждение.

Для преподавателя практическая ценность рамки состоит в возможности перевести общий призыв к ответственному использованию ИИ в конкретную рубрику. Минимальная рубрика может включать семь критериев: постановка задачи, качество промпта, самостоятельный расчёт, проверка единиц, проверка источников и норм, инженерная интерпретация, раскрытие использования ИИ. Такая рубрика поддерживает не наказательную, а обучающую логику: студент

видит, какие действия делают работу инженерно надёжной.

Для образовательных программ Узбекистана рамка полезна как связующее звено между государственной повесткой развития ИИ, цифровизацией образования и инженерной подготовкой. Стратегия развития технологий искусственного интеллекта до 2030 года формирует общий политический вектор, а документы о дистанционном обучении и развитии высшего образования создают условия для цифровой педагогики [4; 14]. В этой среде компетенция работы с GenAI может быть встроена не как отдельный абстрактный модуль, а как практический компонент расчётных и проектных дисциплин.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компетенция работы с GenAI в дорожном инженерном образовании должна пониматься как связка промптинга, самостоятельной проверки и инженерного суждения. GenAI поддерживает объяснение, структурирование задачи и предварительный поиск решений, а образовательная ценность возникает при проверке ответа по формуле, единицам, данным, источникам, нормативным требованиям и проектному контексту.

Предложенная статья формирует терминологически ясную и педагогически применимую рамку такой компетенции. В ней ИИ-компетентность выступает широким основанием, промптинг – входным навыком взаимодействия с системой, а верификация – центральным инженерным механизмом ответственности. Для дорожной гидрологии и проектирования дорог это означает, что студент должен уметь задать корректный запрос, восстановить расчёт, обнаружить ошибки, обосновать исправления и представить итоговый вывод как собственное профессиональное суждение.

Рамка может использоваться при проектировании заданий, рубрик, журналов промптов, расчётных листов и процедур защиты курсовых проектов. Её применение позволяет сохранять преимущества GenAI как учебного помощника и одновременно укреплять базовые инженерные навыки: расчётную дисциплину, контроль размерностей, работу с источниками, нормативную осторожность и ответственность за проектное решение.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] ABET. Criteria for Accrediting Engineering Programs, 2024-2025. Baltimore: ABET, 2023.
- [2] ABET. ABET Accreditation and Artificial



Intelligence.

<https://www.abet.org/accreditation/ai-policy/>.

URL:

[3] Biggs J. Enhancing teaching through constructive alignment // Higher Education. 1996. 32(3). P. 347-364. DOI: 10.1007/BF00138871.

[4] Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan. Resolution No. 559 of 03.10.2022 on distance learning in higher education. URL: <https://lex.uz/en/docs/7600531>.

[5] European Commission JRC. DigComp 2.2: The Digital Competence Framework for Citizens. Luxembourg, 2022. DOI: 10.2760/115376.

[6] European Network for Accreditation of Engineering Education. EUR-ACE Framework Standards and Guidelines. Brussels, 2021.

[7] Federal Highway Administration. Highway Hydrology, Hydraulic Design Series No. 2. 3rd ed. Washington, 2024.

[8] Federiakin D. et al. Prompt engineering as a new 21st century skill // Frontiers in Education. 2024. Vol. 9. DOI: 10.3389/educ.2024.1366434.

[9] Francis R. A., Paretto M. C., Riedner R. Theorizing engineering judgment // Studies in Engineering Education. 2022. 3(1). P. 79-98. DOI: 10.21061/see.90.

[10] Long D., Magerko B. What is AI literacy? // CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2020. DOI: 10.1145/3313831.3376727.

[11] Nikolic S. et al. ChatGPT versus engineering education assessment // European Journal of Engineering Education. 2023. 48(4). P. 559-614. DOI: 10.1080/03043797.2023.2213169.

[12] OECD, European Commission. Empowering Learners for the Age of AI: AI Literacy Framework. Review draft. 2025.

[13] Perkins M. et al. The Artificial Intelligence Assessment Scale // Journal of University Teaching and Learning Practice. 2024. 21(6). DOI: 10.53761/q3azde36.

[14] President of the Republic of Uzbekistan. Resolution No. PQ-358 of 14.10.2024 on the Strategy for the Development of AI Technologies until 2030. URL: <https://lex.uz/docs/7159258>.

[15] Pursnani V., Sermet Y., Demir I. Performance of ChatGPT on the US Fundamentals of

Engineering Exam // Computers and Education: Artificial Intelligence. 2023. Vol. 5. DOI: 10.1016/j.caeai.2023.100183.

[16] Republic of Uzbekistan. Law No. LRU-117 of 02.10.2007 On Automobile Roads. URL: <https://lex.uz/en/docs/6808671>.

[17] Republic of Uzbekistan. Law No. ZRU-637 of 23.09.2020 On Education. URL: <https://lex.uz/ru/docs/5013009>.

[18] UNESCO. AI Competency Framework for Students. Paris: UNESCO, 2024.

[19] UNESCO. AI Competency Framework for Teachers. Paris: UNESCO, 2024.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS / СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Барно Салимова

Ташкентский государственный транспортный университет, Кафедра «Проектирование автомобильных дорог и геоматика»

Email: barno.salimova@inbox.ru
<https://orcid.org/0009-0003-7591-3883>

Рашидбек Худайкулов

Ташкентский государственный транспортный университет, Кафедра «Проектирование автомобильных дорог и геоматика»

E-mail: Rashidbek_19_87@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9202-9219>

Дилшод Аралов

Ташкентский государственный транспортный университет, Кафедра «Проектирование автомобильных дорог и геоматика»

E-mail: dilshod.aralov.96@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-1707-1788>



A. Ilyasov, A. Allamuratov <i>Optimization of Foam Concrete with Fly Ash and Silica Fume for Energy-Efficient Wall Blocks.....</i>	7
A. Adilkhodjaev, T. Amirov <i>The Effect of Heavy-Duty Pavement Concrete Mix Composition on its Physico-Mechanical Properties.....</i>	10
A. Adilkhodjaev, I. Kadirov, F. Abdukadirov, E. Kakharov <i>On the Mechanism of the Influence of Various Micro-Fillers and Chemical Additives on the Microstructure and Strength of Cement Paste.....</i>	15
A. Ismaylova <i>Design-Based Assessment of Hybrid Thermal-Insulating Dry Plaster Mortars for Aerated Concrete Walls in Aral Sea REGION Conditions.....</i>	21
I. Sadikov, G. Isakova, R. Kadirbergenov <i>Visual Determination of Adhesion of Bitum Modified with Defecate with Marble Stone.....</i>	25
Z. Sattorov, N. Madraymov <i>Prospects for Using Foam Concrete That Complies with The Principles of “Green Building”.....</i>	29
Z. Sattorov, O. Otajonov <i>Research Analysis on Partial Replacement of Cement in Concrete with Fly Ash and Wollastonite.....</i>	34
J. Turgaev, N. Takhirjanov <i>Complex Modification of Cement Matrix and Bloated Vermiculite Surface to Increase the Strength of Heat-Isolating Constructional Blocks.....</i>	38
U. Turgunbaev, Y. Murodillaev, D. Sharipova <i>Study of the Effect of Hydrophobic Modifiers on the Properties of Cement Mixtures.....</i>	46
V. Soy, G. Nuriddinova, J. Turgaev, A. Jumageldiev <i>Modification of the Cementitious System As A Method For Densifying the Inter-Pore Walls of Fiber-Reinforced Foam Concrete.....</i>	50
A. Adylkhodjaev, A. Babajanov <i>Physicochemical Fundamentals and Technological Efficiency of Non-Steam Production of Dispersed Reinforced Composites.....</i>	55



A. Mamadaliev, S. Jabbarova <i>Analysis of Modern Research on the Impact of Desert Winds and Sand Processes on Railway Tracks.....</i>	60
Z. Kakharov, I. Purtseladze <i>Improving Saline Soils with a Fiberglass Reinforcing Layer.....</i>	68
K. Lesov, A. Uralov <i>Assessment of the Effect of Geomats on Reducing the Intensity of Deflation of Sandy Soils on Railway Embankment Slopes.....</i>	72
K. Lesov, M. Kenjaliev, A. Mavlanov <i>A Technical and Engineering Analysis of the Parameters for Protective Forest Plantations Along Railways in Areas with Shifting Sands.....</i>	78
A. Uralov, D. Kenjalieva <i>Assessment of Erosion Reduction on Railway Slopes Using Geomats.....</i>	85
M. Muzaffarova <i>Predicting Railway Sand Drifts Using Meteorological Data.....</i>	90
Z. Fazilova <i>Application of Composite Sleepers on Railway Bridge Approaches.....</i>	94
S. Djabbarov, E. Abdualiev <i>Assessment of the Operational Reliability of Railway Water Pipelines in Seismically Active Areas.....</i>	99
S. Salikhanov <i>Modern Principles of Sustainable Bridge Design.....</i>	104
S. Salikhanov, J. Zokirov <i>Methodological Framework for Assessing Durability and Reliability of Reinforced Concrete Bridge Structures.....</i>	108
M. Miralimov, Kh. Urazov, Z. Rakhimjonov, K. Juraev <i>Methods for Calculating Retaining Walls Composed of Modern Prefabricated Elements and Their Stability Conditions.....</i>	113
G. Malikov <i>Analysis of the Strength Characteristics and Micro-Crack Formation Boundaries of Ceramic Concrete During Compression.....</i>	119



V. Soy, U. Shermukhamedov, A. Babaev , N. Mukhammadiev, G. Malikov <i>Analysis of The Influence of Loading Time and Technological Factors on the Deformation of Long-Term Creep of Lightweight Concretes.....</i>	124
E. Urazxanova, K. Markabaeva <i>Passive Cooling Strategies in Residential Architecture of Hot-Dry Uzbek Cities: A Design-Screening Model.....</i>	128
G. Dosjanova <i>Technological Efficiency of Modular Green Roof Systems for Operated Flat Roofs in Nukus Conditions.....</i>	131
Sh. Khalimova, A. Karabaev <i>The Practical Importance of QGIS Technologies in Engineering Geological Mapping.....</i>	135
J. Sodikov, K. Musulmanov, A. Adizov <i>Integrating Roadside Greening and Urban Microclimate into Pedestrian Accessibility Assessment: A Case Study of Tashkent City</i>	140
K. Lesov, Sh. Tadjibaev <i>Resource-Efficient Designs and Organizational-Technological Solutions for Reinforcing the Subgrade in Sandy Soils.....</i>	147
U. Dosmetov <i>Management of Transformation Processes in the Railway Industry of Uzbekistan: Problems, Solutions, and Initial Results.....</i>	152
S. Djabbarov, N. Kodirov <i>Forecasting the Fatigue Life of Rails R65 Using Digital Technologies and Artificial Intelligence.....</i>	158
Kh. Umarov <i>Positive and Negative Aspects of Organizing Heavy-Duty Train Traffic in Increasing the Carrying Capacity of Uzbekistan's Railway Network.....</i>	164
P. Begmatov, F. Eshonov, Sh. Jonkobilov <i>Assessment of Rail Reliability on Metro Tracks.....</i>	169
U. Ergashev, Sh. Makhamadjonov <i>Research of Foreign Experiences in Planning Railway Track Repairs Based on Diagnostic Data.....</i>	173



A. Abdujabbarov, P. Begmatov, J. Yuldashaliev <i>Hydraulic Calculation of Culverts in Railway Earthwork Embankments</i>	180
N. Mukhammadiev, G. Khalfin <i>Assessment of the Technical and Economic Efficiency of Using Diagnostic Tools</i>	185
B. Salimova, R. Hudaykulov, D. Aralov <i>Competency in Working with Genai in Road Engineering Education</i>	190

CONTEXT / MUINDARILJA

