

ISSN ONLINE 2782-1919

**УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**
SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



**Том 3
выпуск**

**4
2022**

**VOL. 3
ISSUE 4**

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

Том 3

Выпуск 4

Ярославль 2022

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

«УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор:	С.В. ФЕДОСОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва)
Заместители главного редактора:	А.А. ИГНАТЬЕВ (к.т.н., доц., Ярославль) П.Б. РАЗГОВОРОВ (д.т.н., проф., Ярославль)
Ответственный секретарь:	Е.С. ЕГОРОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (ученый секретарь Президиума РААСН, акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), В.В. БЕЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Тверь), А.М. БЕЛОСТОЦКИЙ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), Н.И. ВАТИН (советник РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), В.М. ГОТОВЦЕВ (д.т.н., проф., Ярославль), А.В. ЗАХАРОВ (советник РААСН, к. архитектуры, проф., Иваново), А.Б. КАПРАНОВА (д.ф.-м.н., проф., Ярославль), В.И. КОЛЧУНОВ (академик РААСН, д.т.н., проф., Курск), В.Г. КОТЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Йошкар-Ола), Н.Н. КУДРЯШОВ (к. архитектуры, проф., Ярославль), А.Е. ЛЕБЕДЕВ (д.т.н., доц., Ярославль), С.Н. ЛЕОНОВИЧ (иностраннный акад. РААСН, д.т.н., проф., Республика Беларусь, Минск), В.Л. МОНДРУС (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.И. МОХОВ (акад. РАЕН, д.т.н., проф., Москва), П.И. ПОСПЕЛОВ (д.т.н., проф., Москва), Ю.В. ПУХАРЕНКО (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург, Россия), С.П. РУДОБАШТА (д.т.н., проф., Москва), В.Е. РУМЯНЦЕВА (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Иваново), В.П. СЕЛЯЕВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Саранск), М.Ю. ТАРШИС (д.т.н., доц., Ярославль), В.И. ТРАВУШ (вице-президент РААСН, акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.А. ТРЕЩЕВ (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Тула), В.Н. ФЕДОСЕЕВ (д.т.н., проф., Иваново), Г.А. ФОМЕНКО (акад. РАЕН, д.г.н., проф., Ярославль), RADIVOJE MITROVIĆ (д.т.н., проф., Республика Сербия, Белград)

Учредитель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет»
Адрес редакции	150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88
Телефон	+7 (4852) 44-03-67
E-mail	ignatyeva@ystu.ru
Электронный адрес	http://comincon.ru

Журнал издается при содействии Российской Академии архитектуры и строительных наук

Редакторы:	М.А. Канакотина, Л.С. Кокина, В.Б. Доронина
Англ. перевод:	Л.А. Тюкина
Компьютерная верстка:	Е.С. Егоров
Корректор:	О.А. Юрасова
Зарегистрирован	27 ноября 2020 (Свидетельство ЭЛ № ФС 77 - 79733)
Периодичность:	4 раза в год
Подписка и распространение	Свободный доступ

YAROSLAVL STATE TECHNICAL UNIVERSITY

**SMART COMPOSITE
IN CONSTRUCTION**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Established in November 2020, published quarterly

Volume 3

Issue 4

Yaroslavl 2022

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief:	S.V. FEDOSOV (Acad. RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow)
Deputy Editors-in-Chief:	A.A. IGNATYEV (c.en.s., doc., Yaroslavl) P.B. RAZGOVOROV (d.en.s, prof., Yaroslavl)
Executive secretary:	E.S. EGOROV

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

A.A. ABDYKALYKOV (d.en.s., prof., Kyrgyzstan, Bishkek), P.A. AKIMOV (acad. RAACS, d.en.s., prof., Moscow), V.V. BELOV (adv. RAACS, d.en.s, prof., Tver), A.M. BELOSTOTSKIY (acad. RAACS, d.en.s., prof., Moscow), N.I. Vatin (adv. RAACS, d.en.s., prof., Saint-Petersburg, Russia), V.M. GOTOVTSEV (d.en.s, prof., Yaroslavl), A.V. ZAKHAROV (adv. RAACS, c. arch., prof. Ivanovo), A.B. KAPRANOVA (d. physic. and math. sciences, prof., Yaroslavl), V.I. KOLCHUNOV (acad. RAACS, d.en.c, prof., Kursk), V.G. KOTLOV (adv. RACS, d.en.s, prof., Yoshkar-Ola), N.N. KUDRYASHOV (c.arch, prof., Yaroslavl), A.E. LEBEDEV (d.en.s., doc., Yaroslavl), S.N. LEONOVICH (for. acad. RAACS, d.en.s, prof., Belarus, Minsk), V.L. MONDRUS (corr. memb. RAACS, d.en.s., prof., Moscow), A.I. MOKHOV (acad. RANS, d.en.s., prof., Moscow), P.I. POSPELOV (d.en.s, prof., Moscow), Yu.V. PUKHARENKO (corr. memb. RAACS, d.en.s, prof., Saint-Petersburg, Russia), S.P. RUDOBASHTA (d.en.s., prof., Moscow), V.E. RUMYANTSEVA (corr. memb. RAACS, d.en.s., prof., Ivanovo), V.P. SELYAIEV (acad. RAACS, d.en.s., prof., Saransk), M.Yu. TARSHIS (d.en.s., doc., Yaroslavl), V.I. TRAVUSH (Vice Pres. RAACS, acad. RAACS, d.en.s., prof. Moscow), A.A. TRESHCHEV (corr. memb. RAACS, d.en.s., prof., Tula), V.N. FEDOSEEV (d.en.s., prof., Ivanovo), G.A. FOMENKO (acad. RANS, d.geogr.s, prof., Yaroslavl), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD en.s., prof., Serbia, Belgrade)

Founder:	Federal State Budgetary Educational Institution Of Higher Education “Yaroslavl State Technical University”
Editorial office address	88, Moskovsky Prosp., Yaroslavl, 150023, Russia
Telephone	+7 (4852) 44-03-67
E-mail	ignatyevaa@ystu.ru
Website	http://comincon.ru

Published with the assistance of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

Editors:	M.A. Kanakotina, L.S. Kokina, V.B. Doronina
English translator:	L.A. Tyukina
Layout designer:	E.S. Egorov
Proofreader:	O.A. Yurasova
Registration	27 november 2020 (Certificate EL No FS 77 - 79733)
Frequency:	Quarterly
Subscription and distribution	Open Access

СОДЕРЖАНИЕ

Строительные конструкции, здания и сооружения

Burgonutdinov, A.M., Istomina, K.R.

Thin-wall retaining structure operation with reinforced soil backfill using fly ash

Бургонутдинов А.М., Истомина К.Р.

7

Работа тонкостенной подпорной конструкции с обратной засыпкой из армированного грунта с использованием золы-уноса

Строительные материалы и изделия

Lunev, A.A., Schultz, D.O., Dovydenko, A.V.

Obtaining a Geopolymer Hybrid Binder Based on Thermal Energy and Metallurgy By Products

18

Лунев А.А., Шульц Д.О., Довыденко А.В.

Получение геополимерного вяжущего гибридного состава на основе побочных продуктов теплоэнергетики и металлургии

Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Kochetkov A.V., Semenova N.S., Ivanov A.F., Chizhikov I.A.

Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования объектов транспортной инфраструктуры

28

Kochetkov, A.V., Semenova, N.S., Ivanov, A.F., Chizhikov, I.A.

Unmanned Aerial Vehicles Use for the Inspection of Transport Infrastructure Facilities

Чмых Н.В., Бургонутдинов А.М.

Применение временных ограничений на проезд тяжеловесных транспортных средств по автомобильным дорогам пермского края в летний период

39

Chmykh, N.V., Burgonutdinov, A.M.

Application of Temporary Restrictions for Heavy Vehicles on Perm Krai Roads during the Summer Period

Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

Лунёв А.А.

Оценка неоднородности зернового состава золошлаковой смеси на золоотвале Омской ТЭЦ-4

48

Lunev, A.A.

Assessment of the Grain Composition Heterogeneity of the Ash Dump Pond of Omsk TPP-4

Медяков А.А., Анисимов П.Н.

Оценка эффективности применения низкопотенциальной теплоты для отопления спортивных сооружений

62

Medyakov, A.A. & Anisimov, P.N.

Assessment of the Effective Use of Low-Potential Heat for the Sports Facilities Heating

Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности

Расторгуев С.В., Петрова П.В.

Архитектура без границ

72

Rastorguev, S.V., Petrova, P.V.

Architecture without Borders



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_7

Thin-Wall Retaining Structure Operation with Reinforced Soil Backfill Using Fly Ash

A.M. Burgonutdinov, K.R. Istomina

Albert M. Burgonutdinov

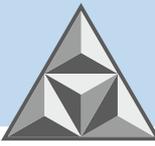
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

burgonutdinov.albert@yandex.ru

Katarina R. Istomina

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

istominakr@yandex.ru



The results of the retaining wall structures with different backfilling options are presented. Issues related to feasibility study of design and materials selection of retaining structures are considered. Estimated cost and estimated labour intensity of erection of each structure were calculated and conclusions were made on the efficiency of retaining wall structures operation.

Key words: retaining structures, reinforced soil, geosynthetic material, fibre reinforcement, fly ash, transportation load

For citation:

Burgonutdinov, A.M. & Istomina, K.R. (2022) Thin-wall retaining structure operation with reinforced soil backfill using fly ash, *Smart Composite in Construction*, 3(4), pp. 7-17 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022.

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_7



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.164.3

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_7

Работа тонкостенной подпорной конструкции с обратной засыпкой из армированного грунта с использованием золы-уноса

А.М. Бургонутдинов, К.Р. Истомина

Альберт Масугутович Бургонутдинов

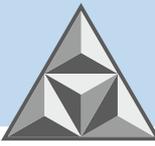
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская
Федерация

burgonutdinov.albert@yandex.ru

Катарина Равилевна Истомина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская
Федерация

istominakr@yandex.ru



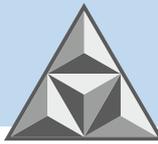
Представлены результаты работы конструкций подпорных стен с различными вариантами обратной засыпки. Рассмотрены вопросы, связанные с технико-экономическим обоснованием выбора конструкции и материалов подпорных сооружений. Рассчитаны сметная стоимость и сметная трудоемкость возведения каждой конструкции и сделаны выводы об эффективности эксплуатации конструкций подпорных стен.

Ключевые слова: подпорные конструкции, армированный грунт, геосинтетический материал, фиброармирование, зола-уноса, транспортная нагрузка

Для цитирования:

Бургонутдинов А.М., Истомина К.Р. Работа тонкостенной подпорной конструкции с обратной засыпкой из армированного грунта с использованием золы-уноса // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 4. С. 7-17. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022.

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_7



INTRODUCTION

Retaining walls are used for the vertical planning of difficult terrains with large differences in levels and for the construction of many underground structures such as tunnels, canals, and cellars. The retaining structures are widely used in hydraulic and transport engineering. Also, they are effectively used as foundations for bridge crossings, viaducts, flyovers, overpasses, and embankments [1, 2].

The choice of design and materials of retaining structures must be technically and economically reasonable. Reinforced soil retaining walls are often used effectively. Reinforcing soils improves their physical and mechanical properties, increases their load-bearing capacity, and reduces their deformability. The economic effect is achieved by reducing the amount of work and the cost of delivering the materials [3-7].

In model tests [1, 8] we obtained data on the effectiveness of reinforcing sandy soil backfill retaining wall with horizontal geosynthetic elements, namely geotextile and geogrid. The efficiency criterion was taken to be the reduction of the horizontal movements of the retaining wall with reinforced soil backfill, relative to the horizontal movements of the retaining wall with conventional soil backfill. Thus, the use of polyamide mesh (as a geogrid analogue) as a reinforcing material was 36.3% and the use of non-woven synthetic material (as a geotextile analogue) was 41.7%.

Nowadays, the development of the construction industry is directly linked to the implementation of new construction technologies and the use of new building materials. Furthermore, in some cases, in order to achieve the greatest economic and environmental benefits, it is possible to replace 'conventional' materials with the waste product. It is very interesting to conduct research when fly ash reinforced with basalt fibres is considered as backfill for the retaining wall [9, 10].

EXPERIMENTAL PART

Fly ash is a fine material obtained from the combustion of solid fuels in thermal power plants. In Russia, more than 70% of electricity is generated by burning coal, so it is an important task to explore the use of this waste product.

The basalt fibre is a waste product from the production of basalt fibres during the extraction process, which in turn is one of the most promising materials as a reinforcement for concrete.

To determine the physical and mechanical properties of the fly ash without reinforcement and with fibre reinforcement, a series of experiments were conducted on a single-plane shear instrument.

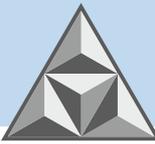
Fly ash with a relative humidity of $W = 22\%$ without reinforcement was used as the material under study; basalt fibres of 13-15 mm in length were used as reinforcement materials. Reinforcement was 1% by mass. Samples of the materials are shown in Fig. 1.

The test results are shown in Table 1.

Table 1. Strength test results

Parameter	Fly ash without reinforcement	Fly ash with basalt fibre reinforcement
Specific adhesion, kPa	18.4	39.0
Angle of internal friction, degrees	35.6	27.0

The analysis of the values showed that fibre reinforcement of the fly ash increases the grip but decreases the angle of internal friction. The use of basalt fibres as a reinforcing material increased



adhesion by 112% and reduced the angle of internal friction by 24%.

The horizontal displacements under constant load were determined by the finite element method. The finite element method makes it possible to create a numerical model of the research object taking into account the natural stress state and the complex layering of soils, changes in their strength and strain characteristics during the construction and operation of structures and calculate simultaneously two limit states.



Fig. 1. Material samples: *a* – fly ash; *b* – ash with basalt fibres

A computer simulation of the retaining wall was performed to test the effectiveness of different backfill options for the retaining structures. PLAXIS software, widely used for geotechnical calculations, was used for numerical modelling of the structure [6].

We chose a five-metre retaining wall as our model; the preliminary dimensions are assigned on the basis of the retaining wall design guidelines. We determined the load application point according to GOST 32960-2014; the temporary moving load we gave a uniformly distributed load intensity of 75.6 kN/m, according to GOST 32960-2014.

The basic dimensions of the retaining wall are shown in Fig. 2.

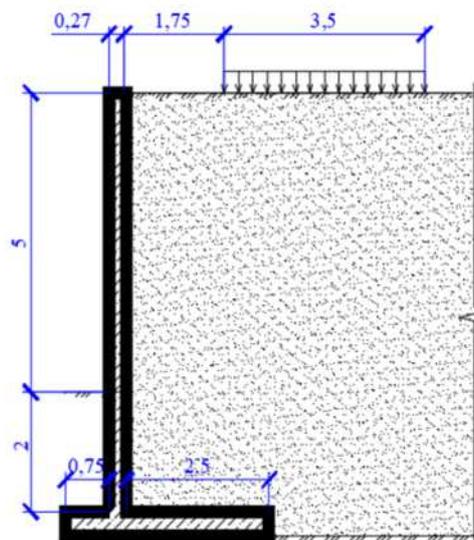


Fig. 2. Material samples: *a* – fly ash; *b* – ash with basalt fibres



The facing is additionally buried two metres into the ground and rests on a 1.0-metre-wide foundation. The alternative is a monolithic solid retaining wall 1.0 m thick with sandy soil backfill.

The following options are considered as types of backfill:

- sand backfill without reinforcement;
- sand backfill with horizontal reinforcement with non-woven geosynthetic material every 50 cm of height;
- sand backfill reinforced with the discrete polypropylene fibres at a rate of 1% fibre by weight of sand;
- backfill using fly ash;
- sand backfill reinforced with the discrete basalt fibres at a rate of 1% fibre by weight of sand.

The Mora-Coulomb model was used for the calculation. Calculation was performed for fixed load according to GOST R 52748-2007 item 4.5, item 5.2.2. The location of the load on the collapsing prism was taken according to SP 35.13330.2011 item 6.12.

RESULT AND DISCUSSION

The calculation results for the horizontal displacement of the retaining wall from its own weight of soil are shown on Fig. 3a, and of the applied load on Fig. 3b.

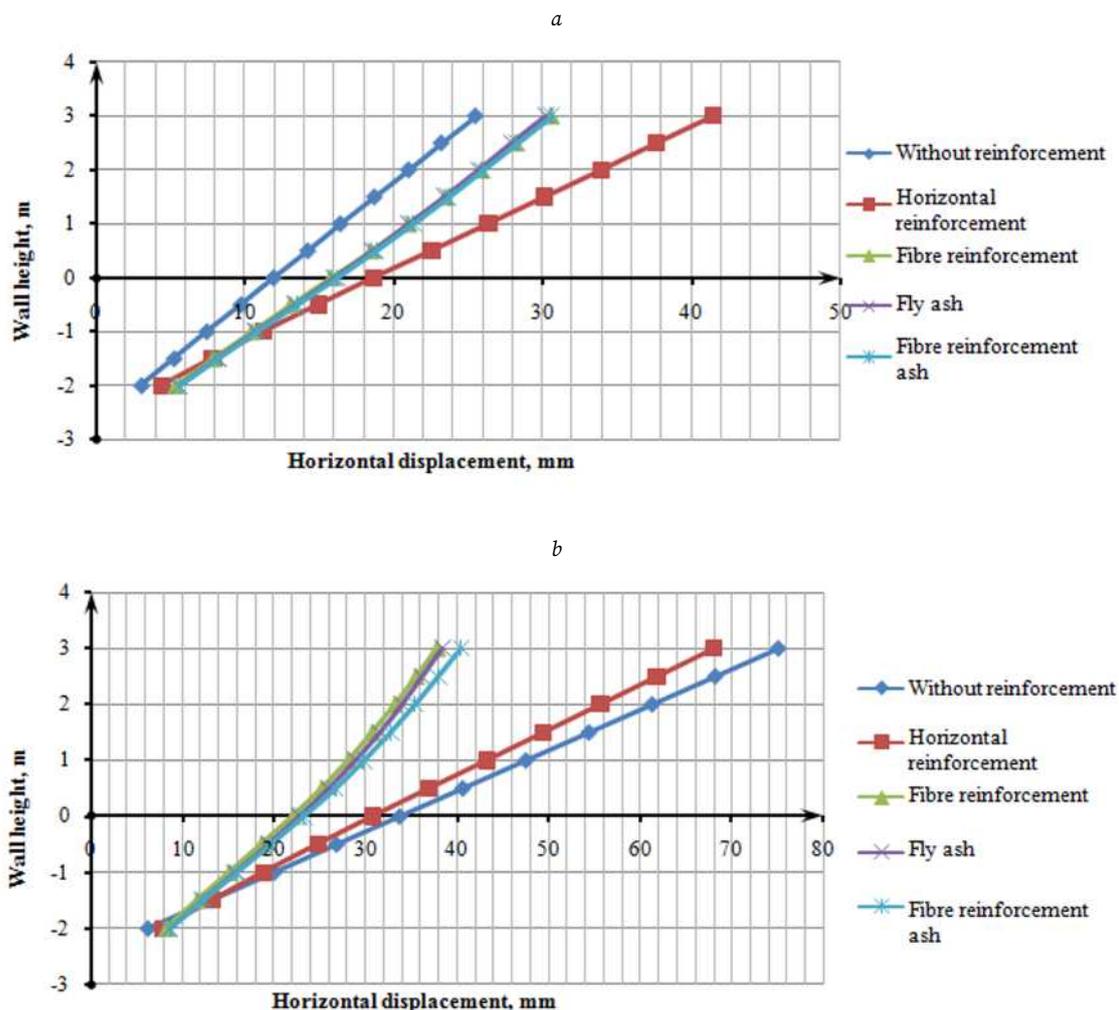
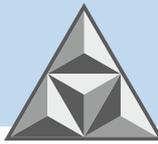


Fig. 3. Horizontal displacement values at the different points along the retaining wall height when acting by its own weight of soil (*a*) and temporary load on the collapsing prism (*b*)



According to the results, the absence of temporary loading causes the minimum horizontal displacement of the wall top, which is 25.5 mm, for the solid retaining wall. The maximum horizontal displacement (41.4 mm) is observed for a reinforced soil retaining wall with geotextile horizontal interlayers. The other backfill options result a displacement of 30.2-30.6 mm.

In the case of a temporary load applied to a collapsing prism, the maximum horizontal displacement of the top point of the wall is 75.1 mm and can be observed at the solid retaining wall. The displacement value of a reinforced soil wall with the geotextile reinforcement decreased by 9.5% relative to a solid retaining wall; the displacement value of the fibre reinforced sand backfill decreased by 49.7%; the displacement value of fly ash backfill decreased by 49.0%; the displacement value of the fibre reinforced fly ash backfill decreased by 46.2%.

When considering the impact of the temporary load on the overall deformation of the retaining wall - the increment of horizontal displacement under the temporary load is in the case of the designing of:

- the traditional retaining wall - 49.6 mm;
- the ground reinforcement with geotextile - 26.6 mm;
- the fibre-reinforced soil - 7.2 mm;
- the fly ash backfill is 8.1 mm;
- the fibre-reinforced ash - 9.8 mm.

The PLAXIS software package mentioned above was used to calculate the retaining structure (Fig. 4).

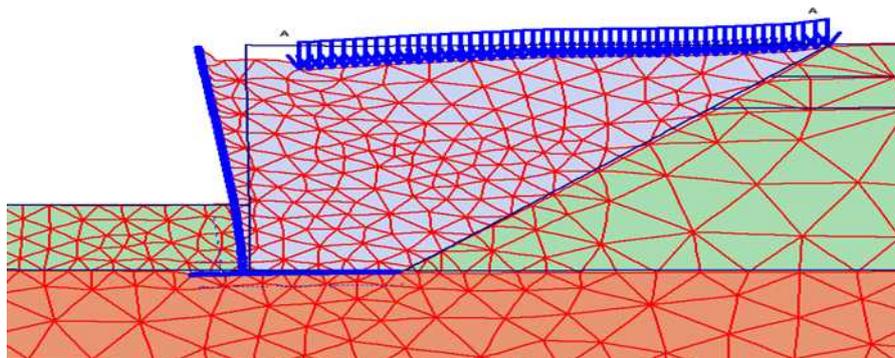


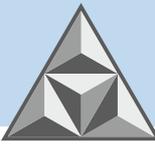
Fig. 4. Calculation results for a retaining wall with load imposed

One of the main factors for choosing technologies and materials for the construction of structures under study, along with their reliability, is their cost. The issues of cost-effective use of resources - material, technical, human - are particularly acute in the current conditions of a market economy. The economic evaluation of the retaining wall structures with different backfill options was determined in accordance with the "Methodology for determining the cost of construction products in the Russian Federation" MDS (Guidance Documents in Construction) 81-35.2004.

The estimated cost per running metre of a retaining wall with the different reinforcement options is presented and the results of the estimated labour requirements are shown below (Figures 5, 6).

Taking into account the criterion of reducing the estimated cost of works, the cost effectiveness of horizontal reinforcement made of the geosynthetic materials was 49.45%, the cost effectiveness of sand reinforcement with discrete polypropylene fibres was 38.2%, the use of fly ash as backfill material was 55.3% and that of basalt fibre reinforced ash was 39.1%.

The calculations for determining the estimated labour costs have shown that using fibre reinforcement increases the estimated labour costs by 2.8% compared to a retaining wall without the



reinforcement. Using of fly ash reduces the estimated labour intensity by 40.5%; reinforcing the sandy soil with non-woven geosynthetics reduces the estimated labour intensity by 39.5%.

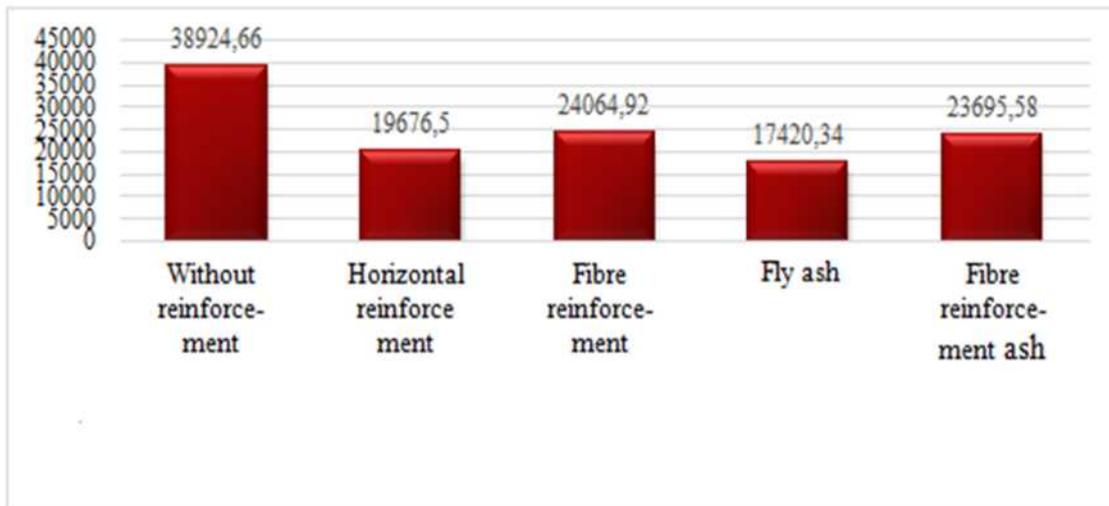


Fig. 5. Calculation of the estimated cost of the work, Rub.

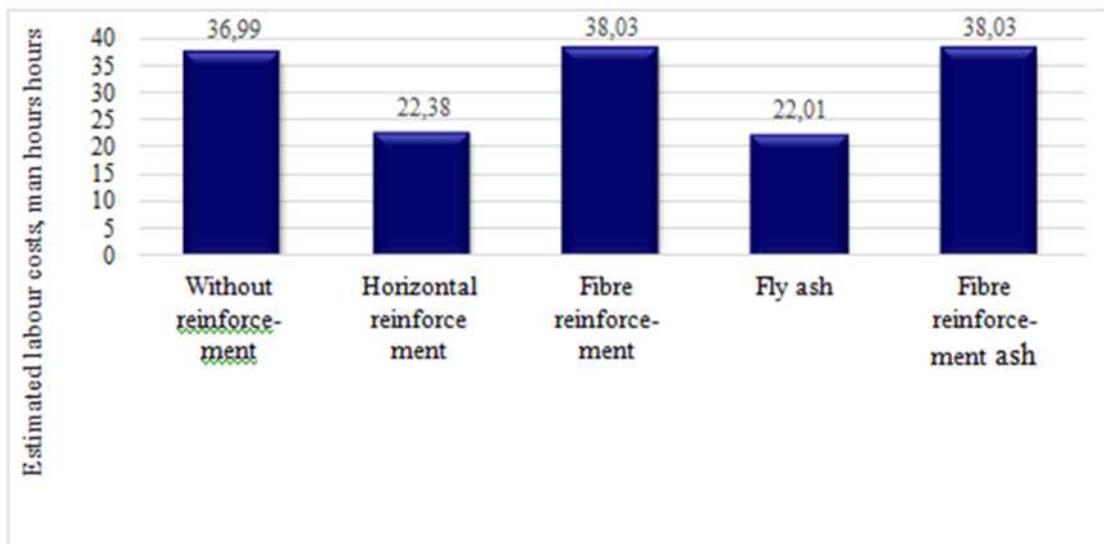


Fig. 6. Calculation of estimated labour costs

CONCLUSION

1) The use of fly ash for retaining the wall constructions stands out as a promising direction to improve the strength and deformation characteristics of soils.

2) When comparing the estimated labour intensity of the work, the most advantageous method is the use of fly ash and horizontal reinforcement. Reinforcing the ground or ash with the fibres is more time-consuming than building a retaining wall without reinforcement.



REFERENCES

1. **Kashapova, K.R. & Kleveko, V.I.** (2016). Results of model tests to determine horizontal deformations of reinforced soil retaining walls, *Vestnik PNIPU. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*, (4), pp. 128-140 (in Russian).
2. **Kashapova, K.R.** (2015) Modelling of reinforced ground foundations of bridge crossings by finite element method, *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, (7-1), pp. 460-463 (in Russian).
3. **Liu, H., Wang, X. & Song, E.** (2011). Reinforcement load and deformation mode of geosynthetic-reinforced soil walls subject to seismic loading during service life, *Geotextiles and Geomembranes*, 29(1), pp. 1-16.
4. **Haza, E., Gotteland, Ph. & Gourc, J.P.** (2000) Design method for local load on a geosynthetic reinforced soil structure, *Geotechnical and Geological Engineering*, 18(4), pp. 243-267.
5. **Mendonca, A., Lopes, M.L. & Pinho-Lopes, M.** (2003) Construction and post-construction behaviour of a geogrid-reinforced steep slope, *Geotechnical and Geological Engineering*, 21(2), pp. 129-147.
6. **Ling, H.I., Yang, S., Leshchinsky, D., Liu, H. & Burke, C.** (2010) Finite-element simulations of full-scale modular-block reinforced soil retaining walls under earthquake loading, *Journal of Engineering Mechanics – ASCE*, 136(5), pp. 653-661.
7. **Shapiro, D.M. & Tarasov, A.A.** (2014) Analytical models of beds of inclined structures and retaining walls of reinforced soils, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 51(4), pp. 181-187.
8. **Kashapova, K.R.** (2016). Planning of model experiments to study retaining walls reinforced with horizontal geosynthetic interlayers, *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, (1), pp. 30-38 (In Russian).
9. **Burgunutdinov, A.M., Istomina, K.R. & Kleveko, V.I.** (2019) Study of retaining structures with reinforced soil backfill, and fiber reinforced fly ash backfill, *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*, (3), pp. 15-22 (in Russian).
10. **Kuznetsova, A.S. & Ponomarev, A.B.** (2015) Planning experiment for studying the stress-strain state of a loaded massive of fibro-armed soil behind a retaining wall, *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, (1), pp. 135-148 (in Russian).

Received 01.12.2022

Approved after reviewing 09.12.2022

Accepted 16.12.2022

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Кашапова К.Р., Клевеко В.И.** Результаты модельных испытаний по определению горизонтальных деформаций армогрунтовых подпорных стен // *Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика*. 2016. №4. С. 128-140.
2. **Кашапова К.Р.** Моделирование армогрунтовых устоев мостовых переходов методом конечных элементов // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2015. № 7-1 (18-1). С. 460-463.



3. **Liu H., Wang X., Song E.** Reinforcement load and deformation mode of geosynthetic-reinforced soil walls subject to seismic loading during service life // *Geotextiles and Geomembranes*. 2011. Vol. 29, № 1. P. 1-16.
4. **Haza E., Gotteland Ph., Gourc J.P.** Design method for local load on a geosynthetic reinforced soil structure // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2000. Vol. 18, № 4. P. 243-267.
5. **Mendonca A., Lopes M.L., Pinho-Lopes M.** Construction and post-construction behaviour of a geogrid-reinforced steep slope // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2003. Vol. 21, № 2. P. 129-147.
6. **Ling H.I., Yang S., Leshchinsky D., Liu H., Burke C.** Finite-element simulations of full-scale modular-block reinforced soil retaining walls under earthquake loading // *Journal of Engineering Mechanics- ASCE*. 2010. Vol. 136, № 5. P. 653-661.
7. **Shapiro D.M., Tarasov A.A.** Analytical models of beds of inclined structures and retaining walls of reinforced soils // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2014. Vol. 51, № 4. P. 181-187.
8. **Кашапова К.Р.** Планирование модельных экспериментов по исследованию работы подпорных стен, армированных горизонтальными геосинтетическими прослойками // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2016. № 1. С. 30-38.
9. **Бургутдинов А.М., Истомина К.Р., Клевеко В.И.** Исследование работы армогрунтовых подпорных конструкций с обратной засыпкой из армированного грунта, а также с использованием обратной засыпки из фиброармированной золы уноса // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2019. № 3. С. 15-22.
10. **Кузнецова А.С., Пономарев А.Б.** Планирование эксперимента по исследованию напряженно-деформированного состояния нагруженного массива фиброармированного грунта, находящегося за подпорной стеной // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2015. № 1. С. 135-148.

Поступила в редакцию 01.12.2022

Одобрена после рецензирования 09.12.2022

Принята к опубликованию 16.12.2022



RESEARCH PAPER

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_18

Obtaining a Geopolymer Hybrid Binder Based on Thermal Energy and Metallurgy By-Products

A.A. Lunev¹, D.O. Schultz², A.V. Dovydenko¹

Alexander A. Lunev

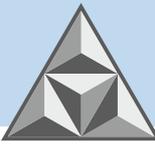
¹Centre of competence in the field of use of secondary material resources in the construction industry, Siberian State Automobile and Road University, Omsk, Russia
lunev.al.al@gmail.com

Denis O. Schultz

²Construction Laboratory, JSC "SU No. 920", Podolsk, Russia
denisschulz13@yandex.ru

Anastasia V. Dovydenko

¹Centre of competence in the field of use of secondary material resources in the construction industry, Siberian State Automobile and Road University, Omsk, Russia
anastasiyadovydenko@yandex.ru



Nowadays, one of the significant issues for the construction industry is the shortage of materials due to the increased volume of work, as well as their rising cost due to the recently imposed anti-Russian restrictions. The most dynamically increasing in price and the most required material in construction at the moment is Portland cement binder. Portland cement production is responsible for more than 7% of the world's carbon dioxide emissions and is a constant source of environmental concern in the neighbouring areas. The solution to these issues could be the creation of a geopolymer binder of hybrid composition from secondary materials of the metallurgical and heat and power industries by their alkaline activation. The purpose of the study was to assess the degree of influence of each mixture component, its content and curing conditions on the mechanical properties of the resulting binder. The results of the study show the possibility of obtaining the required strength values without heat and humidity treatment during the gaining of strength, which allows the hybrid binder to be regarded as an analogue of Portland cement.

Key words: construction, roads, binder, geopolymers, fly ash, blast furnace slag, Portland cement

For citation:

Lunev, A.A., Schultz, D.O. & Dovydenko, A.V. (2022) Obtaining a Geopolymer Hybrid Binder Based on Thermal Energy and Metallurgy By-Products, *Smart Composite in Construction*, 3(4), pp. 18-27 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022.

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_18



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.54

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_18

Получение геополимерного вяжущего гибридного состава на основе побочных продуктов теплоэнергетики и металлургии

А.А. Лунёв¹, Д.О. Шульц², А.В. Довыденко¹

Александр Александрович Лунёв

¹Центр компетенций в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Российская Федерация

lunev.al.al@gmail.com

Денис Олегович Шульц

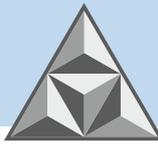
²Строительная лаборатория, АО «СУ № 920», Подольск, Российская Федерация

denisschulz13@yandex.ru

Анастасия Вадимовна Довыденко

¹Центр компетенций в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Российская Федерация

anastasiyadovydenko@yandex.ru



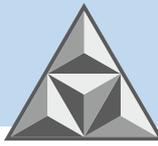
Значительными проблемами строительной отрасли, при общем увеличении объема производимых работ, являются дефицит и удорожание материалов в связи с введенными антироссийскими санкциями. В настоящее время динамично растущим в цене и необходимым в строительстве материалом является портландцементное вяжущее. Производство портландцемента отвечает более чем 7% эмиссии углекислого газа в мире и вызывает опасения по поводу экологической обстановки на окружающих территориях. Решением указанных проблем может стать создание геополимерного вяжущего гибридного состава с включением вторичных материалов металлургической и теплоэнергетической промышленности, подвергнутых щелочной активации. Проведено исследование с целью оценки степени влияния компонентов смеси, их содержания и условий твердения на механические свойства вяжущего. Показана возможность достижения требуемой прочности строительного материала без тепловлажностной обработки, что позволяет рассматривать гибридное вяжущее как аналог портландцемента.

Ключевые слова: строительство, автомобильные дороги, вяжущее, геополимеры, зола-унос, доменный шлак, портландцемент

Для цитирования:

Лунев А.А., Шульц Д.О., Довыденко А.В. Получение геополимерного вяжущего гибридного состава на основе побочных продуктов теплоэнергетики и металлургии // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 4. С. 18-27. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022.

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_18



INTRODUCTION

The volume of road construction in the Russian Federation has increased significantly due to the national project "Safe Quality Roads". Natural increase in the volume of construction work causes a shortage of inert materials and promotes the involvement of local materials in the construction process. Furthermore, the imposing of anti-Russian restrictions has had a significant impact on the cost of Portland cement binders [1]. In order to solve these issues and create the inorganic hybrid binders, it was proposed to use secondary materials from the thermal power and metallurgical industries, of which 1.6 [2] and 5.4 [3] billion tonnes, respectively, have been accumulated in the Russian Federation.

Hybrid binders are artificially synthesised inorganic materials with a polymer structure repeating the atoms of silicon and aluminium in their chains [4]. Depending on the interchanging of the silicon and aluminium atoms, they are subdivided into:

- poly(sialat) (- Si - O - Al - O -);
- poly(sialat-siloxo) (- Si - O - Al - O - Si - O -);
- poly(sialat-disiloxo) (- Si - O - Al - O - Si - O - Si - O -) [5].

The systematic research on geopolymer binders (cements) is relatively recent. They began with Joseph Davidovits's [5] research in the 1980s while analysing samples of ancient Egyptian structures from artificially built rocks [6]. Davidovits established the basic theses of a new theory about geopolymer binders, which are being actively used in the archaeological study, in the search for ways to dispose toxic waste and create geopolymer concretes from natural rock. There is no doubt that Davidovits, who has been active for more than 40 years at the Institute of Geopolymers in France in the study of geopolymer concretes, is the world's best known and the most competent specialist in the field of geopolymer cements. However, his research is largely linked to that of archaeological monuments, which contain no waste from the energy and metallurgical industries and differ considerably from natural materials. Also he did not consider the use of granulated slags which have a different mineral composition compared to slow-cooling blast furnace slags. In addition, all the studies were based on fly ash which is prevalent in Europe but not available in sufficient amounts in Russia.

Many researchers worldwide are studying binders produced by alkaline activation of aluminosilicate raw materials. The leading experts mainly focus on studying geopolymers based on fly ash [7], zeolite [8], metakaolin [9] and other clay materials [10, 11]. There are several studies on the activation of waste marble, travertine and volcanic tuff [12]. Meanwhile features of creating geopolymer binders on the basis of ash-and-slag mixtures are practically not studied all over the world (due to hydration at the dump their chemical composition differs from fly ash composition, and due to ash removal technology the particle size, shape etc. also cause differences of fly ash from ash-and-slag mixture). In addition, the composition of fly ash of different genesis has not been investigated.

The most common hybrid binders consist of fly ash with the addition of ground granulated blast furnace slag [13], providing increased strength and water absorption resistance of the geopolymer due to its lower sorption capacity. If the slag content of the hybrid binder is low, the high strength properties of the binder can be achieved by steaming at 600C[14]. The activators of these binders are silicates [15] and sodium hydroxide [16], potassium hydroxide, phosphoric acid [17], etc. Sodium hydroxide increases the reaction speed and dissolves the solid aluminosilicate, while the potassium hydroxide improves the degree of polymerisation [18]. The disadvantage of alkaline binder activation is the presence of free sodium hydroxide, which causes alkaline corrosion of metals [19]. The paper



[20] mentions that corrosion can be caused by high concentrations of carbon dioxide, so the use of hybrid binders in combination with reinforcement is undesirable. Phosphoric acid additives cause a reduction in the strength of the geopolymer after soaking, which has a negative effect on the quality of structures used outdoors [17].

The properties of the future binder are influenced by: the Si/Al ratio of the raw material; the type and amount of the alkaline activator; the temperature and curing conditions; the introduction of additional additives if a porous binder similar to foamed concrete [18] is desired. The purpose [21] of the study was to investigate the effect of the Si/Al ratio on the properties of future hybrid binders. It is possible to adjust this ratio by adding materials containing high amounts of silica to the mixture; an example of such a material is ash from rice hulls. The results show that this ratio has a negligible effect on the characteristics.

The strength of this type of inorganic binder can reach values between 40 and 80 MPa, while binders with a strength of 25 MPa [22] or more are suitable for construction purposes.

The purpose of our study is to find an optimal mix ratio to produce a mix that is as strong as Portland cement, with as little alkaline activator and granulated blast furnace slag as possible.

EXPERIMENTAL PART

Fly ash. The fly ash was supplied from the dry ash removal unit of EVRAZ ZSMK's Novokuznetsk power plant. This plant was chosen because of the widespread use of Kuznetsky coal-fired TPPs throughout the Russian Federation. We packed the samples in airtight containers to preserve the natural humidity.

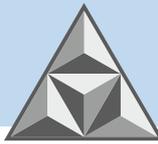
The particle density was determined by the pycnometric method, the residue on the sieve by sieving without water washing, the specific surface by the Blaine air permeability method, the loss on ignition by heating the samples in crucibles at 850 °C and the moisture by calcination to constant mass.

The chemical composition of the fly ash (Table 1) was determined by X-ray fluorescence method. The chemical composition of the ash is low calcium, low sulphate (class F to ASTM C618).

Granulated blast furnace slag. Granulated blast furnace slag produced by BF-5 (Blast Furnace Shop No. 5) was sampled from a stack located at "Novolipetskii metallurgicheskii kombinat" PJSC (PJSC NLMK), Lipetsk. After sampling, the slag was dried to constant weight at (55±5) °C and milled on a 40 ML laboratory drum mill for 4 hours. The physical properties of ground granulated blast furnace slag were determined by the same methods as for the fly ash and are given in Table 1.

Table 1. Physical and chemical properties of the mixture components

Name of parameter	Actual data		Unit of measure
	TPP EVRAZ ZSMK, Kuznetsky UB	BF-5, PJSC "NLMK"	
1. Particle density	2.1	2.6	g/cm ³
2. Residual on sieve 008	1.5	8.0	%
3. Specific surface area	274.7	195.0	m ³ /kg
4. Losses on ignition	1.1-1.5	4.5	%
5. Humidity	0.3	0.1	%
SiO ₂	58.2	28.8	%
Al ₂ O ₃	24.1	6.0	%
Fe ₂ O ₃	7.4	0.4	%
CaO	1.7	52.1	%
MgO	0.8	7.6	%
Na ₂ O + K ₂ O	1.7	1.4	%
SO ₃	0.8	-	%
loss on ignition	1.3	4.5	%



Liquid glass. For the experiments we used sodium liquid glass with a density of 2.47 g/cm^3 .

Sodium hydroxide. NaOH was supplied by OOO "Omskreaktiv" in the form of granules, which were milled on an MG-1F mill to a size of less than 0.02 mm. In terms of purity, sodium hydroxide is pure for analysis, anhydrous.

Water. We used tap drinking water for the tests. The hydrogen index (pH) is 7.7, the content of soluble salts is 65 mg/dm^3 , including SO_4 ions 28.4 mg/dm^3 and chlorides 15 mg/dm^3 .

The idea of the experiment was to prepare a binder based on ground blast furnace slag and fly ash activated with an alkaline component. The alkaline component consisted of a mixture of sodium hydroxide and an aqueous solution of sodium silicate (liquid glass).

We conducted the first experiment to assess the effect of the ratio of fly ash to ground blast furnace slag at the same alkaline activator content, and the second one was a full factor experiment with a number of factors of 3.

The first cycle. We made compression strength specimens containing 4% sodium hydroxide (NaOH) and 25% Na_2SiO_3 aqueous solution - liquid glass (LG) as part of an experiment to evaluate the effect of the ratio of fly ash to ground blast furnace slag. For this purpose, we used FC20-6 cube moulds with dimensions of $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}$. In order to prevent the binder from adhering to the mould, we used petrolatum as a release agent. The moulds and the metal plate that were used as the base of the moulds were heavily greased.

The first mixing step was the mixing of the dry ingredients (GGBFS and FA). Then we added an alkaline activator and did the final mixing with the addition of water in the amount corresponding to the normal density.

We filled the prepared mixture into the cubic moulds. In order to obtain a homogeneous distribution of the mixture over the mould, we used a vibrating table, VIBR-X-15, to compact it for 2 minutes. We placed the moulds with the material under study in the curing chamber KNT-1.

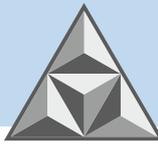
A day after moulding we demoulded the samples and placed them in a curing chamber for curing at 22°C . After 7 days, we tested all the samples to determine the compressive strength on an IR 5081-5 press at a speed of 6 mm/min . The same steps were done for samples at 28 days of age.

The second cycle. We decided to use ground granulated blast furnace slag (GGBFS), sodium hydroxide (NaOH) and liquid glass (LG) as factors in a complete factor experiment. In addition, we prepared the composition to obtain values for the components corresponding to the middle of the interval of variation of the factors.

Table 2. Recipes for binder mixtures

No. of the composition	Content of mixture components, %				Water content per 250 g mixture without liquid glass, g
	Dry components		Alkaline activator		
	GGBFS	Fly Ash	NaOH	Liquid glass	
1	45	51	4	25	10.0
2	15	81	4	25	10.0
3	45	53	2	25	10.0
4	15	83	2	25	10.0
5	45	51	4	15	25.0
6	15	81	4	15	25.0
7	45	53	2	15	25.0
8	15	83	2	15	25.0
9	30	67	3	20	18.5

The production of the samples was conducted in the same way as in the description of the first test cycle.



RESULT AND DISCUSSION

The results of the first test cycle (Fig. 1) show a steady increase in the strength of the binder as the GGBFS content increases up to 90%, after which a decrease in strength is observed.

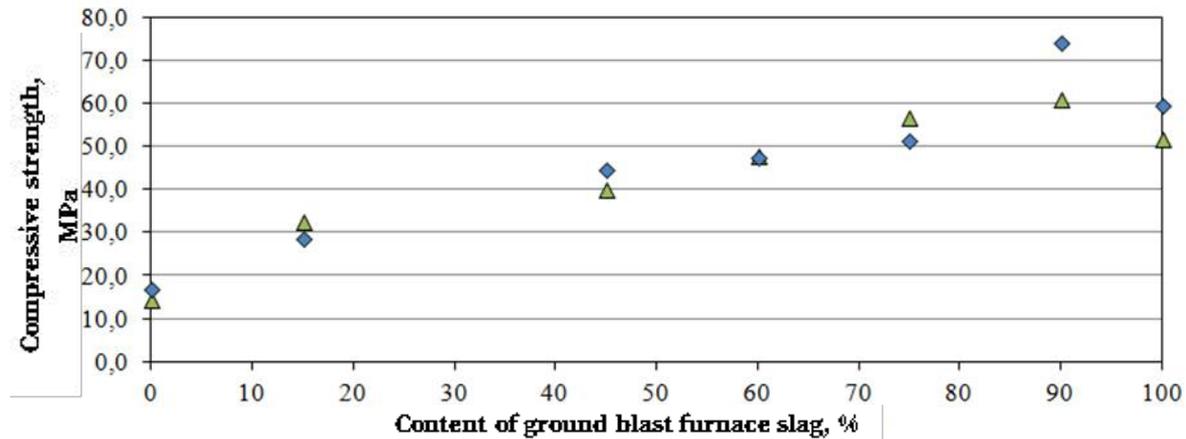


Fig. 1. Dependence between compressive strength and content of ground blast furnace slag (fly ash):
▲ - on the 7th day; ◆ - on the 28th day

The fall in strength with an increase above 90% of GGBFS content is probably due to the absence of voids in the material structure, which allow new joints to form without a significant increase of internal stresses. At the same time, a potentially suitable strength of the binder [22] is already achieved with an GGBFS content of 15 % and this strength increases practically linearly by 5 MPa for every 10 % of GGBFS. Considering the logistics and the need to grind granulated blast furnace slag, we decided to examine a minimum permissible amount of GGBFS in the second cycle of experiments. The results of the second cycle compressive strength tests of the binder samples after curing are shown in Table 3.

Table 3. Test results of the second cycle of tests

Curing time	Compressive strength, MPa								
	No. of the composition								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
7 days	52.3	32.3	24.4	2.4	35.1	8.7	10.0	8.9	16.2
28 days	44.7	28.6	40.9	33.1	29.0	12.8	29.4	12.8	30.1

We used the theory of experiments planning. This allowed us to develop a formula to predict the ultimate strength of the resulting mixture when varying the factors and taking into account their combined effect on the 7th day ($R^2 = 0.99$):

$$R_{Comp7} = 22.12 + 6.30 \cdot X_S + 7.97 \cdot X_{NaOH} + 8.45 \cdot X_{LG} + 5.30 \cdot X_S \cdot X_{NaOH} - 0.54 X_S \cdot X_{LG} + 1.75 \cdot X_{NaOH} \cdot X_{LG} - 1.03 \cdot X_S \cdot X_{NaOH} \cdot X_{LG}$$

where X_i is the content of the mixture component specified in the index.

On the 28th day ($R^2=0.98$):

$$R_{Comp28} = 28.91 + 7.08 \cdot X_S + 0.11 \cdot X_{NaOH} + 7.90 \cdot X_{LG} + 1.00 \cdot X_S \cdot X_{NaOH} - 1.10 X_S \cdot X_{LG} - 0.03 \cdot X_{NaOH} \cdot X_{LG} + 1.08 \cdot X_S \cdot X_{NaOH} \cdot X_{LG}$$

In general, we found that the most significant influence on the strength of the final geopolymer is the content of ground granulated blast furnace slag and sodium silicate solution. The impact of



sodium hydroxide, on the other hand, is favourable in the early stages of hardening, but an increase in concentration above 3% seems to lead to material degradation [19] over time (compositions 1, 2 and 5).

CONCLUSION

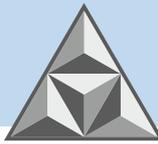
1) Potentially suitable strength of the hybrid binder can be achieved by including ground granulated blast furnace slag of 15%. Without the use of ground granulated blast furnace slag, this cannot be achieved without heat and humidity treatment. The strength index increases linearly by 5 MPa for every 10 % of the input additive.

2) In the presence of sodium hydroxide, strength gain is accelerated during the first 7 days of curing, but additive concentrations above 3% lead to degradation of the material over time.

3) To assess a wide range of physical-chemical properties of binders under alkaline activation it is recommended to conduct additional studies with ash-and-slag mixtures of other composition from power plant dumps as well as to conduct full factor experiments.

REFERENCES

1. **Vojtko, A.R., Legkota, E.V. & CHenskaya, A.M.** (2022) Severe recession and territorial polarization of investments, *Molodoj uchyonyj goda 2022: sbornik statej II Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa, Penza, 25 maya 2022 g.* Penza, pp. 75–78 (in Russian).
2. **Igumina, V.A. & Rekhovskaya, E.O.** (2021) Recycling of waste from TPP plants, *Materialy XIX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Omsk, 9–11 nov. 2021 g.* Omsk: Omskij gos. tekhn. un-t, pp. 84-87 (in Russian).
3. **Fomina, E.V. & Fransishko De Kastro, B.K.** (2020) Ecological aspects of the use of steelmaking slag, *Racional'noe ispol'zovanie prirodnyh resursov i pererabotka tekhnogennogo syr'ya: fundamental'nye problemy nauki, materialovedenie, himiya i biotekhnologiya, Alushta-Belgorod, 1-5 iunya 2020 g.* Belgorod, pp. 290–295 (in Russian).
4. **Eroshkina, N.A., Tymchuk, E.I. & Korovkin, M.O.** (2015) Structure formation of geopolymers, *Molodoj uchenyj*, 87, pp. 123–126 (in Russian).
5. **Davidovits, J.** (1991) Geopolymers - Inorganic polymeric new materials, *J. Therm. Anal.*, 37(8), pp. 1633–1656.
6. **Singh, N.B.** (2018) Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material, *Minerals*, 8(7), p. 299. DOI: 10.3390/min8070299.
7. **John, S.K., Nadir, Y. & Girija, K.** (2021). Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review, *Construction and Building Materials*, 280, pp. 1-32. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122443.
8. **Kaya, M. et al.** (2022) Influence of micro Fe₂O₃ and MgO on the physical and mechanical properties of the zeolite and kaolin based geopolymer mortar, *J. Build. Eng.*, 52, pp. 104-443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104443>.
9. **Ma, B. et al.** (2022) The influence of calcium hydroxide on the performance of MK-based geopolymer, *Construction and Building Materials*, 329, pp. 127-224. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127224.
10. **Liew, Y.M. et al.** (2016) Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review, *Prog. Mater. Sci.*, 83, pp. 595–629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>.
11. **Lekshmi, S. & Sudhakumar, J.** (2022) An assessment on the durability performance of fly ash-clay based geopolymer mortar containing clay enhanced with lime and GGBS, *Clean. Mater.*, 5, pp. 100-129. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100129.



12. **Tekin, I.** (2016) Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes, *Construction and Building Materials*, 127, pp. 607–617. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.038.
13. **Liu, M. et al.** (2022) Reusing recycled powder as eco-friendly binder for sustainable GGBS-based geopolymer considering the effects of recycled powder type and replacement rate, *J. Clean. Prod.*, 364, pp. 132656. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132656.
14. **Eroshkina, N.A., Korovkin, M.O. & Korovchenko, I.V.** (2015) Technology for obtaining geopolymer binder based on igneous rocks, *Molodoj uchenyj*, 87, pp. 120–123 (in Russian).
15. **Wu, X., Shen, Y. & Hu, L.** (2022) Performance of geopolymer concrete activated by sodium silicate and silica fume activator, *Case Stud. Constr. Mater.*, 17, pp. 501-513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01513>.
16. **Petrus, H.T.B.M. et al.** (2021) Green geopolymer cement with dry activator from geothermal sludge and sodium hydroxide, *J. Clean. Prod.*, 293, pp. 126-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126143>.
17. **Pu, S. et al.** (2022) Water resistance of fly ash phosphoric acid-based geopolymer, *Dev. Built Environ.*, 12, pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100093>.
18. **Yusuf, G. Adewuyi.** (2021) Recent Advances in Fly-Ash-Based Geopolymers: Potential on the Utilization for Sustainable Environmental Remediation, *ACS Omega*, 6(24), pp. 15532–15542. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00662>.
19. **Efremov, A.N., Haustova, V.V. & Bukina, D.Yu.** (2018) Composite slag-alkaline binders based on sodium hydroxide, blast furnace granulated slag and ash and slag waste from thermal power plants, *Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury*, 4-2(132), pp. 177–182 (in Russian).
20. **San Nicolas, R.V.R., Walkley, B. & van Deventer, J.S.J.** (2017) Fly ash-based geopolymer chemistry and behavior, *Coal Combustion Products (CCPs): Characteristics, Utilization and Beneficiation*, pp. 185–214. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100945-1.00007-1>.
21. **Wongpa, J. et al.** (2010) Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete, *Mater. Des.*, 31(10), pp. 4748–4754. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.05.012.
22. **Diaz, E.I., Allouche, E.N. & Eklund, S.** (2010) Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers, *Fuel*, 89(5), pp. 992–996. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.09.012.

Received 12.10.2022

Approved after reviewing 28.10.2022

Accepted 14.11.2022



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7:623.746.4-519

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_28

Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования объектов транспортной инфраструктуры

А.В. Кочетков¹, Н.С. Семенова², А.Ф. Иванов², И.А. Чижиков³

Андрей Викторович Кочетков

¹Федеральное автономное учреждение «Российский дорожный научно-исследовательский институт», Москва, Российская Федерация
soni.81@mail.ru

Наталья Сергеевна Семенова

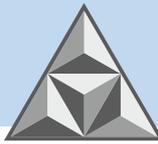
²Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Саратов, Российская Федерация
n-semenova@yandex.ru

Александр Федорович Иванов

²Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, Саратов, Российская Федерация
alexandr.ivanov.sgtu@rambler.ru

Илья Александрович Чижиков

³Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
ilya2@mail.ru



На базе анализа комплексного использования возможностей малых беспилотных летательных аппаратов и бортового оборудования в сочетании со специализированным программным обеспечением получены данные, позволяющие рекомендовать использование новой методики для проведения судебной экспертизы качества строительства объектов транспортной инфраструктуры. Экспериментально установлено, что проведение замеров геометрических параметров улиц и дорог с применением таких аппаратов значительно повышает объективность исследований и гарантирует необходимую производительность работ при строительстве автомобильных дорог.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, асфальтобетонные покрытия, цифровая модель местности, дефекты, паспортизация и инвентаризация автомобильных дорог

Для цитирования:

Кочетков А.В., Семенова Н.С., Иванов А.Ф., Чижиков И.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования объектов транспортной инфраструктуры // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 4. С. 28-38. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022.

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_28



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_28

Unmanned Aerial Vehicles Use for the Inspection of Transport Infrastructure Facilities

A.V. Kochetkov¹, N.S. Semenova², A.F. Ivanov², I.A. Chizhikov³

Andrey V. Kochetkov

¹Federal Autonomous Institution "Russian Road Research Institute", Moscow, Russia
soni.81@mail.ru

Natalia S. Semenova

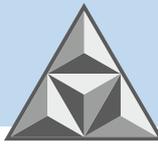
²Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia
n-semenova@yandex.ru

Alexander F. Ivanov

²Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia
alexandr.ivanov.sgtu@rambler.ru

Ilya A. Chizhikov

³National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
ilya2@mail.ru



This study contains new data based on the analysis of the integrated use of the small unmanned aerial vehicles capabilities and on-board equipment in combination with specialized software. The methodology developed can be recommend for forensic examination of transport infrastructure facilities construction quality. We obtained experimentally that measuring the geometric parameters of streets and roads using such devices significantly increases the objectivity of research and guarantees the necessary productivity of work during the construction of highways.

Key words: Unmanned aerial vehicles, asphalt concrete pavement, digital terrain model, defects, certification and inventory of highways

For citation:

Kochetkov, A.V., Semenova, N.S., Ivanov, A.F. & Chizhikov, I.A. (2022) Unmanned Aerial Vehicles Use for the Inspection of Transport Infrastructure Facilities, *Smart Composite in Construction*, 3(4), pp. 28-38 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022 (in Russian).

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_28



ВВЕДЕНИЕ

При обследовании объектов транспортной инфраструктуры выполняется большой объем работ по определению размеров различных элементов. Авторы настоящего исследования за время многолетней работы в области паспортизации и инвентаризации дорог, надзора процесса строительства, операционного и приемочного контроля качества, судебной экспертизы пришли к выводу о целесообразности дополнения, а в перспективе – замены традиционного метода измерения расстояний рулеткой новыми методами.

В последнее десятилетие наблюдается повышенный интерес специалистов различных отраслей, деятельность которых связана с определением размерности объектов, к применению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1-7]. В частности, признано целесообразным и эффективным применение БПЛА с целью построения цифровых моделей местности для развития дорожной отрасли [8]. Решение вопросов, связанных с применением беспилотных летательных аппаратов для оценки качества объектов дорожной инфраструктуры [9-12], является весьма актуальным. Однако применение БПЛА в дорожном строительстве к настоящему времени еще не является массовым.

На основе выполненных исследований авторами подготовлены методические рекомендации по производству аэрофототопографических работ с применением БПЛА при изысканиях для строительства и реконструкции автомобильных дорог [13].

Анализ комплексного использования возможностей малых БПЛА и бортового оборудования в сочетании с современным специализированным программным обеспечением предоставил возможность апробировать новую методику при судебной экспертизе качества строительства объектов транспортной инфраструктуры. Применение такой методики позволяет значительно повысить производительность работ, уменьшить вероятность случайного и сознательного искажения результатов измерений. В любой момент с использованием офисной аппаратуры можно «вернуться» за сотни и тысячи километров к месту производства работ для уточнения и разрешения спорных вопросов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Новую методику измерений применяли при обследовании объекта: *Подъезд от автомобильной дороги «Михайловка (29.4 км) – Даниловка – Котово» к хут. Попов*. В процессе производства работ, наряду с традиционными методами измерений с помощью рулетки, использовали фото- и видеоаппаратуру, а также средства визуализации беспилотного летательного аппарата.

По результатам пролета примененного при экспертизе БПЛА получены фотографии объекта экспертизы (вид сверху). Путем наложения их друг на друга составлен ортофотоплан (рис. 1) с привязкой к характерным опорным точкам, сформированным на объекте экспертизы.

Общую длину участков тротуара с дефектами определяли в следующем порядке:

- сгенерированный ортофотоплан в формате JPEG загружали на компьютере в программу AUTOCAD;
- изображение масштабировали (увеличивали) до величины, позволяющей зрительно различать трещины, выбоины, разрушения кромок, просадки и другие разрушения;
- по известному размеру реперного элемента (канализационный люк диаметром 600 мм) на рассматриваемом участке определяли масштаб изображения (рис. 2).



Рис. 1. Ортофотоплан дороги с привязкой к характерным опорным точкам
Fig. 1. Orthophotoplane of the road with reference to characteristic reference points



Рис. 2. Фрагмент плана с реперным элементом
Fig. 2. Plan fragment with a reference element

Принятый масштаб изображения плана анализируемого объекта, стандартизированный размер выбранного опорного реперного элемента и возможности использованного программного продукта (AUTOCAD) позволяют определить размеры выбранного фрагмента плана объекта с точностью до сантиметров (погрешность не превышает 10 см). Для решения поставленной задачи (определение длины участков тротуара с дефектами, образованными на стадии строительства объекта, накопленными деформациями и разрушениями при эксплуатации в течение 3 лет) этого достаточно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При выполнении работ по обследованию объектов транспортной инфраструктуры установлено, что для повышения точности измерений размеров различных элементов перед запуском БПЛА на поверхность покрытия целесообразно укладывать нивелирную рейку. Нивелирная рейка (рис. 3), проградуированная в сантиметрах или дюймах, изначально предназначена для измерения разности в уровнях с помощью нивелира или другого геодезического оборудования.

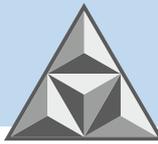


Рис. 3. Нивелирная рейка

Fig. 3. Leveling rail

Изображение чисел на рейке может быть как нормальное, так и перевернутое (в старых нивелирах). Авторы предлагают применять нивелирную рейку по новому назначению – для получения размеров объектов транспортной инфраструктуры при камеральной обработке результатов съемки, полученных с помощью БПЛА, оснащенного специальным бортовым оборудованием.

Участок тротуара с разрушениями оконтуривался линиями, параллельными и перпендикулярными оси тротуара, и нумеровался (рис. 4).

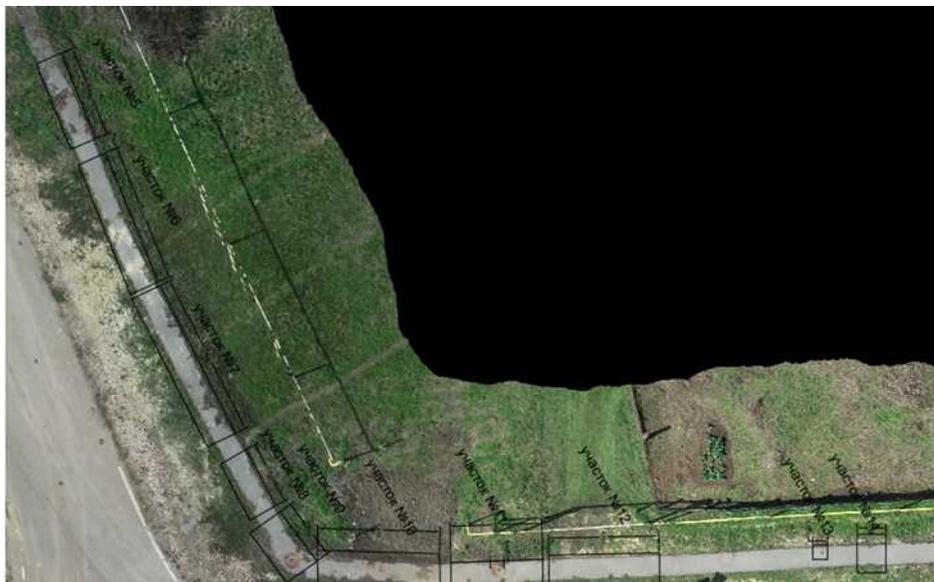


Рис. 4. Фрагмент плана тротуара с выделенными разрушенными участками

Fig. 4. Sidewalk plan fragment with selected destroyed sections

Затем в программе AUTOCAD определяли длину участка, для отчетности делали его копию, которую в формате PDF помещали в соответствующее Приложение. Результаты измерения длины дефектного участка заносили в табл. 1.

Изображение тротуара перемещали по экрану монитора до появления следующего дефектного участка, после чего повторяли процессы оконтуривания, нумерации, определения длины и внесения табличных данных – и так до конца тротуара.

**Таблица 1.** Результаты измерения длины дефектного участка**Table 1.** Results of measuring the length of the defective section

Номер участка	Вид деформаций и разрушений (трещины, выбоины, просадки, разрушение кромки покрытия)	Длина участка, м
1	2	3
1	Люк с просадкой	4.0
2	Трещины	5.3
3	Трещины	8.4
4	Люк с просадкой	4.0
5	Трещины	4.0
6	Трещины	6.0
7	Трещины	7.2
8	Трещины	2.8
9	Трещины	2.7
10	Трещины	5.3
11	Люк с просадкой	4.0
12	Трещины	4.8
13	Трещины	0.6
14	Трещины	1.2
15	Трещины	2.9
16	Трещины	5.8
17	Трещины	1.2
18	Трещины	4.4
19	Люк с просадкой	4.0
20	Трещины	2.3
21	Трещины	0.6
22	Трещины	3.2
23	Трещины	1.0
24	Трещины	1.5

Описанный процесс повторялся до конца тротуара.

Результаты, содержащиеся в столбце 3 (см. табл. 1), суммировали. При этом полученная сумма представляет собой общую длину тротуара, подлежащую перестройке.

Так, общая длина тротуара составила приблизительно 480.0 м.

Общая длина участков с недопустимыми дефектами равна 87.2 м.

Так как участки с недопустимыми разрушениями распределены по всей длине тротуара, фрагментарный ремонт («клочками») является неподходящим решением. Действительно, он не может обеспечить ровность и однородность объекта в целом.

Многие смотровые канализационные колодцы просели на несколько десятков сантиметров относительно проектного положения (рис. 5)

**Рис. 5.** Пример деформации**Fig. 5.** Example of deformation



Эти деформации привели к нарушению проектного положения трубопровода в продольном профиле и его разрушению. Таким образом, трубопровод прекратил нормально функционировать. Содержимое трубопровода поступает в основание дорожной конструкции и провоцирует разрушение строительного объекта.

Наличие на поверхности асфальтобетонного покрытия тротуара большого количества стеблей и остатков растений свидетельствует о том, что тротуар, в связи с риском получения пешеходами травм, по прямому назначению не используется.

Выявленные разрушения позволяют сделать вывод о необходимости полной перестройки тротуара.

ВЫВОДЫ

Показано, что новая методика измерений геометрических параметров улиц и дорог с применением беспилотных летательных аппаратов обеспечивает получение точных данных о состоянии строительного объекта и повышение производительности дорожных работ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Костюк А.С.** Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БПЛА // *Гео-Сибирь*. 2010. Т. 4, № 1. С. 83–87.
2. **Ильинов Е.В., Агеев А.М.** Анализ и прогноз развития производства комплексов с БПЛА ведущих зарубежных стран // *Вестник Академии военных наук*. 2014. № 1. С. 153–156
3. **Бауэре П.** Летательные аппараты нетрадиционных схем. М.: Мир, 2016. 320 с.
4. **Карпович М.А., Герштейн Л.М., Паневин Н.В., Карпович А.М.** Применение БПЛА при проведении топографо-геодезических изысканий // *Транспортная стратегия – XXI век*. 2013. № 22. С. 66–68.
5. Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях // *Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 22–23 мая 2018 г.* Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2018. 135 с.
6. **Кумаритова Д.Л., Киричек Р.В.** Обзор и сравнительный анализ технологий LPWAN сетей // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016. Т. 4, № 4. С. 33–48.
7. **Беленков А.И.** Опыт и перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в точном земледелии // *Агротехнический журнал «Нивы России»*. 2016. № 5(138). С. 62–65.
8. **Писарев А.В.** Возможности применения БПЛА для построения высокоточной цифровой модели рельефа местности малых рек // *Проблемы теории и практики современной науки. Материалы V Международной научно-практической конференции. Таганрог, 18 января 2016 года*. Таганрог: Издательство «Перо», 2016. С. 95–98.
9. **Манухина В.П., Манухина Л.А., Дехтярь Е.В., Садакова В.В.** Беспилотные летательные аппараты с целью проверки состояния мостов // *Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки. Материалы XI международной научно-практической конференции «Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки North Charleston, 27–28 марта 2017 г.* Изд-во CreateSpace, 2017. С. 146–148.
10. **Филиппов Д.В., Великжанина К.Ю., Грядун Д.А.** Состояние автомобильных дорог изучает БПЛА // *Дороги. Инновации в строительстве*. 2012. № 20. С. 74–78.
11. **Наконечный В.Н., Середа П.О., Лебедева И.В., Цаль А.Ю.** К вопросу использования



беспилотных летательных аппаратов для мониторинга и диагностики автомобильных дорог // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции "Транспорт: наука, образование, производство. Технические науки". Т. 2. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2017. С. 305-308.

12. **Бургонутдинов А.М., Гарифзянов Р.Д., Окунева А.Г., Стецюк К.С.** Анализ дистанционных и визуальных методов оценки состояния дорожного покрытия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2015. № 2(18). С. 74-84.
13. ОДМ 218.9.017-2019 "Методические рекомендации по производству аэрофототопографических работ с применением беспилотных летательных аппаратов при изысканиях в целях строительства и реконструкции автомобильных дорог". М.: Росавтодор, 2019.

Поступила в редакцию 24.10.2022

Одобрена после рецензирования 23.11.2022

Принята к опубликованию 29.11.2022

REFERENCES

1. **Kostyuk, A.S.** (2010) Calculation of parameters and evaluation of the quality of aerial photography from UAVs, *Geo-Sibir*, 4(1), pp. 83-87 (in Russian).
2. **Ilyinov, E.V. & Ageev, A.M.** (2014) Analysis and forecast of the development of the production of complexes with UAVs of leading foreign countries, *Vestnik Akademii voyennykh nauk*, (1), pp. 153-156 (in Russian).
3. **Bauer, P.** (2016) *Aircraft of unconventional schemes*. M.: Mir (in Russian).
4. **Karpovich M.A., Gerstein, L.M., Panevin, N.V. & Karpovich, A.M.** (2013) The use of UAVs during topographic and geodetic surveys, *Transportnaya strategiya – XXI vek*, (22), pp. 66-68 (in Russian).
5. The use of unmanned aerial vehicles in geographical research (2018) *Sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Irkutsk. 22–23 maya 2018 g.* Irkutsk: Izdatelstvo Instituta geografii im. V.B. Sochavy SO RAN (in Russian).
6. **Kumaritova, D.L. & Kirichek, R.V.** (2016) Review and comparative analysis of LPWAN network technologies, *Informatsionnyye tekhnologii i telekommunikatsii*, 4(4), pp. 33-48 (in Russian).
7. **Belenkov, A.I.** (2016) Experience and prospects of the use of unmanned aerial vehicles in precision agriculture, *Agrosnabzhencheskiy zhurnal «Nivy Rossii»*, 5(138), pp. 62-65 (in Russian).
8. **Pisarev, A.V.** (2016) The possibilities of using UAVs to build a high-precision digital terrain model of small rivers, *Problemy teorii i praktiki sovremennoy nauki. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Taganrog. 18 yanvarya 2016 goda.* Taganrog: Izdatelstvo «Pero», pp. 95-98 (in Russian).
9. **Manukhina, V.P., Manukhina, L.A., Dekhtyar, E.V. & Sadakova, V.V.** (2017) Unmanned aerial vehicles for the purpose of checking the condition of bridges, *Fundamentalnaya nauka i tekhnologii – perspektivnyye razrabotki. Materialy XI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Fundamental Science and Technology - Promising Developments North Charleston, March 27-28, 2017.* Izd-vo «CreateSpace», pp. 146-148 (in Russian).



10. **Filippov, D.V., Velikzhanina, K.Yu. & Grydunov, D.A.** (2012) The state of highways studies UAVs, *Dorogi. Innovatsii v stroitelstve*, (20), pp. 74-78 (in Russian).
11. **Nakonechny, V.N., Sereda, P.O., Lebedeva, I.V. & Tsal, A.Yu.** (2017) On the use of unmanned aerial vehicles for monitoring and diagnostics of highways, *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskaya konferentsii "Transport: nauka. obrazovaniye. proizvodstvo. Tekhnicheskiye nauki"*. Т. 2. Rostov-na-Donu: RGUPS, pp. 305-308 (in Russian).
12. **Burgonutdinov, A.M., Garifzyanov, R.D., Okuneva, A.G. & Stetsyuk, K.S.** (2015) Analysis of remote and visual methods for assessing the condition of the road surface, *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*, 2(18), pp. 74-84 (in Russian).
13. ODM 218.9.017-2019 "Methodological recommendations for the production of aerial photography works using unmanned aerial vehicles during surveys for the construction and reconstruction of highways" (2019). М.: Rosavtodor (in Russian).

Received 24.10.2022

Approved after reviewing 23.11.2022

Accepted 29.11.2022



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.053.42

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_39

Применение временных ограничений на проезд тяжеловесных транспортных средств по автомобильным дорогам пермского края в летний период

Н.В. Чмых, А.М. Бургонутдинов

Никита Вячеславович Чмых

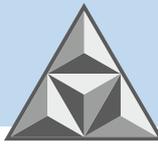
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

chmyhnikita@gmail.com

Альберт Масугутович Бургонутдинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

burgonutdinov.albert@yandex.ru



С ростом температуры в асфальтобетонном покрытии уменьшается вязкость битума, что существенно снижает сдвигоустойчивость материала и приводит к появлению дефектов (волн, наплывов) на поверхности покрытия. Эти виды пластических деформаций также возникают при недостаточном учете теплофизических свойств асфальтобетона. Для предотвращения образования волн и наплывов производят подбор состава асфальтобетонной смеси с учетом добавок, увеличивающих сдвигоустойчивость материала. Этот подход применяют только на ранних стадиях проектирования. В условиях эксплуатации автомобильной дороги задача исключения указанных дефектов является сложной и решается путем ограничений движения тяжеловесных транспортных средств в дневное время, когда на асфальтобетонное покрытие оказывается максимальное воздействие температуры и солнечной радиации. Рассмотрена нормативная документация по ограничениям движения в Пермском крае, а также проанализирована целесообразность введения ограничений с учетом влияния температурного фактора и роста интенсивности движения транспортных средств в летний период.

Ключевые слова: ограничения движения, сдвигоустойчивость асфальтобетона, летние ограничения, интенсивность движения, сохранность автомобильных дорог

Для цитирования:

Чмых Н.В., Бургутдинов А.М. Применение временных ограничений на проезд тяжеловесных транспортных средств по автомобильным дорогам пермского края в летний период // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 4. С. 39-47. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022.

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_39



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_39

Application of Temporary Restrictions for Heavy Vehicles on Perm Krai Roads during the Summer Period

N.V. Chmykh, A.M. Burgonutdinov

Nikita V. Chmykh

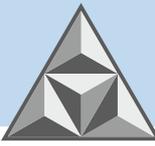
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

chmyhnikita@gmail.com

Albert M. Burgonutdinov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

burgonutdinov.albert@yandex.ru



With increasing temperature in asphalt concrete surfaces, the viscosity of bitumen decreases, which significantly reduces the shear stability of the material and leads to the appearance of defects (waves, puddles) on the roads. These types of plastic deformations also occur in case of insufficient consideration of asphalt concrete thermal properties. To prevent formation of waves and lapping, asphalt-concrete mixture the road services usually select the additives increasing shear stability of material. This approach is used only at the early stages of design. But in conditions of exploitation of highways, the issue of the specified defects exception is quite difficult. It is mainly solved by the restriction of heavy vehicles movement in day time, when the asphalt concrete had the maximum influence of temperature and solar radiation. We assess the regulatory documentation on traffic restrictions in Perm Krai, and the feasibility of introducing the special restrictions considering both the influence of the temperature and increase in vehicle traffic during the summer period.

Key words: traffic restrictions, swig resistance of asphalt concrete, summer restrictions, traffic intensity, safety of highways

For citation:

Chmykh, N.V. & Burgonutdinov, A.M. (2022) Application of Temporary Restrictions for Heavy Vehicles on Perm Krai Roads during the Summer Period, *Smart Composite in Construction*, 3(4), pp. 39-47 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022 (in Russian).

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_39



ВВЕДЕНИЕ

При повышении температуры воздуха снижается вязкость битума, входящего в состав асфальтобетона, что способствует ослаблению связей между минеральными материалами и частичной потере прочности [1].

Недостаточная теплоустойчивость асфальтобетонных покрытий благоприятствует концентрированию в них горизонтальных (сдвигающих) напряжений, вследствие чего возникают сдвиговые деформации – волны и наплывы. Накопление таких деформаций наблюдается для асфальтобетонных покрытий в условиях высокой интенсивности движения тяжеловесных транспортных средств. Рост деформаций в асфальтобетоне по мере приложения нагрузки наиболее ярко проявляется в летний период (значительная температура окружающей среды) [2].

Для повышения сдвигоустойчивости асфальтобетона подходящими являются следующие меры: подбор оптимального гранулометрического соотношения битума и минерального порошка; введение в состав строительного материала добавок; использование геосинтетических сеток между слоями асфальтобетона. Применение технических решений целесообразно только на стадии подбора оптимальных асфальтобетонных смесей. В условиях эксплуатации автомобильных дорог применяют альтернативные варианты обеспечения их сохранности. В частности, эффективной мерой является временное ограничение на движение большегрузных транспортных средств в летнее время.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для упрощения восприятия информации автоматической системы весогабаритного контроля (АСВГК) использовали классификацию грузовых автомобилей по предельно допустимой полной массе:

- легкие – до 2.0 т;
- средние – 2.0-12.0 т;
- тяжелые – 12.0-40.0 т;
- сверхтяжелые – свыше 40.0 т.

Для анализа интенсивности и состава движения на дорогах Пермского края выбрали три региональные автомобильные дороги общего пользования:

- Горнозаводск – граница Свердловской области;
- Голдыри – Орда – Октябрьский;
- Полазна – Чусовой.

АСВГК на указанных дорогах были впервые установлены; данные по мониторингу интенсивности и состава движения получены в значительном объеме и представляются достоверными.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ограничение движения большегрузных транспортных средств нередко применяется в России. Особенно часто это происходит на территории южных субъектов страны, где температура асфальтобетонного покрытия в летнее время достигает высоких значений. Следует отметить, что практика введения ограничений на движение в летнее время активно применяется в Беларуси, Кувейте и других арабских странах.

Такой подход характерен не только южных областей России. На сегодняшний день



ограничения вводятся на дорогах федерального, регионального и местного значения при показателях дневной температуры воздуха свыше 32 °С, в соответствии с Постановлением Правительства Пермского края от 10 января 2012 г. № 9-п "Об утверждении Порядка осуществления временного ограничения или временного прекращения движения транспортных средств по автомобильным дорогам регионального или межмуниципального и местного значения в Пермском крае". Также РОСДОРНИИ разработаны методические рекомендации по обеспечению сохранности автомобильных дорог в летнее время, в которых представлена карта с дорожно-климатическим районированием применительно к ограничению движения транспортных средств в период летних высоких температур. В соответствии с этой картой, большая часть Пермского края относится к 3 дорожно-климатическому району, за исключением севера края, который относится ко 2 району. Для 3 района приведен период с максимальной дневной температурой воздуха более 25 °С в период 1 мая – 9 сентября, а также представлено среднемноголетнее количество дней с максимальной дневной температурой воздуха.

Нами произведен анализ температуры наружного воздуха на территории Пермского края в 2010 – 2020 гг. (табл. 1).

Таблица 1. Значения температур применительно к ограничению движения транспортных средств в летнее время на территории Пермского края

Table 1. Temperature values in relation to the restriction of the movement of vehicles in the summer on the territory of the Perm Region

Среднее количество дней с максимальной дневной температурой воздуха за период 2010 – 2020 гг., °С			
25-30	30-35	более 35	среднее более 25
9	2	1	9

При сравнении данных видно, что среднее количество дней с максимальной дневной температурой 30-35 °С и выше 35 °С соответствует диапазону, принятому в методических рекомендациях по обеспечению сохранности автомобильных дорог в летнее время.

Поскольку механические свойства асфальтобетона (как термопластичного материала) зависят от температуры, необходимо представить периоды работы покрытия в ограниченных интервалах, начиная с 30 °С и выше [3], к одному общему периоду с расчетной температурой 50 °С. Общий расчетный сдвиговой период работы асфальтобетонных покрытий, приведенный к температуре для Пермского края, составляет 90 ч [4].

В данном контексте учитывать фактор глобального потепления нецелесообразно. По информации Росгидромета, в России температура приземного воздуха растет со скоростью 0.43 °С в течение каждых 10 лет [5]. Несмотря на то, что показатель более чем в 2.5 раза превышает скорость глобального потепления, решение о введении ограничений на движение тяжеловесных транспортных средств в летнее время принимается ежегодно, в зависимости от климатической обстановки. Температура воздуха в расчетный период по годам различается, следовательно, необходимо исходить из конкретных обстоятельств и вводить ограничения только при необходимости.

Фактическое значение дней для Пермского края, когда максимальная дневная температура превышает 25 °С, составляет 9, что существенно расходится с нормативными показателями. Согласно проведенному анализу, за исключением двух жарких сезонов за последние 11 лет, в летний период наблюдаются достаточно низкие температуры. Также выявлено, что период с максимальной дневной температурой воздуха более 25 °С соответствует действительности.

На сегодняшний день в России наблюдаются противоречия между методическими рекомендациями в отношении температуры, выше которой следует вводить ограничения



движения автомобильного транспорта. Профильные организации в вопросе введения ограничений в летнее время, руководствуясь ссылками на вышеуказанное Постановление Правительства Пермского края от 10 января 2012 г. № 9-п, ориентируются на значение 32 °С.

Фактор сезонного роста интенсивности движения существенно влияет на деформирование асфальтобетонного покрытия. В теплый период года транспортная активность населения значительно выше, сильно вырастает спрос на транспортировку грузов [6, 7]. Сезонный рост интенсивности движения также характерен для автобусов и легковых автомобилей, однако в настоящей работе эти показатели не рассматривались: на образование сдвигов и колеяности в асфальтобетонном покрытии интенсивность движения грузовых автомобилей влияет в большей степени.

Применительно к Пермскому краю, проведен анализ интенсивности движения на дорогах региона, целью которого являлось определение превышения сезонной интенсивности движения в летнее время над интенсивностью в другие сезоны. На основании фактических данных, собранных с помощью АСВГК [8], оценен сезонный рост интенсивности движения и изменение состава движения (как легковых, так и грузовых автомобилей) на дорогах Пермского края, а также степень влияния роста интенсивности движения на появление сдвиговых деформаций в асфальтобетонном покрытии при высоких летних температурах.

Следует отметить, что за неимением данных по интенсивности грузовых автомобилей на дороге Горнозаводск – граница Свердловской области в зимний период к завершению 2020 г., для сравнения взяты данные предыдущего (2019) года.

Нами подтверждается фактор повышения в летний период интенсивности движения грузового автомобильного транспорта в Пермском крае. Среднее превышение за последние 3 года составило 26.30% (табл. 2). Рост показателя почти на треть может негативно повлиять на работу асфальтобетонных слоев покрытия в период повышенных летних температур.

Таблица 2. Превышение летней интенсивности движения грузового автотранспорта над интенсивностью движения в другие сезоны года

Table 2. Excess of the summer traffic intensity of trucks over the traffic intensity in other seasons of the year

№ п/п	Автомобильная дорога	Превышение летней интенсивности над интенсивностью в другие сезоны, %								
		2018 г.			2019 г.			2020 г.		
		весна	осень	зима	весна	осень	зима	весна	осень	зима
1	Горнозаводск – граница Свердловской обл.	8.51	51.16	34.52	19.64	19.63	60.92	18.79	82.16	62.10
2	Голдыри – Орда – Октябрьский	47.24	9.34	14.49	27.01	-22.56	11.75	19.05	15.52	45.99
3	Полазна – Чусовой	50.50	-1.45	8.79	14.88	2.59	23.14	7.04	3.70	75.55
Среднее превышение по годам, %		24.79			17.44			36.66		
Среднее превышение за период 2018-2020 гг., %		26.30								

В соответствии с упомянутым выше Постановлением правительства Пермского края от 10 января 2012 г. № 9-п, ограничения на движение транспортных средств в летний период распространяются только на тяжеловесные транспортные средства, осевая нагрузка которых превышает предельно допустимые значения. В этом случае целесообразно оценить изменение интенсивности движения сверхтяжелых грузовых автомобилей (в том числе автопоездов), а также долю сверхтяжелых грузовых автомобилей в составе транспортного потока по трем выбранным дорогам (табл. 3).

**Таблица 3.** Интенсивность движения автопоездов и сверхтяжелых транспортных средств**Table 3.** Traffic intensity of road trains and super-heavy vehicles

№ п/п	Автомобильная дорога	Интенсивность движения грузовых автомобилей, авт./сут					
		2018 г.		2019 г.		2020 г.	
		Сверхтяжелые	В том числе автопоезда	Сверхтяжелые	В том числе автопоезда	Сверхтяжелые	В том числе автопоезда
1	Горнозаводск – граница Свердловской обл.	66.71	54.18	96.60	80.06	41.52	32.97
2	Голдыри – Орда – Октябрьский	99.65	67.17	108.49	65.87	53.82	36.59
3	Полазна – Чусовой	249.44	167.56	209.56	137.18	85.60	65.52

Значительную часть от сверхтяжелых грузовых транспортных средств составляют автопоезда (табл. 3). Нагрузка на дорожную одежду от воздействия группы сближенных осей больше, так как эпюры напряжений от воздействия соседних близкорасположенных колес перекрываются и суммируются в местах пересечения [9]. Таким образом, именно данный вид тяжеловесного транспорта способен нанести дорожному покрытию максимальный ущерб.

ВЫВОДЫ

1) Выявлено, что климатические характеристики Пермского края, приведенные в методических рекомендациях, сильно отличаются от фактических значений за последние 11 лет. Установлено реальное количество дней (9), когда максимальная дневная температура в Пермском крае превышает 25 °С. Температурное несоответствие и различие рекомендаций по введению ограничений движение в летнее время может повлечь несвоевременное принятие мер уполномоченными органами, что повышает риск образования дефектов в покрытии проезжей части. Рекомендуется пересмотреть методические рекомендации на предмет температуры, выше которой необходимо вводить ограничения движения.

2) Показано, что для Пермского края характерен фактор увеличения интенсивности грузовых автомобилей в летнее время (26.30% от интенсивности в другие сезоны). Определена доля тяжеловесных автопоездов (65-80%) на выбранных автомобильных дорогах в составе движущихся транспортных средств, способных нанести дорожному покрытию максимальный ущерб.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Королев И.В.** Дорожный теплый асфальтобетон. Киев: Выща школа, 1975. 155 с.
2. **Гезенцев Л.Б., Горельшев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В.** Дорожный асфальтобетон. М.: Транспорт, 1985. 350 с.
3. **Трофимов И.Н., Кудяков А.И.** Сдвигоустойчивость асфальтобетона // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2008. № 4(21). С. 131-138.
4. Методически рекомендации по оценке сдвигоустойчивости асфальтобетона / Министерство транспорта Российской Федерации. Государственная служба дорожного хозяйства (Росавтодор). М.: Инфрмавтодор, 2002. 21 с.
5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М., 2019. 79 с.
6. **Семикашев В.В.** Рост цен на бензин в России и возможные меры по его сдерживанию // *Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН*. 2006. №4. С. 415-429.



7. **Якунин И.Н.** Влияние высоких температур и солнечной радиации на аварийность на автомобильном транспорте в летнее время // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2020. Т. 17, № 6(76). С. 704-713. DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-6-704-713.
8. **Чмых Н.В., Абдуллин В.А., Морозов И.А.** Опыт использования автоматической системы весогабаритного контроля в Пермском крае // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2020. № 3. С. 44-51. DOI 10.15593/24111678/2020.03.06.
9. **Бабков А.Ф., Андреев О.В.** Проектирование автомобильных дорог. Ч. 1: Учебник для вузов. М.: Транспорт, 1987. 368 с.

Поступила в редакцию 01.11.2022

Одобрена после рецензирования 14.11.2022

Принята к опубликованию 02.12.2022

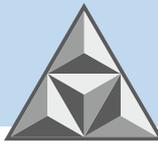
REFERENCES

1. **Korolev, I.V.** (1975) *Road warm asphalt concrete*. Kiev: Vyssha shkola (in Russian).
2. **Gezentsvei, L.B., Gorelyshev, N.V., Boguslavskii, A.M. & Korolev, I.V.** (1985) *Road asphalt concrete*. M.: Transport (in Russian).
3. **Trofimov, I.N. & Kudiakov, A.I.** (2008). Shear resistance of asphalt concrete, *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, (4), pp. 131-138 (in Russian).
4. *Methodological recommendations for assessing the shear stability of asphalt concrete / Ministry of Transport of the Russian Federation. State Road Management Service (Rosavtodor)* (2002). M.: Informavtodor (in Russian).
5. *Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2018*. (2019). M. (in Russian).
6. **Semikashev, V.V.** (2006) The rise in gasoline prices in Russia and possible measures to contain it, *Nauchnye trudy: Institut narodnokhoziaistvennogo prognozirovaniia RAN*, (4), pp. 415-429 (in Russian).
7. **Iakunin, I.N.** (2020) The influence of high temperatures and solar radiation on the accident rate in road transport in the summer. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 17(6), pp. 704-713. DOI 10.26518/2071-7296-2020-17-6-704-713(in Russian).
8. **Chmykh, N.V., Abdullin, V.A. & Morozov, I.A.** (2020) Experience of using an automatic weight and size control system in the Perm Region, *Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*, (3), pp. 44-51. DOI 10.15593/24111678/2020.03.06(in Russian).
9. **Babkov, A.F. & Andreev, O.V.** (1987) *Designing highways. Part 1: Textbook for universities*. M.: Transport (in Russian).

Received 01.11.2022

Approved after reviewing 14.11.2022

Accepted 02.12.2022



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_48

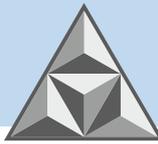
Оценка неоднородности зернового состава золошлаковой смеси на золоотвале Омской ТЭЦ-4

А.А. Лунёв

Александр Александрович Лунёв

Центр компетенций в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Российская Федерация

lunev.al.al@gmail.com



Во многих регионах Российской Федерации существует дефицит природных грунтов требуемого качества. Обостряется и другая проблема, характерная для мегаполисов: сотни гектаров в пригородных зонах заняты отвалами отходов промышленности, большую часть из которых составляют золошлаковые смеси угольных теплоэлектростанций.

Фракционирование золошлаковой смеси при намыве в отвалах приводит к неоднородности зернового состава, учет которой необходим при разработке техногенного грунта. Для изучения неоднородности в секции № 2 золоотвала ТЭЦ-4 г. города Омска проведено бурение 14 вертикальных скважин с отбором проб нарушенной структуры с глубин 0.5, 4.5, 8.5 м и 12.5 м. Пробы золошлаковых материалов исследованы в лабораторных условиях для оценки их состава ситовым и ареометрическим методами. Установлено, что изменение крупности частиц этого техногенного грунта в значительной мере обычно носит случайный характер. Выявлена статистически значимая закономерность, позволяющая прогнозировать гранулометрический состав золошлаковых смесей в золоотвале.

Ключевые слова: тепловые электростанции, золошлаковые отходы и смеси, техногенные грунты, зерновой состав

Для цитирования:

Лунёв А.А. Оценка неоднородности зернового состава золошлаковой смеси на золоотвале Омской ТЭЦ-4 // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 4. С. 48-61. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022.

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_48



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_48

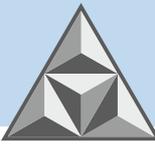
Assessment of the Grain Composition Heterogeneity of the Ash Dump Pond of Omsk TPP-4

A.A. Lunev

Alexander A. Lunev

Competence Center for the Use of Secondary Material Resources in the Construction Industry, Siberian
State Automobile and Road University, Omsk, Russia

lunev.al.al@gmail.com



Nowadays, there is a shortage of natural soils of the required quality in many regions of the Russian Federation. Another issue is typical one for the megacities: hundreds of hectares in suburban areas covered by industrial waste dumps, most of which are ash and slag mixtures of coal thermal power plants.

The fractionation of the ash and slag mixture during washing in dumps leads to heterogeneity of the grain composition, accounting for which is necessary during the development of man-made soil. To study the heterogeneity in the Section No. 2 of the ash dump TPP-4 in Omsk, we drilled 14 vertical wells and took the samples with disturbed structure from depths of 0.5, 4.5, 8.5 m and 12.5 m. Then, we made the laboratory study of ash and slag materials samples to assess their composition by sieve and areometric methods. According to the study, we define random changing of the man-made soil particle size. Also, the study allows us to identify a statistically significant pattern that can predict the distribution of ash grain size and slag mixtures in the ash dump.

Key words: thermal power plants, ash and slag waste and mixtures, man-made soils, grain composition

For citation:

Lunev, A.A. (2022) Assessment of the Grain Composition Heterogeneity of the Ash Dump Pond of Omsk TPP-4, *Smart Composite in Construction*, 3(4), pp. 48-61 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022 (in Russian).

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_48



ВВЕДЕНИЕ

Свыше 65% тепловой и электрической энергии в России построенные тепловые электростанции вырабатывают за счёт сжигания углей [1]. На ближайшие десятки лет альтернативы этому виду топлива нет, особенно в связи с введением в странах Евросоюза углеродного сбора и антироссийских санкций, в результате чего существенно снизится экспорт угля. Сжигание углей является одним из наиболее дешевых путей получения энергии, однако при этом образуются золошлаковые отходы (несгораемая часть, представляющая собой минеральную часть породы). Золошлаковые отходы (ЗШО) (зола-унос и топливный шлак) после смешения с водой транспортируются на золоотвалы в виде пульпы золошлаковой смеси, где осаждаются и хранятся во влажном состоянии.

Каждый отвал является потенциальным источником опасности. На золоотвалах нередки аварии, в результате которых прорыв дамбы становился причиной разрушения прилегающих зданий и сооружений. Подобное имело место в Теннесси [2, 3] (декабрь 2008 г.) и Северной Каролине [4] (февраль 2014 г.).

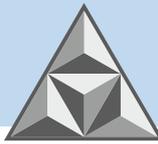
В Российской Федерации накоплено порядка 1.6 млрд. т этих материалов; при этом только на территории г. Омска складировано около 76 млн. т. Опасения вызывает динамика накопления ЗШО (по оценкам экспертов Интер РАО ЕЭС, к 2030 году количество ЗШО в Омске достигнет 91 млн. т). Следует также учитывать, что дамба высотой 20 м, ограждающая золоотвал ТЭЦ-4 в г. Омске, расположена в 50 м от р. Иртыш.

Хотя ЗШО начинают активно применяться при строительстве автомобильных дорог [5, 6], в производстве бетонных изделий [7] и изготовлении металлургической продукции [8], существующий принцип их захоронения влияет на свойства, которые в значительной мере определяют качество золошлаковых смесей (ЗШС), получаемых при разработке отвала [6]. ЗШС являются разновидностью техногенных грунтов [9, 10]; хотя форма частиц отличает их от природных грунтов [11], они, как правило, являются разновидностью мелких или пылеватых песков.

Исследования, проведенные Han-Lin Wang [12] при изучении прямого среза песчаных грунтов по поверхности ребристой пластины, указывают на существенное снижение их прочности при увеличении коэффициента однородности (является функцией зернового состава). В работе группы R. Wen и др. [13] аналогичный эффект снижения прочности зафиксирован при снижении крупности крупнообломочного грунта, что подтверждается данными E. Getahun с соавторами [14]. Влияние крупности частиц песчаного грунта и их однородности на физические свойства также отмечено в работах S.P. Kumara и др. [15] и Q. Zhai и др. [16]. Работы [16-18] доказали прямое влияние зернового состава на давление всасывания воды в грунт при разной влажности (SWCCs).

В работе S. Wang и др. [19] также приведены данные, что механические характеристики дисперсных грунтов существенно зависят от зернового состава, причем влияние глинистых частиц имеет ключевое значение. Однако в [19] указано, что существенную роль играет ненарушенная структура грунта, поэтому делать выводы о свойствах грунтов нарушенной в ходе разработки структуры по результатам испытаний монолитов нецелесообразно.

Влияние неоднородности зернового состава на свойства применительно к ЗШС рассмотрено в исследованиях Tiwary [20], Kumar [21], Kim [21], Muhunthan [22], Gimhan [23] для инертных ЗШС в США (четыре ТЭС в штатах Вашингтон и Индиана), Индии (три – в штатах Уттар-Прадеш, Раджастан) и Шри-Ланке (одна ТЭС). Схожий подход использован в работе Е.В. Иванова [6], в которой изучалось изменение механических характеристик



мелкозернистой ЗШС из отвалов ТЭЦ-5 г. Омска и ГРЭС-2 г. Томска, а также среднезернистой ЗШС из отвала Беловской ГРЭС. Влияние плотности и влажности на характеристики прочности и деформируемости золошлаковых материалов рассмотрено в работах В. Indraratna и др. [24], Singh and Panda [25], N.S. Pandian [26], S.K. Pal и А. Ghosh [27], Jakka и др. [28], Mohanty [29], Gruchot [30].

Гранулометрический состав ЗШС зависит от множества факторов: конструкции котлоагрегатов, режимов их эксплуатации, системы пылеприготовления и подачи топлива, дальности транспортировки пульпы, типа золоотвала и системы гидронамыва. При перемещении ЗШС в отвал средствами гидрозолошлакоудаления в виде гомогенной смеси более крупные и тяжёлые частицы оседают ближе к выпускам пульпы, а мелкие и легкие дальше от выпусков, что и обуславливает основную неоднородность свойств золошлаков в отвале (рис. 1).

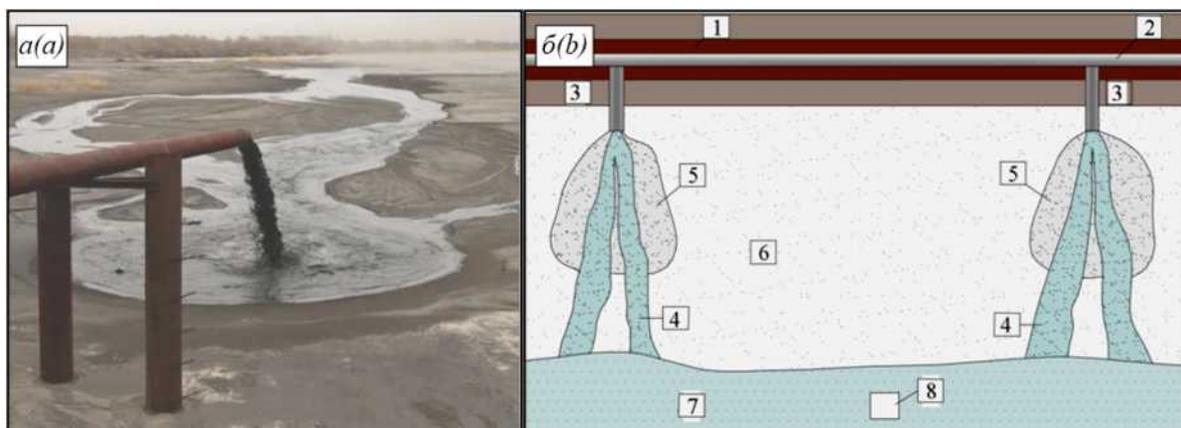


Рис. 1. Поступление пульпы в золоотвал (а) и схема намыва золошлака в отвале (б): 1 – дамба; 2 – пульпопровод; 3 – выпуски пульпы; 4 – русловые потоки; 5 – золошлаковая зона; 6 – зольная зона надводного намыва; 7 – осветительный пруд и зольная зона подводного намыва; 8 – водосборный колодец

Fig. 1. Pulp entering into the ash dump (a) and the scheme of ash slag alluvium in the dump (b): 1 – dump; 2 – pulp pipeline; 3 – pulp releases; 4 – channel flows; 5 – ash zone; 6 – ash zone of surface alluvium; 7 – lighting pond and ash zone of underwater alluvium; 8 – drainage well

Действующие выпуски пульпы регулярно изменяются, пульпопроводы перемещают в процессе заполнения отвала ЗШО, а залегание частиц по глубине определяется качеством топлива, поступающего на станцию в течение жизненного цикла золоотвала, зависит от способов измельчения и сжигания угля. Это приводит к образованию массива с малопрогнозируемым зерновым составом и требует проведения его оценки по площади и глубине золоотвалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Отбор проб

Буровые работы выполняли в секции № 2 отвала СП ТЭЦ-4 АО «ТГК-11» полевыми бригадами с помощью буровых установок УРБ-2ДЗ на базе ЗИЛ-131. Способ бурения скважин выбран исходя из СП 11-105-97 (часть I, приложение Г) – шнековое, с применением спецтехники; диаметр 151 мм.

Осуществляли по схеме (рис. 2) отбор в герметичные мешки проб золошлаковой смеси (56 образцов) нарушенной структуры с сохранением природной влажности из 14 скважин вертикального бурения.



Рис. 2. Схема отбора проб на секции № 2 отвала СП ТЭЦ-4 АО «ТГК-11»

Fig. 1. Sampling scheme for the section No. 2 of the ash dump SHPP-4 JSC "TGC-11"

Отбор производили с глубин 0,5, 4,5, 8,5 и 12,5 м в каждой скважине из секции № 2 золоотвала СП «ТЭЦ-4». Для обеспечения надежной транспортировки и идентификации проб использовали уникальные пломбы для опечатывания.

Проведение исследований зернового состава

Выделение частиц крупностью от 0,5 до 10,0 мм осуществляли ситовым методом без промывки водой. Содержание частиц размером менее 0,5 мм определяли ареометрическим методом путем измерения плотности суспензии ареометром по ГОСТ 12536-2014.

Среднюю пробу для анализа отбирали методом квартования по ГОСТ 8735-88. Массу средней пробы принимали равной 50-100 г. Пробу высушивали до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 105 °С. Границы текучести и раскатывания, необходимые для классификации грунтов, определяли по ГОСТ 5180-2015.

Анализ результатов определения зернового состава

На основании результатов определения зернового состава рассчитывали коэффициент кривизны (Coefficient of curvature) C_c , степень фракционированности (Uniformity coefficient) C_u и модуля крупности M_k . Также проведен анализ зернового состава на предмет наличия закономерностей в массиве ЗШС по плану и глубине с использованием комплексов MATLAB и MSExcel. ЗШС классифицировали по зерновому составу согласно ГОСТ 25100-2020 и ASTM D 2487.

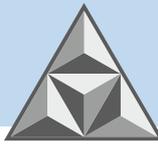
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам исследования проб ЗШС, зерновой состав проб в виде кумулятивных кривых (рис. 3) варьируется в широких пределах и имеет максимальную неоднородность по количеству частиц размером 0,05-0,10 мм.

Результаты определения коэффициента кривизны (C_c), степени фракционированности (C_u) и модуля крупности (M_k) с дифференциацией по точкам отбора (номер – согласно схеме на рис. 2) и глубине (h) приведены в табл. 1.

Согласно ГОСТ 25100-2020 53, пробы ЗШС отнесены к пылеватым пескам и лишь одна из них – к мелким пескам. По Unified Soil Classification System, большинство образцов (38) представляют собой пылеватый грунт (lean silt (ML)), 17 – отнесено к пылеватым пескам (silty sand (SM)) и один образец – к пескам с примесью пыли неоптимального состава (poorly graded sand with silt (SP-SM)).

Наибольшее влияние на свойства ЗШС оказывают частицы крупнее 0,1 мм [31, 32].



Поэтому анализ, в первую очередь, затрагивает особенности формирования массива ЗШС с учетом содержания в нем шлаковых частиц крупнее 0,1 мм.

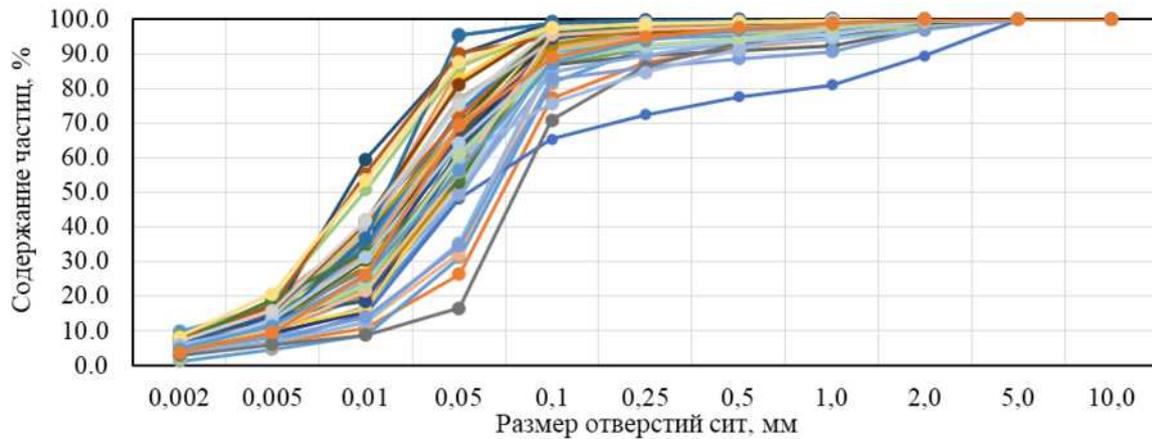


Рис. 3. Кумулятивные кривые зернового состава ЗШС

Fig. 3. Cumulative curves of the grain composition of ash and slag mixtures

Таблица 1. Результаты определения коэффициента кривизны (C_c), степени фракционированности (C_u) и модуля крупности (M_k) проб золошлаковых смесей

Table 1. Results of the determination of the coefficient of curvature (C_c), the uniformity coefficient (C_u) and the size modulus (M_k) of samples of ash and slag mixtures

№	h , м	M_k	C_u	C_c	№	h , м	M_k	C_u	C_c	№	h , м	M_k	C_u	C_c
65222	0.5	6.5	3.8	1.5	65226	12.5	6.9	9.4	2.0	65231	8.5	6.9	9.4	2.0
65222	4.5	6.6	3.3	0.9	65227	0.5	6.7	12.5	3.8	65231	12.5	6.9	11.0	3.8
65222	8.5	6.8	6.5	1.9	65227	4.5	7.0	8.0	2.0	65232	0.5	6.5	6.0	1.5
65222	12.5	6.8	10.0	1.6	65227	8.5	7.0	2.4	0.7	65232	4.5	6.9	10.0	2.1
65223	0.5	5.9	4.5	0.7	65227	12.5	7.0	11.7	3.8	65232	8.5	7.0	10.0	1.8
65223	4.5	6.7	13.8	4.1	65228	0.5	6.7	2.6	0.7	65232	12.5	6.9	9.2	1.9
65223	8.5	7.0	27.1	1.2	65228	4.5	6.8	4.0	1.4	65233	0.5	6.5	2.8	1.5
65223	12.5	7.0	11.0	3.3	65228	8.5	6.9	13.0	3.8	65233	4.5	6.9	12.0	3.0
65224	0.5	6.6	11.3	2.8	65228	12.5	7.0	12.9	4.0	65233	8.5	6.9	14.3	7.0
65224	4.5	6.9	8.9	4.2	65229	0.5	6.7	14.0	3.5	65233	12.5	6.9	20.0	2.2
65224	8.5	6.9	9.0	3.4	65229	4.5	6.8	9.5	2.6	65234	0.5	6.7	11.3	3.5
65224	12.5	6.9	11.3	3.5	65229	8.5	7.0	5.6	2.7	65234	4.5	6.9	11.0	3.3
65225	0.5	6.9	0.9	0.3	65229	12.5	7.0	10.0	5.1	65234	8.5	7.0	10.0	1.8
65225	4.5	7.0	10.0	13.1	65230	0.5	6.9	15.0	3.0	65234	12.5	6.9	9.2	1.2
65225	8.5	6.9	10.0	2.8	65230	4.5	7.0	10.0	3.6	65235	0.5	6.5	2.5	0.9
65225	12.5	7.0	10.0	3.3	65230	8.5	6.9	9.0	4.7	65235	4.5	6.7	10.0	3.6
65226	0.5	6.9	10.0	3.6	65230	12.5	7.0	8.9	3.5	65235	8.5	6.8	12.0	3.0
65226	4.5	6.9	2.2	0.7	65231	0.5	6.8	4.0	1.3	65235	12.5	6.8	8.5	3.6
65226	8.5	6.9	10.0	3.2	65231	4.5	6.8	0.9	0.3	-	-	-	-	-

Примечание: данные о значениях границы текучести и раскатывания не приведены в связи с отсутствием у ЗШС пластичности, позволяющей раскатать грунт в жгут для определения соответствующих параметров.

В Рекомендациях по проектированию золошлакоотвалов, разработанных во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, для оценки зернового состава используется формула определения расстояния от бровки наружного откоса золоотвала до границы между золошлаковой и зольной зонами:

$$L_{\text{ЗШ}} = \left[0,1 \cdot \sum_{d=0,25 \text{ мм}}^{d_{\text{макс}}} \Phi_{di} \right] L, \quad (1)$$



где $\sum_{d=0,25\text{ мм}}^d \Phi_{di}$ – сумма фракций крупнее 0.25 мм (может быть 0.315, 0.16, 0.10 мм) в составе исходного золошлакового материала, %; L – расстояние от бровки наружного откоса до водосборного колодца, м.

Эта формула позволяет прогнозировать размер зон намыва только с частицами крупнее 0.1 мм и не дает никаких данных о неоднородности по глубине и распределению частиц внутри зоны.

Позднее на основании исследований на золоотвалах ТЭС Иркутска, Омска, Кемерово, Белово, Томска, Новосибирска, Москвы и др. [6]. было установлено: независимо от типа шлаковых частиц и гранулометрического состава исходной ЗШС, общая пропорция шлака и золы-уноса подчиняется одному тренду.

Данные по результатам анализа проб, отобранных на поверхностях отвалов, показали, что распределения шлаковых частиц по длине намыва можно прогнозировать [33]:

$$\text{Ш} = \text{П}_{\text{ш}} \cdot e^{-232 \frac{l}{L}}, \quad (2)$$

где Ш – содержание шлака в точке по длине намыва, в долях от единицы; $\text{П}_{\text{ш}}$ – содержание шлака в месте выпуска пульпы, в долях от единицы; e – число Эйлера; l – расстояние от выпуска пульпы до точки определения содержания шлака, м; L – расстояние от выпуска пульпы до водоприёмного колодца в отвале, м

Фракционирование ЗШС по площади (рис. 4) лишь частично подтверждает закономерность (2) отложения минеральных частиц при движении потока пульпы от точки сброса.

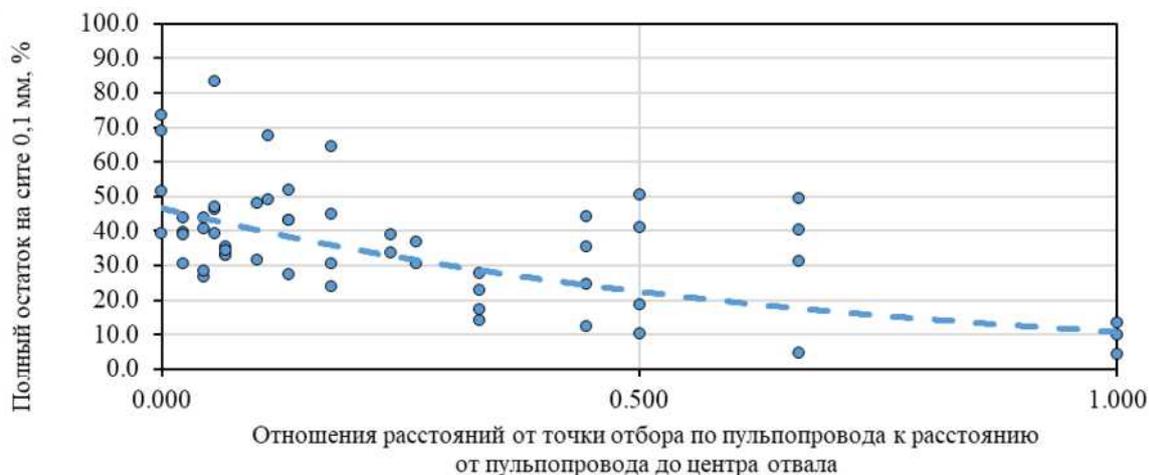


Рис. 4. Зависимость остатка на сите 0,1 мм от места отбора

Fig. 4. The dependence of the residue on the sieve 0.1 mm upon the sampling site

Это несоответствие обусловлено неровностями поверхности золоотвала и различиями в плотности частиц ЗШС, а также свидетельствует о неоднородности проб по глубине отвала.

Изменение дисперсности частиц ЗШС по глубине часто обусловлено наращиванием дамб обвалования, устройством специальных прослоек для предотвращения пыления и перемещением зон выпуска пульпы. Подобная слоистость, в частности, ранее наблюдалась в золоотвалах Берёзовской ГРЭС, Новосибирской ТЭЦ-3, Назаровской ГРЭС, сжигающих угли Канско-Ачинского угольного бассейна [6, 34]. Результаты анализа неоднородности зернового состава исследуемых нами проб (рис. 5) подтверждают, что имеется тренд, который говорит о снижении крупности частиц золошлака по глубине.

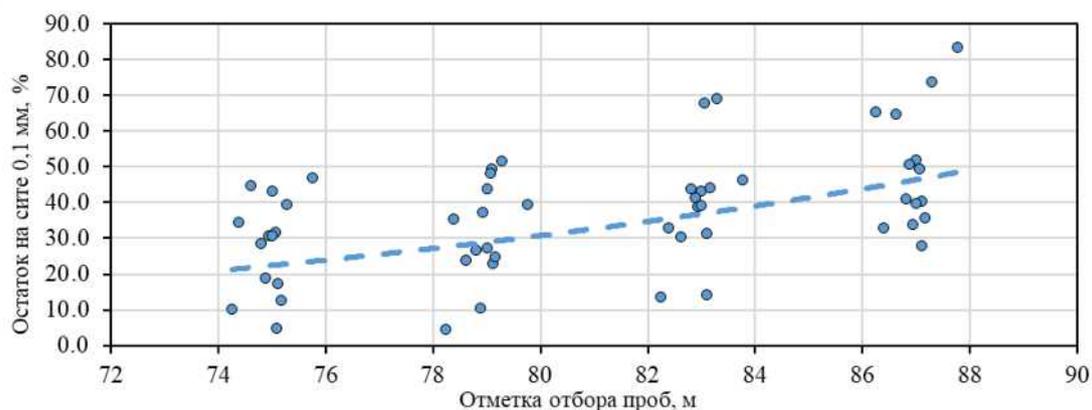


Рис. 5. Зависимость остатка на сите от глубины отбора

Fig. 5. Dependence of the residue on the sieve on the depth of sampling

Это можно объяснить постепенным переносом наиболее мелких зольных частиц с водой, фильтруемой вниз через золошлаковый массив, о чём, в частности, свидетельствует увеличение влажности ЗШС по глубине. Также очевидна бóльшая однородность зернового состава в рамках отдельных слоев, нежели в отвале в целом.

Регрессионно-корреляционный анализ показывает, что с некоторой долей достоверности ($R^2 = 0.65$) можно предсказывать количество шлаковых частиц S (крупностью более 0.1 мм) в исследуемой секции отвала СП «ТЭЦ-4». Прогнозировать содержание частиц шлака в секции № 2 отвала СП ТЭЦ-4 АО «ТГК-11» с определенной достоверностью возможно с использованием полиномиальной функции:

$$S = -25,04 - 309,6 \cdot l + 0,8816 \cdot z + 35,84 \cdot l^2 + 3,131 \cdot l \cdot z, \quad (3)$$

где l – отношение расстояния от выпуска пульпопровода до точки отбора к расстоянию от пульпопровода до шахтного колодца; z – отметка отбора проб над уровнем моря в Балтийской системе координат, м.

Однако создание более общих зависимостей, позволяющих прогнозировать зерновой состав в золоотвале, а также установление влияния зернового состава на свойства ЗШС требует тщательного изучения физико-химических свойств и других ЗШС. Для них нужно определять распределение частиц экспериментально либо создавать новые математические модели на основе зависимости (2).

ВЫВОДЫ

1) Золошлаковые смеси Омской ТЭЦ-4 относятся к пылеватым пескам и обладают высоким содержанием пылеватых частиц. Крупность частиц таких смесей с глубиной массива уменьшается, что объясняется переносом мелких фракций с фильтрующей через массив водой.

2) Отмечается изменение крупности частиц по длине намыва в золоотвале, однако данная закономерность характерна в большей степени для поверхности зоны намыва. Это связывается с неравномерными отметками поверхности золоотвала и постоянным перемещением выпусков из пульпопроводов.

3) Прогнозирование зернового состава в массиве с использованием математических методов, основанных на эмпирических данных, не позволяет с высокой точностью оценить крупность золошлаковых смесей. Требуется проведение аналогичных исследований на других объектах для установления влияния зернового состава техногенного грунта на его физико-механические свойства и свойства смесей.



БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены совместно с акционерным обществом «Территориальная генерирующая компания № 11» (АО «ТГК-11») в рамках изучения свойств накопленных объемов золошлаковых материалов в отвалах СП «ТЭЦ-4» и СП «ТЭЦ-5» г. Омска.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ показателей балансов электрической энергии и мощности ЭЭС России за IV квартал 2018 года. URL: http://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2018/ups_balance_analysis_2018q4_1.pdf (accessed: 12.07.2020).
2. **Bartov G. et al.** Environmental impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston coal ash Spill. 1. Source apportionment using mercury stable isotopes // *Environ. Sci. Technol.* 2013. Vol. 47, № 4. P. 2092–2099. DOI: <https://doi.org/10.1021/es303111p>.
3. **Deonarine A. et al.** Environmental impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston coal ash spill. 2. Effect of coal ash on methylmercury in historically contaminated river sediments // *Environ. Sci. Technol.* 2013. Vol. 47, № 4. P. 2100–2108. DOI: <https://doi.org/10.1021/es303639d>.
4. **Demir I., Hughes R.E., DeMaris P.J.** Formation and use of coal combustion residues from three types of power plants burning Illinois coals // *Fuel.* 2001. Vol. 80, № 11. P. 1659–1673. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00028-X).
5. **Martin J.P. et al.** Properties and Use of Fly Ashes for Embankments // *J. Energy Eng. American Society of Civil Engineers.* 1990. Vol. 116, № 2. P. 71–86.
6. **Иванов Е.В.** Обоснование применения золошлаковых смесей для строительства земляного полотна с учетом особенностей водно-теплого режима. Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, 2014. 165 с.
7. **Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G.** Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction // *Procedia Eng.* 2016. Vol. 150. P. 1558–1562. DOI: [10.1016/j.proeng.2016.07.111](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.111).
8. **Valeev D. et al.** Magnetite and carbon extraction from coal fly ash using magnetic separation and flotation methods // *Minerals.* 2019. Vol. 9, № 5. P. 320. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9050320>.
9. **Prashanth V., Madhavi L.G.** Influence of Particle Size on the Friction and Interfacial Shear Strength of Sands of Similar Morphology // *Int. J. Geosynth. Gr. Eng.* 2015. Vol. 1. P. 6. DOI: [10.1007/s40891-014-0008-9](https://doi.org/10.1007/s40891-014-0008-9).
10. **Liu X., Qu S., Huang J.** Relationship between physical properties and particle-size distribution of geomaterials // *Constr. Build. Mater.* 2019. Vol. 222. P. 312–318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.127>.
11. **Zhang X., Baudet B.A., Yao T.** The influence of particle shape and mineralogy on the particle strength, breakage and compressibility // *Int. J. Geo-Engineering.* 2020. Vol. 11, № 1. DOI: [10.1186/s40703-020-0108-4](https://doi.org/10.1186/s40703-020-0108-4).
12. **Wang H.-L. et al.** Effect of Grain Size Distribution of Sandy Soil on Shearing Behaviors at Soil–Structure Interface // *J. Mater. Civ. Eng.* 2019. Vol. 31, № 10. P. 04019238. DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002880](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002880).
13. **Wen R. et al.** Grain Size Effect on the Mechanical Behavior of Cohesionless Coarse-Grained Soils with the Discrete Element Method // *Adv. Civ. Eng.* 2018. Vol. 2018. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4608930>.
14. **Getahun E. et al.** Characteristics of grain size distribution and the shear strength analysis of Chenjiaba long runout coseismic landslide // *J. Mt. Sci.* 2019. Vol. 16, № 9. P. 2110–2125.
15. **Gallage C.P.K., Uchimura T.** Effects of dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of sandy soils // *Soils Found.* 2010. Vol. 50, № 1. P. 161–172.
16. **Zhai Q. et al.** Estimation of the soil-water characteristic curve from the grain size distribution of coarse-grained soils // *Eng. Geol.* 2020. Vol. 267, № 12. P. 105502. DOI: [10.1016/j.enggeo.2020.105502](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105502).
17. **Fredlund M.D., Fredlund D.G., Wilson G.W.** An equation to represent grain-size distribution // *Can.*



- Geotech. J.* 2000. Vol. 37, № 4. P. 817–827. DOI: <https://doi.org/10.1139/t00-015>.
18. **Fredlund M.D., Wilson G.W., Fredlund D.G.** Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve // *Can. Geotech. J.* 2002. Vol. 39, № 5. P. 1103–1117. DOI: <https://doi.org/10.1139/t02-049>.
 19. **Wang S.Y., Lu X.B., Shi Z.M.** Effects of grain size distribution and structure on mechanical behavior of silty sands // *Yantu Lixue/Rock Soil Mech.* 2005. Vol. 26, № 7. P. 1029–1032. DOI: 10.2174/1874835X01003010082.
 20. **Tiwari S.K., Ghiya A.** Strength Behavior of Compacted Fly Ash, Bottom Ash and their Combinations // *Electron. J. Geotech. Eng.* 2013. Vol. 18. P. 3085–3106.
 21. **Kim B., Prezzi M., Salgado R.** Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments // *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2005. Vol. 131, № 7. P. 914–924. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914)).
 22. **Muhunthan B., Taha R., Said J.** Geotechnical engineering properties of incinerator ash mixes // *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2004. Vol. 54, № 8. P. 985–991. DOI: <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470959>.
 23. **Gimhan P.G.S., Disanayaka J.P.B., Nasvi M.C.M.** Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material // *Eng. J. Inst. Eng. Sri Lanka.* 2018. Vol. 51, № 1. P. 49. DOI: <http://doi.org/10.4038/engineer.v51i1.7287>.
 24. **Indraratna B. et al.** Engineering behaviour of a low carbon, pozzolanic fly ash and its potential as a construction fill // *Can. Geotech. J.* 2011. Vol. 28, № 4. P. 542–555. DOI:10.1139/T91-070.
 25. **Singh R.S., Panda A.P.** Utilization of fly ash in geotechnical construction // *Proc. Indian Geotechnical Conf.* 1996. Vol. 1. P. 547–550.
 26. **Pandian N.S.P.** Fly ash characterization with reference to geotechnical applications // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*. 2005. P. 189–216.
 27. **Pal S., Ghosh A.** Shear strength behaviour of indian fly ashes // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*. 2009. P. 763–778.
 28. **Jakka R.S., Ramana G. V., Datta M.** Shear behaviour of loose and compacted pond ash // *Geotech. Geol. Eng.* 2010. Vol. 28, № 6. P. 763–778. DOI: 10.1007/s10706-010-9337-1.
 29. **Mohanty S., Patra N.R.** Geotechnical characterization of Panki and Panipat pond ash in India // *Int. J. Geo-Engineering.* 2015. Vol. 6, № 1. P. 1–18. DOI: 10.1186/s40703-015-0013-4.
 30. **Gruchot A., Zydroń T.** Impact of a test method on the undrained shear strength of a chosen fly ash // *J. Ecol. Eng.* 2016. Vol. 17, № 4. P. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/63955>.
 31. **Trivedi A., Sud V.K.** Grain characteristics and engineering properties of coal ash // *Granul. Matter.* 2002. Vol. 4, № 3. P. 93–101.
 32. **Kumar D., Kumar N., Gupta A.** Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions // *Int. J. Sci. Res.* 2014. Vol. 3, № 9. P. 1487–1494.
 33. **Lunev A.A., Sirotyuk V.V.** Influence of Granulometric Composition on the Mechanical Properties of Pond Ash // *Soil Mech. Found. Eng.* 2021. Vol. 58, № 4. P. 314–319.
 34. **Огородникова Е.Н., Николаева С.К.** Литогенетические особенности техногенных отложений золошлакоотвалов // *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода.* 2005. № 66. С. 65–74.

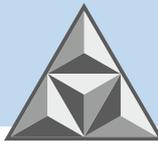
Поступила в редакцию 12.10.2022

Одобрена после рецензирования 02.11.2022

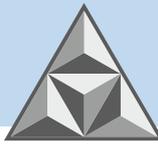
Принята к опубликованию 17.11.2022

REFERENCES

1. Analysis of indicators of electric energy and power balances of the UES of Russia for the IV quarter of 2018. [online]. Available at: http://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2018/ups_balance_analysis_2018q4_1.pdf (accessed: 12.07.2020) (in Russian).
2. **Bartov, G. et al.** (2013) Environmental impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston coal ash



- Spill. 1. Source apportionment using mercury stable isotopes, *Environ. Sci. Technol.*, 47(4), pp. 2092–2099. DOI: <https://doi.org/10.1021/es303111p>.
3. **Deonarine, A. et al.** (2013) Environmental impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston coal ash spill. 2. Effect of coal ash on methylmercury in historically contaminated river sediments, *Environ. Sci. Technol.*, 47(4), pp. 2100–2108. DOI: <https://doi.org/10.1021/es303639d>.
 4. **Demir, I., Hughes, R.E. & DeMaris, P.J.** (2001) Formation and use of coal combustion residues from three types of power plants burning Illinois coals, *Fuel*, 80(11), pp. 1659–1673. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00028-X).
 5. **Martin, J.P. et al.** (1990) Properties and Use of Fly Ashes for Embankments, *J. Energy Eng. American Society of Civil Engineers*, 116(2), pp. 71–86.
 6. **Ivanov, E.V.** (2014) The rationale for the use of pond ash for the construction of the subgrade, taking into account the peculiarities of the water-thermal regime. Omsk: The Siberian State Automobile and Highway University (in Russian).
 7. **Hadbaatar, A., Mashkin, N.A. & Stenina, N.G.** (2016) Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction, *Procedia Eng.*, 150, pp. 1558–1562. DOI: [10.1016/j.proeng.2016.07.111](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.111).
 8. **Valeev, D. et al.** (2019) Magnetite and carbon extraction from coal fly ash using magnetic separation and flotation methods, *Minerals*, 9(5), pp. 320. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9050320>.
 9. **Prashanth, V. & Madhavi, L.G.** (2015) Influence of Particle Size on the Friction and Interfacial Shear Strength of Sands of Similar Morphology, *Int. J. Geosynth. Gr. Eng.*, 1, p. 6. DOI: [10.1007/s40891-014-0008-9](https://doi.org/10.1007/s40891-014-0008-9).
 10. **Liu, X., Qu, S. & Huang, J.** (2019) Relationship between physical properties and particle-size distribution of geomaterials, *Constr. Build. Mater.*, 222, pp. 312–318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.127>.
 11. **Zhang, X., Baudet, B.A. & Yao, T.** (2020) The influence of particle shape and mineralogy on the particle strength, breakage and compressibility, *Int. J. Geo-Engineering*, 11(1). DOI: [10.1186/s40703-020-0108-4](https://doi.org/10.1186/s40703-020-0108-4).
 12. **Wang, H.-L. et al.** (2019) Effect of Grain Size Distribution of Sandy Soil on Shearing Behaviors at Soil–Structure Interface, *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(10), pp. 04019238. DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002880](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002880).
 13. **Wen, R. et al.** (2018) Grain Size Effect on the Mechanical Behavior of Cohesionless Coarse-Grained Soils with the Discrete Element Method, *Adv. Civ. Eng.*, 2018, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4608930>.
 14. **Getahun, E. et al.** (2019) Characteristics of grain size distribution and the shear strength analysis of Chenjiaba long runout coseismic landslide, *J. Mt. Sci.*, 16(9), pp. 2110–2125.
 15. **Gallage, C.P.K. & Uchimura, T.** (2010) Effects of dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of sandy soils, *Soils Found.*, 50(1), pp. 161–172.
 16. **Zhai, Q. et al.** (2020) Estimation of the soil-water characteristic curve from the grain size distribution of coarse-grained soils, *Eng. Geol.*, 267(12), pp. 105502. DOI: [10.1016/j.enggeo.2020.105502](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105502).
 17. **Fredlund, M.D., Fredlund, D.G. & Wilson, G.W.** (2000) An equation to represent grain-size distribution, *Can. Geotech. J.*, 37(4), pp. 817–827. DOI: <https://doi.org/10.1139/t00-015>.
 18. **Fredlund, M.D., Wilson, G.W. & Fredlund, D.G.** (2002) Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve, *Can. Geotech. J.*, 39(5), pp. 1103–1117. DOI: <https://doi.org/10.1139/t02-049>.
 19. **Wang, S.Y., Lu, X.B. & Shi, Z.M.** (2005) Effects of grain size distribution and structure on mechanical behavior of silty sands, *Yantu Lixue/Rock Soil Mech.*, 26(7), pp. 1029–1032. DOI: [10.2174/1874835X01003010082](https://doi.org/10.2174/1874835X01003010082).
 20. **Tiwari, S.K. & Ghiya, A.** (2013) Strength Behavior of Compacted Fly Ash, Bottom Ash and their Combinations, *Electron. J. Geotech. Eng.*, 18, pp. 3085–3106.
 21. **Kim, B., Prezzi, M. & Salgado, R.** (2005) Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 131(7), pp. 914–924. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914)).
 22. **Muhunthan, B., Taha, R. & Said, J.** (2004) Geotechnical engineering properties of incinerator ash mixes, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 54(8), pp. 985–991. DOI: [10.1080/10466600490886888](https://doi.org/10.1080/10466600490886888).



<https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470959>.

23. **Gimhan, P.G.S., Disanayaka, J.P.B. & Nasvi, M.C.M.** (2018) Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material, *Eng. J. Inst. Eng. Sri Lanka*, 51(1), p. 49. DOI: <http://doi.org/10.4038/engineer.v51i1.7287>.
24. **Indraratna, B. et al.** (2011) Engineering behaviour of a low carbon, pozzolanic fly ash and its potential as a construction fill, *Can. Geotech. J.*, 28(4), pp. 542–555. DOI:10.1139/T91-070.
25. **Singh, R.S. & Panda, A.P.** (1996) Utilization of fly ash in geotechnical construction, *Proc. Indian Geotechnical Conf.*, 1, pp. 547–550.
26. **Pandian, N.S.P.** (2005) Fly ash characterization with reference to geotechnical applications, *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*, pp. 189–216.
27. **Pal, S. & Ghosh, A.** (2009) Shear strength behaviour of indian fly ashes, *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*, pp. 763–778.
28. **Jakka, R.S., Ramana, G. V. & Datta, M.** (2010) Shear behaviour of loose and compacted pond ash, *Geotech. Geol. Eng.*, 28(6), pp. 763–778. DOI: 10.1007/s10706-010-9337-1.
29. **Mohanty, S. & Patra, N.R.** (2015) Geotechnical characterization of Panki and Panipat pond ash in India, *Int. J. Geo-Engineering*, 6(1), pp. 1–18. DOI: 10.1186/s40703-015-0013-4.
30. **Gruchot, A. & Zydroń, T.** (2016) Impact of a test method on the undrained shear strength of a chosen fly ash, *J. Ecol. Eng.*, 17(4), pp. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/63955>.
31. **Trivedi, A. & Sud, V.K.** (2002) Grain characteristics and engineering properties of coal ash, *Granul. Matter.*, 4(3), pp. 93–101.
32. **Kumar, D., Kumar, N. & Gupta, A.** (2014) Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions, *Int. J. Sci. Res.*, 3(9), pp. 1487–1494.
33. **Lunev, A.A. & Sirotyuk, V.V.** (2021) Influence of Granulometric Composition on the Mechanical Properties of Pond Ash, *Soil Mech. Found. Eng.*, 58(4), pp. 314–319.
34. **Ogorodnikova, E.N. & Nikolaeva, S.K.** (2005) Lithogenetic features of technogenic deposits of ash and slag dumps, *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*, 66, pp. 65-74 (in Russian).

Received 12.10.2022

Approved after reviewing 02.11.2022

Accepted 17.11.2022



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.577.4

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_62

Оценка эффективности применения низкопотенциальной теплоты для отопления спортивных сооружений

А.А. Медяков, П.Н. Анисимов

Андрей Андреевич Медяков

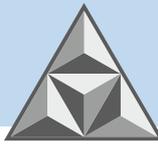
Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Российская Федерация

MedyakovAA@volgatech.net

Павел Николаевич Анисимов

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Российская Федерация

MedyakovAA@volgatech.net



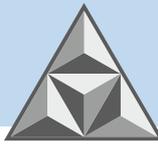
Вопрос сокращения потребления энергоресурсов является крайне актуальным в настоящее время. Развитие использования альтернативных источников энергии становится важным на фоне сокращения запасов полезных ископаемых и роста их стоимости. Целью работы является теоретическое моделирование перехода системы отопления стандартного здания на использование источников низкопотенциальной теплоты. Для каждого типа зданий и системы отопления предлагается свой тип хладагента. Для традиционных систем отопления необходимо подогреть теплоноситель до температуры 50-85 °С. Предлагаемая система позволит покрыть до 44.2% потребностей крытого тренировочного катка на отопление.

Ключевые слова: низкопотенциальная теплота, тепловой насос, система отопления, ледовый каток, охлаждение ледового поля

Для цитирования:

Медяков А.А., Анисимов П.Н. Оценка эффективности применения низкопотенциальной теплоты для отопления спортивных сооружений // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 4. С. 62-71. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022.

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_62



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_62

Assessment of the Effective Use of Low-Potential Heat for the Sports Facilities Heating

A.A. Medyakov, Pavel N. Anisimov

Andrey A. Medyakov

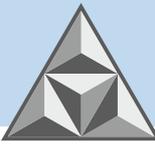
Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

MedyakovAA@volgatech.net

Pavel N. Anisimov

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

MedyakovAA@volgatech.net



Nowadays the issue of energy consumption reducing is very relevant. The development of the alternative energy sources using is becoming important against the background of declining mineral resources and rising costs. The aim of this work is the theoretical modeling of the standard building heating system transition to the use of low-potential heat sources. Also, we propose the different refrigerant types for each building type and heating system. However, the traditional heating systems demands the coolant to be heat to temperatures of 50-85 °C. The proposed system will cover up to 44.2% of the indoor training rink heating needs.

Key words: low-potential heat, heat pump, heating system, ice rink, ice field cooling

For citation:

Medyakov, A.A. & Anisimov, P.N. (2022) Assessment of the Effective Use of Low-Potential Heat for the Sports Facilities Heating, *Smart Composite in Construction*, 3(4), pp. 62-71 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022 (in Russian).

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_62



ВВЕДЕНИЕ

В современном мире все более актуальным становится вопрос экономии энергетических ресурсов. Ограниченные ресурсы полезных ископаемых, постепенное увеличение их стоимости заставляют искать новые источники энергии. При этом ухудшение экологической обстановки во всем мире предъявляет собственные требования к новым источникам энергоресурсов. Одним из решений такой проблемы является использование возобновляемых энергоресурсов.

Установки трансформации теплоты, затрачивая электрическую работу на привод компрессора, позволяют использовать теплоту низкопотенциальных источников. Это открывает возможности отбирать теплоту, которая ранее не использовалась. В [1-3] рассматриваются различные варианты утилизации низкопотенциальной теплоты применительно к технологическим процессам. При этом в качестве основного направления использования теплоты низкого потенциала рассматриваются современные теплонасосные установки. Они позволяют использовать низкопотенциальную теплоту различных источников – земляных пластов, грунтовых вод. Их температура не должна быть ниже минус 5 °С, что для средней полосы Российской Федерации в зимний период обеспечить достаточно сложно [4-9].

Имея круглогодично источники низкопотенциального тепла с температурой от плюс 15 до плюс 40 °С, разумным представляется их использование. В частности, такими источниками могут служить конденсаторы системы холодоснабжения крытого тренировочного катка на стадионе «Дружба» в г. Йошкар-Ола (Российская Федерация).

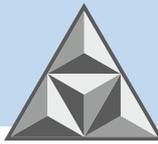
На стадионе «Дружба» расположено здание закрытых теннисных кортов, которое отапливается с помощью систем централизованного теплоснабжения. Цель работы заключается в оценке возможности частичного или полного перевода системы отопления здания на использование источников низкопотенциальной теплоты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для обеспечения высоких температур теплоносителя в системе отопления предложено рассмотреть возможность применения нестандартных хладагентов в установках трансформации теплоты. В настоящей работе таковым выступает хладагент R-21, критическая температура для которого позволяет нагревать теплоноситель для системы отопления до температур в диапазоне 50-85 °С. Такие температуры теплоносителя позволяют использовать его в существующих системах отопления.

На ледовой арене в зимний и переходные периоды года поддерживается конкретная температура, которая не допускает таяния льда и предоставляет весьма комфортные условия для человека во время катания. Эта избыточная температура (плюс 10 °С) создает постоянный тепловой поток, который отводится с помощью хладоносителя, циркулирующего под слоем льда в технологической плите.

Проведенные измерения позволили получить ряд параметров, необходимых для оценки количества теплоты, которое необходимо отводить от системы холодоснабжения для поддержания температуры льда. Произведены замеры температуры на входном и выходном трубопроводах контура охлаждения поля в системе циркуляции хладоносителя, которые составили на подающем минус 11.0 °С, на обратном – минус 9.9 °С. Таким же образом измеряли:



фреону в испарителе системы холодоснабжения катка.

С использованием изображения процесса работы холодильной установки катка на термодинамической диаграмме $i - \lg P$ (см. рис. 1) найдены параметры фреона в характерных точках и расчетная тепловая нагрузка конденсаторов в зимний и переходные периоды года (399.5 кВт).

Расчетная тепловая нагрузка конденсатора системы холодоснабжения катка в летний период составила 842.66 кВт.

В целях использования теплоты, выделяющейся на конденсаторах системы холодоснабжения катка, предлагается установить дополнительную систему трансформаторов тепла, которые будут использовать в качестве испарителей конденсаторы существующих холодильных установок системы холодоснабжения катка. Таким образом, на конденсаторах дополнительной системы будет получена теплота, температурный уровень которой будет достаточным для использования в централизованной системе теплоснабжения. Чтобы обеспечить необходимый температурный диапазон для установок второй ступени, выбрали хладагент R-21. Для расчета установки построен процесс ее работы (термодинамическая диаграмма $i - \lg P$, рис. 2).

Температура испарения составляет 20 °С для обеспечения теплового потока между конденсатором первой ступени и испарителем второй. Температура конденсации будет изменяться в пределах от 70 до 100 °С в зависимости от температуры окружающего воздуха за счет различной степени сжатия компрессора.

Зависимость температуры конденсации от температуры наружного воздуха необходима для того, чтобы обеспечить гибкость системы в качестве источника теплоты на протяжении всех периодов года. Эта зависимость параметров позволит обеспечивать необходимую температуру теплоносителя в системе отопления при различных температурах наружного воздуха.

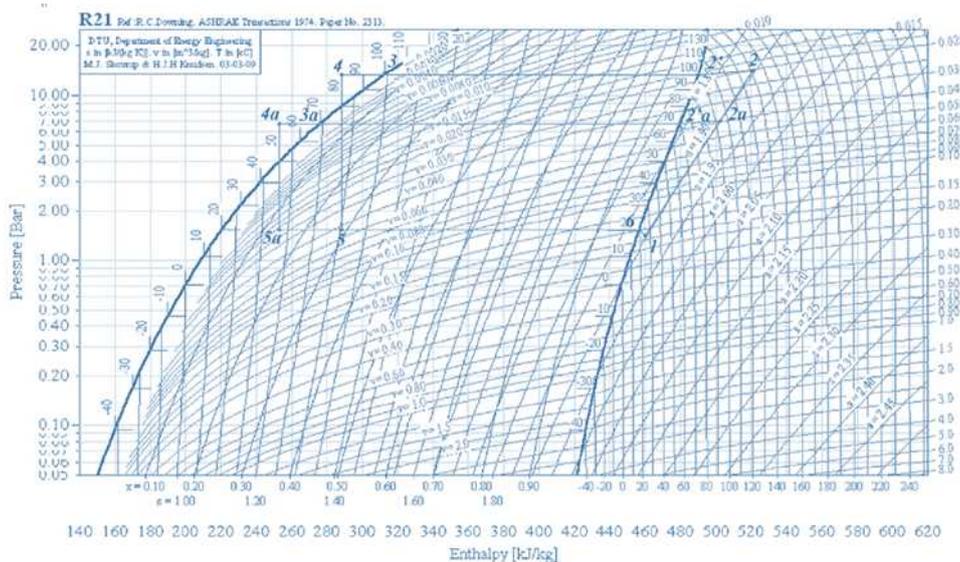


Рис. 2. Термодинамическая диаграмма $i - \lg P$ [10] и процесс работы дополнительного трансформатора тепла: 122'34561 – процесс работы при $T_{\text{конд.}} = 100$ °С; 12a2'a3a4a5a61 – процесс работы при $T_{\text{конд.}} = 70$ °С

Fig. 2. Thermodynamic diagram of $i - \lg P$ [10] and the process of operation of an additional heat transformer: 122'34561 – the process of operation at $T_{\text{cond.}} = 100$ °С; 12a2'a3a4a5a61 – the process of operation at $T_{\text{cond.}} = 70$ °С

Давление всасывания установки составляет 0.15 МПа (1.5 бар), а давление нагнетания для обеспечения требуемой температуры конденсации изменяется в пределах 0.70 (7 бар)... 1.50 МПа (15 бар). Температура фреона после конденсаторов будет зависеть от температуры



окружающего воздуха и колебаться от 50 до 80 °С. Перегрев в испарителе составляет 5 °С. Процесс сжатия в компрессорах будем считать адиабатным. Также учтем небольшие падения давления на участках 2-2' и 6-1, связанные с транспортировкой хладагента от компрессора до конденсаторной площадки и от испарителя до компрессора соответственно.

Найдена теплота, отводимая от конденсаторов трансформатора теплоты в зимний и переходные периоды года (при температурах 70 и 100 оС) и теплота, отводимая от конденсаторов в летний период года (при температуре 70 оС).

С использованием изображения процесса работы трансформатора теплоты на термодинамической диаграмме $i - \lg P$ (рис. 2) найдены параметры фреона в характерных точках. Расчетная тепловая нагрузка на конденсаторах в зимний и переходные периоды (при температуре 70 оС) равна 480.34 кВт, а при 100 оС – 542.2 кВт. Расчетная тепловая нагрузка конденсатора трансформатора теплоты в летний период при температуре конденсации 70 оС составила 1013.31 кВт.

Для оценки перспектив использования теплоты, получаемой на конденсаторах трансформатора, произведен расчет системы отопления здания закрытых теннисных кортов, расположенных вблизи тренировочного катка. Определен расход тепла на отопление и вентиляцию здания при температуре наружного воздуха минус 34 °С. Также найдена минимальная температура наружного воздуха, при которой система трансформаторов тепла может полностью покрыть тепловые потребности здания закрытых теннисных кортов.

Расход тепла на отопление и вентиляцию здания закрытых теннисных кортов при температуре наружного воздуха минус 34 °С составит 1227.06 кВт. При аналогичных условиях дополнительная система трансформаторов тепла вырабатывает 542.20 кВт, что составляет 44.2% от необходимого количества.

Минимальная температура наружного воздуха, при которой система трансформаторов тепла может полностью покрыть тепловые потребности здания закрытых теннисных кортов, равняется минус 2.35 °С.

ВЫВОДЫ

1) Конденсаторные установки системы холодоснабжения крытого тренировочного катка являются потенциальным источником тепла (от 480 до 1000 кВт). Это тепло может быть использовано для нужд горячего водоснабжения в летний период года, а в зимний и переходные периоды – для частичного покрытия нужд отопления.

2) Использование фреона R-21 позволяет нагревать теплоноситель для системы отопления и горячего водоснабжения до 50-85 °С. Такие температуры позволяют использовать фреон R-21 в существующих системах отопления и горячего водоснабжения без каких-либо модернизаций.

3) Предложенная к установке дополнительная система трансформаторов тепла покрывает потребности системы холодоснабжения катка в г. Йошкар-Ола. Она позволяет покрыть 44.2% тепловой нагрузки системы теплоснабжения здания крытых теннисных кортов при температуре минус 34 °С. При достижении температуры показателя минус 2.35 °С трансформаторы тепла могут полностью обеспечивать теплоснабжение крытых теннисных кортов.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Соколов Е.Я., Бродянский В.М.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. М.: Энергоиздат, 1981.
2. **Сычёв А.О.** Анализ теплового потенциала ряда рек московского региона для целей теплонасосного теплоснабжения // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. № 3(32). С. 16-25.
3. **Гурков А.А., Разумняк Н.Л., Горн Е.В., Якунчиков Е.Н.** Функциональная модель утилизации низкопотенциальной теплоты шахтных вод // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 47. С. 60-67. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-47-60-67.
4. **Боровков В.М. А.А. Аль-Алавин.** Энергосберегающие теплонасосные системы теплоснабжения // *Изв. вузов. Проблемы энергетики*. 2007. № 1-2. С. 42-47.
5. **Мазалов Ю.А., Захаров А.А., Конов А.Ф.** Тепловой насос с повышенным отопительным коэффициентом // *Труды ГОСНИТИ*. М., 2009. Т. 104. С. 175-178.
6. **Шит М.Л., Стариков А.В., Журавлев А.А., Тимченко Д.В.** Многотемпературный тепловой насос с каскадным включением компрессоров // *Проблемы региональной энергетики*. 2017. № 2(34). С. 90-97.
7. **Осипов А.И.** Тепловой насос как перспективная технология для отопления и холодоснабжения // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2015. № 6(162). С. 52-53.
8. **Федосов С. В., Федосеев В.Н., Петрухин А.Б., Мартынов И.А., Опарина Л.А.** Тепловой насос как элемент энергосберегающей политики для энергоёмких предприятий текстильной и лёгкой промышленности // *Текстильная и легкая промышленность*. 2018. № 2. С. 10-12.
9. **Степанычев Ю.А.** Тепловой насос как вариант снижения энергоёмкости в АПК // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2017. № 2(34). С. 90-97.
10. Термодинамические диаграммы i-lgP для хладагентов. М.: АВИСАНКО, 2003. 50 с.

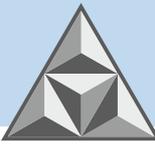
Поступила в редакцию 03.10.2022

Одобрена после рецензирования 19.10.2022

Принята к опубликованию 17.11.2022

REFERENCES

1. **Sokolov, E.Ya. & Brodyansky, V.M.** (1981). *Energy bases of heat transformation and cooling processes: Textbook for universities*. 2nd ed., reprint. М.: Energoizdat (in Russian).
2. **Sychev, A.O.** (2019) Analysis of the thermal potential of a number of rivers in the Moscow region for the purposes of heat pump heat supply, *Innovatsii v selskom khozyaystve*, 3(32), pp. 16-25 (in Russian).
3. **Gurkov, A.A., Razumnyak, N.L., Gorn, E.V. & Yakunchikov, E.N.** (2019) Functional model of utilization of low-potential heat of mine waters, *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*, no. 47, pp.60-67. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-47-60-67



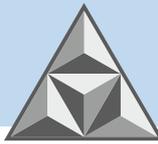
(in Russian).

4. **Borovkov V.M. & Al-Alavin A.A.** (2007) Energy-saving heat pump systems of heat supply, *Izv. vuzov. Problemy energetiki*, no. 1-2, pp. 42-47 (in Russian).
5. **Mazalov, Yu.A., Zakharov, A.A. & Konov A.F.** (2009) Heat pump with an increased heating coefficient, *Trudy GOSNITI. M.*, (104), pp. 175-178 (in Russian).
6. **Shit, M.L., Starikov, A.V., Zhuravlev, A.A. & Timchenko, D.V.** (2017) A multi-temperature heat pump with cascade compressors, *Problemy regionalnoy energetiki*, 2(34), pp. 90-97 (in Russian).
7. **Osipov, A.I.** (2015) Heat pump as a promising technology for heating and cooling, *Santekhnika, otopleniye, konditsionirovaniye*, 6(162), pp. 52-53 (in Russian).
8. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N., Petrukhin, A.B., Martynov, I.A. & Oparina, L.A.** (2018) Heat pump as an element of energy-saving policy for energy-intensive enterprises of textile and light industry, *Tekstilnaya i legkaya promyshlennost*, (2), pp. 10-12 (in Russian).
9. **Stepanychev, Yu.A.** (2017) Heat pump as an option to reduce energy intensity in agriculture, *Innovatsii v selskom khozyaystve*, 2(34), pp. 90-97 (in Russian).
10. *Thermodynamic diagrams i-lgP for refrigerants* (2003). M.: AVISANKO (in Russian).

Received 03.10.2022

Approved after reviewing 19.10.2022

Accepted 17.11.2022



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.017.9

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_72

Архитектура без границ

С.В. Расторгуев, П.В. Петрова

Семён Васильевич Расторгуев

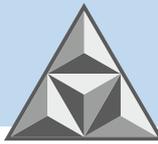
Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

rastorguevsv@ystu.ru

Полина Вячеславовна Петрова

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

polina78435@gmail.com



Рассматривается использование архитектурных методов для создания структур в новых средах (архитектура на воде, под водой и в космосе, а также учитывающая повышение уровня мирового океана в течение столетия). Выявлены образы, которые могут принимать архитектурные сооружения, и мимикрия сооружений в экстремальных климатических условиях. Изучаются глобальные вопросы о границах проектирования и пересечения архитектуры с другими науками. Авторы представляют проектные решения в области поиска материалов с новыми свойствами, разработки конструкций с недостижимыми ныне прочностными характеристиками. Кроме того, предлагаются новые технологий сбора и передачи энергии способами, которые в настоящее время представлены только в области фундаментальных исследований. Архитектура с точки зрения исследовательских горизонтов и значительных временных и территориальных пространств приобретает гуманитарные качества переноса, транслирования информации и опыта, накопленного цивилизацией.

Ключевые слова: архитектура, биомимикрия, геостационарная орбита, солнечный парус, циклер, повышение уровня мирового океана, графеновая нанотрубка

Для цитирования:

Расторгуев С.В., Петрова П.В. Архитектура без границ // *Умные композиты в строительстве.* 2022. Т. 3, № 4. С. 72-98. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022.

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_72



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_72

Architecture without Borders

S.V. Rastorguev, P.V. Petrova

Semen V. Rastorguev

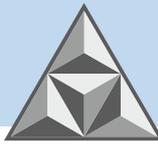
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

rastorguevsv@ystu.ru

Polina V. Petrova

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

polina78435@gmail.com



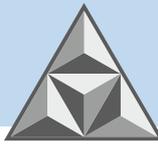
The use of architectural approaches to create structures in new environments (architecture on water, underwater and in space, as well as taking into account the rise of world ocean level throughout the century) is considered. The images that architectural structures can take and the mimicry of structures in extreme climate conditions are revealed. Global questions about the boundaries of design and the interaction of architecture with other sciences are studied. The authors present design solutions in the search for materials with new properties and the development of structures with currently unattainable strength characteristics. Furthermore, new technologies are proposed for collecting and transmitting energy in ways that are currently only represented in the field of basic research. Architecture, in terms of research horizons and significant temporal and territorial spaces, gains the human qualities of transferring, communicating the information and experience accumulated by the civilization.

Key words: architecture, biomimicry, geostationary orbit, solar sail, cyclor, world ocean level rise, graphene nanotube

For citation:

Rastorguev, S.V. & Petrova, P.V. (2022) Architecture without Borders, *Smart Composite in Construction*, 3(4), pp. 72-98 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022 (in Russian).

DOI: 10.52957/27821919_2022_4_72



ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается ряд проектов-исследований, выходящих за границы традиционных представлений об архитектуре. Такие исследования проводились с целью поиска архитектурных форм, конструкций, инженерных и научных решений в условиях изменяющегося климата, а также применительно к архитектуре в новых средах.

Рассматривали следующие направления исследований и проектирования:

- архитектура, адаптирующаяся к повышению уровня мирового океана;
- архитектура в водной среде;
- архитектура в космосе.

В большинстве случаев применялось концептуальное проектирование для относительно удалённого будущего, на дальнюю перспективу. Соответственно, рассматривались инновационные инженерные решения и материалы, которые в данный момент находятся на ранних стадиях разработки. Также были выделены направления, по которым только предстоит выдать адекватные архитектурные или инженерные ответы на задачи, поставленные в рамках концептуальной разработки проектов.

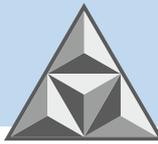
Об актуальности подобных исследований свидетельствует большое число публикаций в российских и зарубежных журналах, в частности, «Татлин» [1], «l'Arca International» [2], Морском атласе XXI века «La Terre est Bleue», Marine nationale française [3]. Такие проекты экспонировались на архитектурных выставках «Арх-Москва», «Exhibition of the projects the Jacques Rougerie Foundation Competition in the National School of Architecture Paris-Val-de-Seine» [4].

ДИСКУССИОННЫЙ АСПЕКТ: ГДЕ ПРОХОДЯТ ГРАНИЦЫ АРХИТЕКТУРЫ

В нашем быстро меняющемся мире любая область человеческого познания может выйти на новые рубежи. Это касается и классического разделения научных дисциплин, и областей их исследования. Возникает вопрос: границы наук существуют или искусственно создаются рамки, с целью упрощения исследований и расчётов? В любом случае, можно рассуждать о том, что, поднявшись чуть выше над уровнем горизонта, мы имеем новые области изучения и не спрашиваем у конкурентов, работающих по смежным специальностям, не зашли ли мы на их территорию. Согласно теории Большого взрыва и бесконечно расширяющейся Вселенной, генетика пространственно-временного континуума подразумевает поступательное расширение областей познания, что выглядит закономерным.

Обратимся к архитектуре: понятно, что за границами привычных планов, фасадов, локального благоустройства и улучшения эстетического восприятия окружающей среды существуют области, которые, казалось бы, в большей степени относятся к прогнозированию изменения климата, различных погодных катастроф и других метеорологических процессов, переворачивающих нашу привычную уютную среду обитания с ног на голову. Теоретические прогнозы глобального потепления и, как следствие, глобального наводнения гласят: «к 2070 г. уровень мирового океана повысится примерно на 1 м» (без учёта спонтанных сценариев развития событий).

Нами предлагается рассмотреть ряд архитектурных проектов, направленных на исследование, прогнозирование и учёт новых условий изменчивого мира в архитектуре будущего. Некоторое время назад была создана исследовательская группа, разрабатывающая проекты в сфере архитектуры будущего, архитектурной футурологии и отвечающая на



конкретные вызовы изменения среды обитания человечества. Рассматривались эпизоды жизни в условиях повышения уровня мирового океана, архитектуры на воде и под водой и архитектуры в космосе. Разрабатываемые проекты участвовали в ряде международных конкурсов, некоторые из них оказались в шортлисте конкурса Fondation Jacques Rougerie Института Франции [4], а другие – получили почётное упоминание конкурса.

Результаты исследований периодически публикуются на сайте «Архитектура и энтропия» [5]. Также в 2022 г. был издан сборник «Альтернатива» [6], где подробно рассмотрены порядка 20 архитектурных проектов подобной тематики.

Приводим здесь краткий обзор нескольких наиболее показательных проектов.

Проект «stream city»

Область проектирования: условная граница атмосферы и космоса – Линия Кармана, орбита Земли – на высоте 100 км [7].

Краткая суть проекта: создание города в ближайшей доступности от Земли на случай драматического развития ситуации с климатом или сверхмощного повышения уровня загрязнений на планете.

Масштаб сооружения: длина $\approx 41\,500$ км (проекция линии экватора на высоту 100 км), ширина ≈ 0.5 км.

Особенности: эффект остановки времени – стабильное время суток в определённых частях города [8].

Существует концепция, согласно которой человечество вполне могло бы сформировать обитаемую среду на ближайших космических телах. Тем не менее процесс колонизации даже ближайшего космоса очень трудоёмок и продолжителен по времени, а ситуация на нашей планете может развиваться непредсказуемо. В этом проекте речь идёт о будущем развития ближнего космоса на том расстоянии от Земли, где уже сейчас находится множество необитаемых и обитаемых рукотворных космических аппаратов.

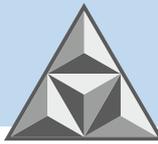
По проекту, Город-Поток (Stream City) опоясывает Землю как кольцо, оставаясь на месте, в то время как планета вращается вокруг своей оси. Город располагается на высоте ≈ 100 км и вращается со скоростью чуть более 1700 км/ч над экватором. Поскольку, с другой точки зрения, земной шар вращается вокруг своей оси в противоположную сторону с такой же скоростью, в системе Земля – Солнце Stream City можно представить как статичную рамку, внутри которой располагается вращающийся земной шар. За год эта система делает один оборот вокруг Солнца, оставаясь всегда развёрнутой (освещённой) стороной Stream City к Солнцу.

В связи с этим в разных частях города всегда наблюдается одно и то же время суток: где-то постоянно день, а где-то – вечер, когда можно бесконечно наблюдать закат Солнца. В Stream City: время = расстояние.

На дневной стороне расположены энергетические системы, солнечные батареи и оранжереи [9], которые питают весь город (рис. 1).

Ночная сторона предоставит место для лабораторий, высокотехнологичных производств, а также размещения творческих кампусов. В промежуточных «вечерних» и «утренних» зонах освещение более мягкое, поэтому там располагается жильё.

Город является универсальным средством передвижения. С помощью космических лифтов и шаттлов можно подняться с поверхности Земли, достичь города и, оставаясь в нём, менее чем за сутки оказаться в любой точке экватора. Идея «космического лифта» [10] состоит в том, что выше геостационарной орбиты зависает спутник большой массы, выполняющий



функцию противовеса в системе. От него спускается сверхпрочный трос, по которому лифт перемещается к поверхности Земли [11]. С помощью этого лифта осуществляется коммуникация Stream City с Землёй, доставка грузов, а также конструктивная устойчивость самого города-кольца без привлечения большого количества реактивных двигателей. Гравитация в Stream City будет схожа с земной (по расчётам, на 6% меньше).

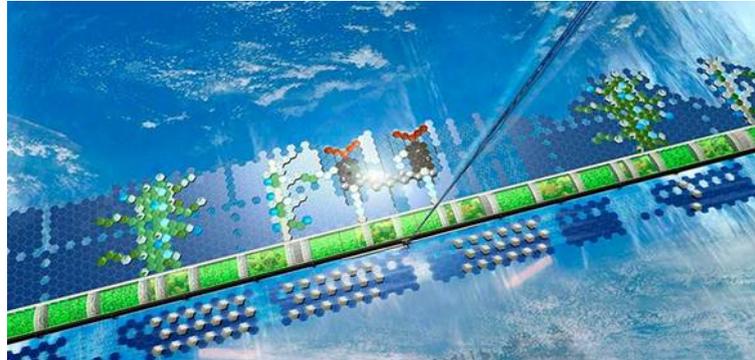


Рис. 1. Визуализация Stream City на орбите на фоне Земли (С. Расторгуев, К. Тихонов)

Fig. 1. Visualization of Stream City orbiting Earth (S. Rastorguev, K. Tikhonov)

Проект «Капля в океане»

Область проектирования: затопленные территории в случае повышения уровня мирового океана на 0.7-1.4 м и выше (прогноз на 2070 – 2100 гг.) [12]; архитектура, адаптирующаяся к повышению уровня мирового океана.

Краткая суть проекта: вокруг главных архитектурных памятников в мировых столицах, попавших на территорию затопления, создаются защитные конструкции, выполняющие одновременно и туристическую функцию.

Приведен пример для Исаакиевского собора в Санкт-Петербурге. Масштаб сооружения – в зависимости от параметров памятника. В случае Исаакиевского собора: $R \approx 110$ м, высота – 40 м. Особенности: кроме защиты от воздействия воды, создаются новые видовые точки на памятник архитектуры, привлекательные для туристов [13].

Этот проект можно считать противоположностью предыдущему в том смысле, что даже в случае всемирных катаклизмов жизнь не покидает Землю, а авторы призывают к безусловной ценности исторической застройки городов.

Постепенно мир изменяется, и города, которые находятся на побережье океанов и морей, будут уходить под воду. В числе таких городов Венеция, Амстердам, Пиза, Гамбург, Копенгаген, Санкт-Петербург и многие другие. Целиком города сохранить вряд ли удастся, однако наиболее ценные и важные памятники истории и архитектуры можно сберечь.

Основная идея проекта заключается в том, чтобы затопленные города мира стали подобием музеев, а не исчезли без следа. Поэтому в каждом из них предлагается сохранить памятники истории и оградить их от бушующей водной стихии. Источником для вдохновения послужила капля воды, образующая при падении на водную гладь «корону», которая ограждает внутреннее пространство и при этом абсолютно гармонирует с окружением. Основная конструкция – пространственная оболочка, напоминающая эту самую «корону» (рис. 2).

Оболочка разбита на полигоны, каркасы которых придают конструкции жесткость. Вокруг памятника находится кольцо обозрения. Оно позволяет посмотреть на памятник архитектуры под новым, недоступным ранее углом – теперь турист уже не может взглянуть на эту историческую архитектуру в контексте города. Объекты становятся уникальными



музейными экспонатами в среде океана. Круговая галерея обозрения опирается на цепь колонн. У колонн конструктивная функция, они укрепляют основание оболочки. Проектом предусмотрены лифты, которые перемещают туристов с уровня галереи на «бывший» уровень земли (и наоборот). Из лифта также есть выход на пирс, к которому причаливают корабли, или доступ к вертолетной площадке.



Рис. 2. Визуализация проекта «Капля в океане» на примере исторических памятников г. Санкт-Петербурга (М. Кудряшов, А. Киселев)

Fig. 2. Visualization of the project "A Drop in the Ocean" using historical monuments of Saint Petersburg as an example (M. Kudryashov, A. Kiselyov)

Обзор памятника архитектуры возможен с галереи обозрения (сохранившейся земной поверхности внутри «Капли») или с поверхности воды мирового океана (палубы корабля, через полупрозрачную ограждающую памятник структуру).

Проект «Ковчеги / Arks»

Рассматривается повышение уровня мирового океана, как и в предшествующем проекте, но в более неблагоприятных прогнозах: уровень – более высокий, сочетающийся с вымыванием почв и другими климатическими изменениями.

Суть проекта: создаются относительно компактные поселения, способные перемещаться по мелководью в условиях трансформировавшегося подводного рельефа. Используется шаговый механизм передвижения.

Масштаб сооружения: регулируемая высота – в зависимости от глубины воды на территории, где передвигается объект. Общая высота – до 300 м.

Особенности: кроме крупномасштабных сооружений, предполагается изготовление на их базе автономных локальных механизмов ARKS для обслуживания малых частей сооружений и разведки морского дна. Передача энергии между отдельными объектами планируется с помощью лазерных импульсов [14].

В условиях повышения уровня мирового океана опасность для цивилизации представляет не только непосредственный уровень подъема воды, но и глобальные и локальные природные катаклизмы, которые неизбежно последуют (ураганы, торнадо, цунами, похолодание). Население будет вынуждено покинуть прибрежные мегаполисы. В этом проекте авторы, используя идеи архитектурной группы «АРКИГРЭМ» [15],



предположили, что социальные связи горожан столь неразделимы, что скорее город уйдет вместе с людьми.

Механизм шагового передвижения наиболее устойчив, управляем и адаптирован для непредсказуемого профиля рельефа, особенно под водой, сложившегося в результате катаклизмов. Его решено применить для передвижения мини-городов – Ковчегов (рис. 3).



Рис. 3. Визуализация проекта «Ковчеги» на мелководье (М. Кудряшов, С. Расторгуев, Р. Сахаров)

Fig. 3. Visualization of the Ark project in shallow water (M. Kudryashov, S. Rastorguev, R. Sakharov)

Такой принцип передвижения основан на использовании ультрапрочной конструкции шагового механизма и материалов на основе карбона и графеновых нанотрубок [16, 17]. Данная система призвана обезопасить города-ковчегии от нескончаемых штормов, возросшей, из-за перераспределения масс на поверхности земного шара, вулканической активности и других стихийных бедствий.

Предложена идея и функционального фокусирования отдельных ковчегов; иерархия поселений близка к наблюдаемой в настоящее время: сырьевые, производственные, жилые и административные Ковчегии.

Авторы предположили, что в системе движущихся Ковчегов и непрогнозируемых климатических условий существующие системы коммуникации не смогут эффективно функционировать. Им на замену придут многофункциональные автономные наномеханизмы – Autonomus Rechargeable Kinematical Swarm (ARKS). Так, производство, существующее в настоящее время в виде крупномасштабных объектов, авторы предложили разделить на микроскопические универсальные элементы, выполняющие функции добычи и транспортировки ресурсов, информации и энергии.

Проект «Коллекционер памяти»

Область проектирования: «конвенциональное» повышение уровня мирового океана в рамках прогнозов [18]. Взята как пример Венеция – город, который и в «лучшие времена» страдал от ежегодных наводнений Аква Альта, а также имеющий особый статус в плане исторической ценности.

Суть проекта: оценка исторической ценности объектов происходит максимально непредвзято – с помощью искусственного интеллекта (ИИ). Кроме того, ИИ занимается и созданием самой системы хранения.

Масштаб сооружения: сопоставим с размерами островной части Венеции в плане, системы хранения могут достигать в высоту 100 м (рис. 4).

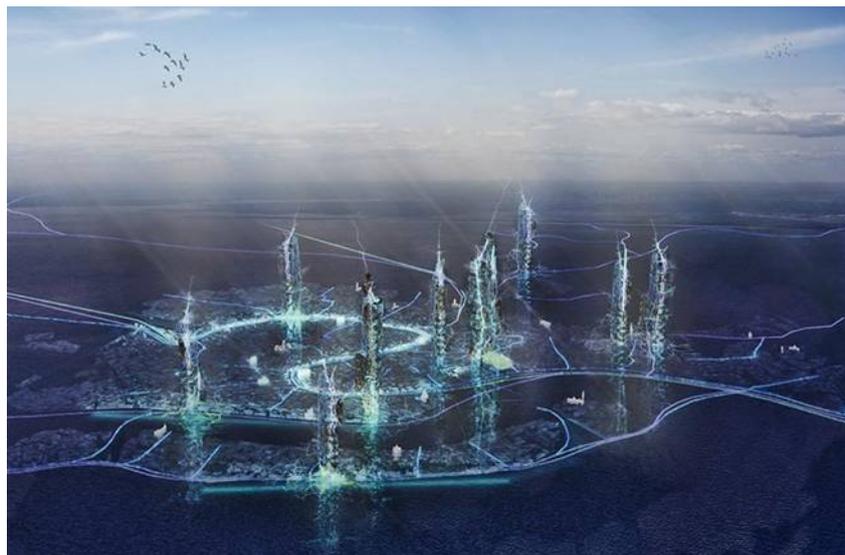


Рис. 4. Визуализация проекта «Коллекционер памяти» на примере затопленной Венеции
(С. Расторгуев, М. Кудряшов, А. Шишков, Ф. Муродбеков)

Fig. 4. Visualization of the "Memory Collector" project with the example of the flooded Venice
(S. Rastorguev, M. Kudryashov, A. Shishkov, F. Murodbekov)

Особенности: данный проект, возможно, самый гуманитарный из серии и, кроме технических, конструктивных и утилитарных аспектов, оперирует понятиями «память, дух места и историческая справедливость», которые имеют важное значение в прогнозировании архитектурных объектов будущего [19].

Следующий проект авторы начинают с утверждения: «Архитектура – это живое существо, обладающее памятью». От разбушевавшихся природных стихий, в первую очередь, страдает человеческая материальная культура, а при наводнении быстрее всего исчезнут коммуникации – связь между поселениями, роль которой в настоящее время отведена автомобильным и железнодорожным путям. При всемирном потопе – пропадёт связь между отдельными частями цивилизации, а также связь между её прошлым и настоящим, система ценностей и законов – её «генетический код» начнёт разрушаться [20]. Рано или поздно это приведёт и к исчезновению самой цивилизации.

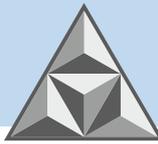
«Коллекционер памяти» – система, обладающая искусственным интеллектом, которая способна перемещаться и расти, используя технологию самовоспроизводства с помощью 3D-печати.

Система «Коллекционер памяти» сосредотачивает в себе качества, представленные ниже.

Утилитарность – обеспечивает коммуникацию между зданиями затопленных городов, наполняя их жизнью: энергией, ресурсами, связью. Впоследствии создаются коммуникации и между городами.

Память поколений – сохранение генетического кода цивилизации, разрушенной вследствие всемирного экологического катаклизма. Цивилизация, сохранившая свою «память», имеет хорошие шансы на возрождение. Машина, способная определить историческую ценность предмета, пользуясь нейросетями, оставляет надежду на археологическую справедливость, при этом действуя бесстрастно, пользуясь исключительно заложенными алгоритмами и библиотеками ценностных характеристик.

Оптимизация – вынос мусора и предметов, не имеющих уникальной исторической ценности, не содержащих «памяти»; используется системой для собственного строительства и зданий для хранения «коллекций памяти» – ценных фрагментов культуры, среди которых



живут люди.

В данном проекте представлено создание «коллекции памяти» для затопленной Венеции 2070 года. Бывшие венецианские каналы используются Системой для строительства коммуникационных «ветвей». Исторические памятники, которые были под угрозой уничтожения водой, эвакуируются и собираются в «коллекции» – новые вертикальные улицы Венеции, которые посещают туристы.

К концу XXI столетия человечество, как предполагается, достигнет паритета вычислительных мощностей с ИИ. В это время уровень мирового океана, вполне вероятно, поднимется настолько, что поглотит большинство городов – исторических центров мира.

Проект «Жажда»

Область проектирования: архитектура на поверхности океана, плавучие архитектурные сооружения.

Краткая суть проекта: обеспечение населения пресной водой с помощью транспортировки антарктических и арктических айсбергов в населённые районы Земли, расположенные на расстоянии не более 5000 км от Южного и Северного районов распространения айсбергов, соответственно, окрестностей Антарктиды и Гренландии [21].

Масштаб сооружения: зависит от параметров транспортируемых айсбергов. В проекте взят за основу диапазон средних размеров айсбергов от 60×30×30 до 120×70×60 м (длина/ширина/высота). Соответственно, минимальный размер поселения составляет 50×30×20 м, с возможностью расширения конструктивной несущей части [22].

Особенности: проектом предусматривает наличие системы фокусировки, накопления и распространения солнечного света по оптоволокну с опциональным преобразованием его в электроэнергию в случае необходимости для определённых технологических процессов.

Проект «Жажда» разработан авторами в поиске путей предотвращения катастрофических последствий нехватки пресной воды на планете. При всемирном наводнении ценность данного ресурса многократно вырастет. Источники, из которых сейчас поступает питьевая вода, в большинстве своем будут недоступны, а добыча пресной воды из солёной морской – весьма энергоёмкий процесс, особенно в ситуации недоступности энергоресурсов. Энергии будет недостаточно, большинство электростанций окажутся неработоспособны, а доступ к углеводородам исчезнет.

Лед как иное агрегатное состояние воды станет новым полезным ресурсом, а переработка его в воду – новым видом экономики. Проект предполагает транспортировку арктических и антарктических айсбергов. Перевозка айсбергов, по сравнению с другими вариантами – достаточно рациональная модель добычи пресной воды. Для реализации данной модели планируется строительство новых типов «шахтерских» поселений, адаптированных под актуальную экономику процесса переработки айсбергов.

Разрабатываемое поселение не ограничено в своих размерах и зависит только от объема источника пресной воды – размера айсберга. Можно классифицировать его как паразита: «город шахтеров» фактически прикрепляется к айсбергу и перевозит его на территорию, где нужна питьевая вода (рис. 5).

Один айсберг среднего размера способен обеспечить потребности 35000 человек в течение года. Технологический процесс перевозки подразумевает два айсберга: «старый айсберг» идёт на потребление, «новый» – поддерживает плавучесть.

Ещё одна составляющая проекта – это энерголинзы, собирающие солнечный свет, который может преобразовываться в электроэнергию или распространяться просто в виде



света по оптоволокну. Для системы освещения без использования электричества нужны также устройства хранения света – зеркальные ёмкости-лабиринты с наноразмерной структурой, где свет с минимальными потерями сохраняется длительное время и может выпускаться порциями для внешнего распространения [23]. На момент проектирования уже имеются научные разработки на тему «замораживания» сроком до 1 мин. светового луча в определённых материалах [24]. Авторы надеются, что в дальнейшей перспективе этот срок существенно увеличится. В данном проекте энергию света предполагается также применять для функционирования турбин, которые приводят в движение город-айсберг. Потоки воды усиливаются в зазоре между айсбергами и направляются специальными заслонками, что позволяет управлять движением всей структуры, а город становится буксиром тысяч тонн льда.



Рис. 5. Визуализация проекта «Жажда», подводная часть айсбергов и поселения (С. Расторгуев, И. Смирнова, Л. Мезенина, С. Огурцов, А. Бурькина, А. Цветков, С. Галицына)

Fig. 5. Visualization of Project "Thirst", the iceberg underwater part and the settlement (S. Rastorguev, I. Smirnova, L. Mezenina, S. Ogurtsov, A. Burykina, A. Tsvetkov, S. Galitsyna)

Город эволюционирует в течение трехлетнего цикла, перевоза различные айсберги. Естественным образом айсберги тают, и 35% от их объема уходит в океан, но оставшиеся запасы воды можно применить и распространить.

Проект «Кочевники солнечного ветра»

Область проектирования: дальний космос. Данный проект представляет вариант далёких космических путешествий, важная часть которых – пополнение израсходованных запасов необходимых жизненных ресурсов.

Краткая суть проекта: создаётся система, которая позволяет осуществлять космический путешествия на дальние расстояния, в том числе – межзвёздные. Две компоненты таких путешествий – достижение высокой скорости перемещения и способы восстановления израсходованных ресурсов.

Масштаб сооружения: для достижения высоких околосветовых скоростей перемещения объекта большой массы необходим радиус солнечного или звёздного паруса в сотни километров [25], что позволит ему достичь необходимой и собрать общую энергию «пойманных» фотонов, преобразуя ее кинетическую энергию движения конструкции [26] (рис. 6).

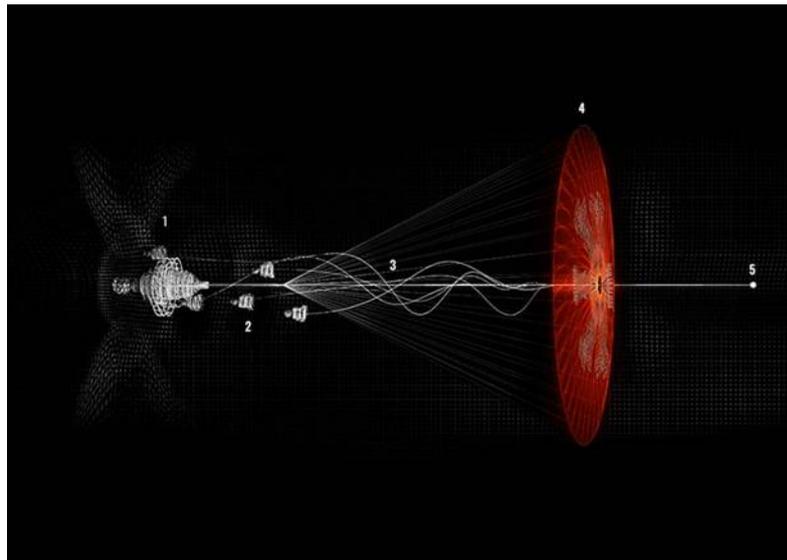
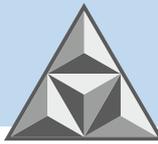


Рис. 6. Схема города «Кочевники солнечного ветра», режим полёта: 1 – главное поселение, выполняющее также функцию противовеса в системе; 2 – строящиеся новые поселения; 3 – трансформируемый участок конструкции, свёрнутый в режиме полёта; 4 – солнечный/звёздный парус; 5 – стыковочный/посадочный модуль
(С. Расторгуев, М. Кудряшов, А. Тер-Степанян, И. Аладов)

Fig. 6. Layout of the "Solar Wind Nomads" city, in flight mode: 1 - main settlement, also serving as a counterweight in the system; 2 - new settlements under construction; 3 - transformable section of the structure, rolled up in flight mode; 4 - solar/stellar sail; 5 - docking/landing module (S. Rastorguev, M. Kudryashov, A. Ter-Stepanyan, I. Aladov)

Сооружение проектируется в двух вариантах: режим полёта и режим прикрепления к планете. Во втором варианте горизонтальное расстояние конструкций (диаметр паруса принимается как вертикальный параметр) становится равным высоте стационарной орбиты планеты (по аналогии с геостационарной орбитой для Земли).

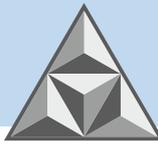
Особенности: помимо новой философии «кочевого поселения», создаваемой в данном проекте, присутствует также аспект, противопоставляемый сооружениям глобальных масштабов. Нанороботы осуществляют разведку, добычу и хранение собранных ресурсов до момента следующей стыковки города Кочевников солнечного ветра с планетой. Такие периоды «ожидания и сбора» могут составлять десятки или сотни лет [27].

Проект «Города кочевников солнечного ветра» – окончательный отказ определённой части человечества от связи с планетой рождения и обитания (Землёй). Это векторный город, оторвавшийся от своего основания и эмигрировавший во Вселенную. Отсюда и название – город-кочевник. Структура объекта больше напоминает городскую, нежели планетарную, как если бы все города Земли объединились в одно линейное мегапоселение.

Город в проекте – колоссально протяжённая, но сравнительно тонкая структура. Её главное предназначение – полёты на большие расстояния в космосе (межпланетные и межзвёздные). Город существует в двух ипостасях: режим полёта и режим посадки/прикрепления к планете.

Длина города обусловлена тем, что при посадке центр его масс должен оказаться от планеты на расстоянии большем чем её стационарная орбита. За счёт этого город будет удерживаться над поверхностью планеты, не оказывая на неё практически никакого давления. Его вес на поверхности будет отрицательным, и он будет крепиться к ней специальным якорем. Масса противовеса, находящегося выше центра масс, должен превышать вес всего остального города.

Также город планируется оснастить солнечным/звёздным парусом. За счёт своей огромной площади парус довольно быстро будет придавать городу скорость, близкую к скорости света [28]. Первоначальный разгон будет достигаться за счёт поглощённой энергии



фотонов солнца [29]. Затем возможно торможение с помощью ионных двигателей либо за счёт встречного света звезды, к которой город подлетает. Кроме того, рассматривается вариант светового реверса – использования отражённого света. Устойчивость парусу придадут растяжки, крепящиеся к городу. Частично поверхность паруса занимают солнечные батареи для выработки энергии функционирования города.

Трансформируемый участок позволяет настраивать длину города исходя из высоты орбиты планеты, на которую осуществляется посадка.

Стержень – центральная конструкция, к которой прикреплены все элементы города. Он работает на растяжение. Предполагаемый конструктивный материал разрабатывается на основе графеновых нанотрубок [30].

Поселения – жильё, производство, оранжереи и другие необходимые структуры для жизни горожан могут располагаться по всей длине стержня, за исключением участка трансформации.

Идея функционирования «Города кочевников солнечного ветра» заключается в том, что при исследовании планеты и даже при добыче ресурсов нет необходимости создавать на ней колонии, приспосабливаться к её атмосфере и тратить на это время и энергию. Город – это готовое поселение колонизаторов. После прикрепления к планете выбрасывается нанопыль – набор нанороботов, способных к самовоспроизводству. Нанопыль осуществляет основную работу на поверхности планеты – исследует, строит и добывает ресурсы. Таким образом, город может прикрепиться к планете на какое-то время, высадить на её поверхность нанопыль, источник энергии и стартовый запас ресурсов. Затем нанопыль производит необходимые действия на поверхности планеты. Это будет происходить до возвращения на подготовленную площадку города с целью забрать добытые ископаемые и, при необходимости, продолжить начатые исследования уже с участием поселенцев.

Проект «Spaceport Ra»

Область проектирования: космическое пространство в пределах Солнечной системы.

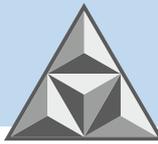
Краткая суть проекта: проект создавался для относительно удалённого будущего, когда многочисленные межпланетные путешествия приведут к необходимости создания промежуточной точки опоры – «мини-Земли» на орбите Марса (или Сатурна). Места пересечения космических потоков; места, где можно ненадолго отдохнуть и вспомнить свою родину – Землю, оказавшись в среде, напоминающей родную планету (как минимум, гравитацией и растительностью).

Масштаб сооружения: вдоль оси – 670 м, радиус вращающихся компонентов – до 250 м.

Особенности: помимо технологических преимуществ перед небольшими космическими аппаратами в виде искусственной гравитации и различных бионических зон, имитирующих пребывание человека в живой природе, проект несёт в себе существенный гуманитарный аспект, транслирующий привычные символические формы – от геометрических до шрифтовых образов в удалённые уголки космического пространства, пропагандируя антропный фактор визуально и образно в окружающую непознанную среду. Объект своим внешним видом призван служить ориентиром-маяком для путешествующих целую вечность космических странников [31].

Проект «Spaceport Ra» рассмотрим здесь более подробно, поскольку он разработан в текущем году и подробности такого исследования ещё нигде не озвучивались.

Космос является перспективной отраслью для архитектуры, что обсуждалось ещё в XX столетии. На данный момент существуют не только государственные [32], но и частные



компаний [33], которые активно занимаются разработками космических аппаратов, проектов поселений и зданий для других планет и спутников. Развивается космический туризм [22], создаются космические общества [34], исторически значимые космические миссии [35].

С развитием индустрии и технологий архитекторы неминуемо займутся проектированием космических объектов [36]. Уже сегодня они привлекаются в эту сферу не только для создания теоретических проектов, но и для реальных разработок [37]. Вопрос развития космической индустрии становится весьма актуальным, с учетом колоссальной проблемы загрязнения окружающей среды, ограниченности ресурсов и других факторов, представляющих угрозу человечеству [38].

На данный момент космические корабли и станции не являются комфортными для человека: длительное пребывание на их территории может вызывать физический и эмоциональный дискомфорт, привести к дальнейшим проблемам со здоровьем [39]. Требуется решения, которые подразумевают создание более безопасных и удобных для человека пространств внутри космических объектов.

Первый в истории коммерческий космический отель Voyager Station планируется открыть в 2027 г. [40]. Проект, рассчитанный на 280 гостей и 112 членов экипажа, планируется строительной компанией Orbital Assembly Corporation, которой руководит Джон Блинкоу. Станция станет первым крупным проектом ОАС и первой коммерческой космической станцией с искусственной гравитацией. Отель планируется разместить на геостационарной орбите Земли.

Сейчас космический туризм для большинства людей не доступен из-за высокой стоимости [41], необходимости проведения специальной подготовки и ограниченности предложений (возможность посетить космическую станцию, но не дальше земной орбиты) [42].

Проект космического порта-отеля Spaceport Ra разработан для повышения заинтересованности и развития индустрии, решения перечисленных проблем и преодоления сложностей.

Ученый К.Э. Циолковский говорил: «Земля – колыбель человечества, но нельзя жить в колыбели вечно».

Космический порт-отель Spaceport Ra состоит из комплекса центральных осей, колец-портов прибытия и модулей (крепятся на систему каркаса), с добавлением которых комплекс может расти.

Модули и каркасы создают форму двух пересекающихся пирамид, вращающихся в противоположных направлениях, создавая искусственную гравитацию (рис. 7).

Название порта связывается с египетской мифологией: «Ра» – это «солнце». Как солнечное божество, Ра олицетворял силу солнца, но также считался самим солнцем, представляемым как великий бог в поездке на барже по небесам в течение светового дня, спускающийся в подземный мир на закате. Как бог солнца Ра, Spaceport Ra перемещается на своей ладье по небесному своду между Землей и Марсом. В начале весь комплекс находится на геостационарной орбите Земли, где он выступает как утренний бог (Ра-Хорахти), а затем перемещается на орбиту циклера Земля – Марс, где он является дневным солнцем (Амон-Ра), после он останавливается на орбите Марса, там он уже – вечернее солнце (Атум-Ра) [33].

Внизу и вверху главной оси расположены два электромагнита, каждый мощностью 1.5 Тесла. Они, как и магнитное поле Земли, перенаправляют скоростные вредоносные частицы к полюсам.

Помимо признанного терапевтического эффекта по устранению попадания чужеродных объектов в головной мозг, возникает естественное явление, связанное со сосредоточением



квантов высокой энергии и высоковольтных зарядов в весьма разряженной околосредовой среде на полюсах. На Земле такое явление называлось бы северным сиянием, но в космосе – это отрада для глаз путешественника, вглядывающегося месяцами в чёрные и пустые космические дали с многочисленными звёздами, однако бесконечно далёкими от реального достижения.

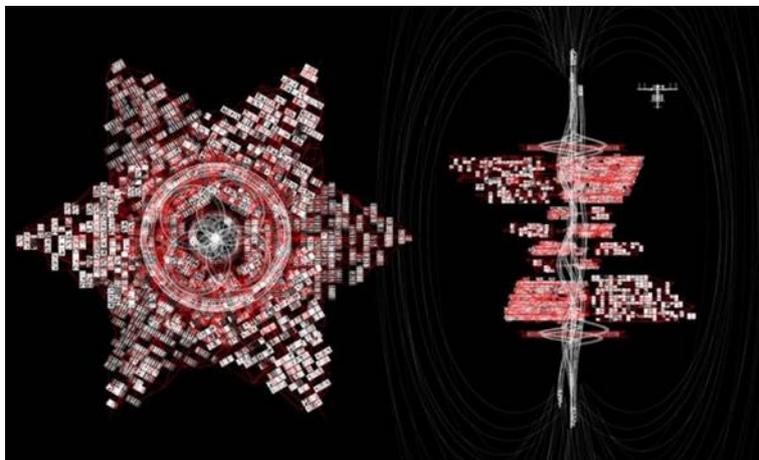


Рис. 7. Вид сверху и вид сбоку космического порта с магнитными полями в сравнении с МКС (международная космическая станция). Высота центральной главной оси – 670000 мм; диаметр центральной главной оси – 15000 мм; диаметр прилегающих осей – 10000 мм; высота вращающихся частей – 250000 мм, между разделенными частями каркаса – 25000 мм; максимальный диаметр каркаса – 5000 мм, минимальный диаметр каркаса – 2000 мм (П. Петрова)

Fig. 7. Top view and side view of the spaceport with magnetic fields compared to the ISS (International Space Station). Central main axis height – 670,000 mm; central main axis diameter – 15,000 mm; adjoining axis diameter – 10,000 mm; rotating parts height = 250,000 mm, between divided frame parts – 25,000 mm; maximum frame diameter – 5,000 mm; minimum frame diameter – 2,000 mm (P. Petrova)

На кончиках каждой конструкции центральной части находятся сборники водорода (рис. 7). Переливы вспышек и внезапно складывающихся структур света на сборниках водорода способны взбодрить усталого путника ранним, но чёрным космическим утром.

Вверху главной центральной оси находится ядерный реактор.

В верхней и нижней части расположены небольшие дополнительные парковки для шаттлов (рис. 7). Здесь парковка является запасной, особенно – для случаев, когда отправление более удобно с этой части комплекса в чрезвычайной ситуации.

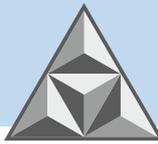
Рядом с ловушками на каркасе расположены двигатели для маневрирования, ориентированные в двух направлениях вращения, с помощью них вращающиеся части начинают и прекращают вращение.

На частях каркаса, отдаленных от центра вращения, расположены раскрывающиеся ловушки для мелкого космического мусора. Обычно они сложены и находятся внутри каркаса. Космический мусор перерабатывается и исследуется.

Изначально объект содержит минимальное количество модулей (500 штук). По мере развития технологий, популяризации космического туризма и освоения космического пространства, размер отеля будет увеличиваться путём добавления необходимого числа модулей.

Станция движется по пути полуциклера Земля – Марс, разработанного Олдрином [32].

Циклер – это траектория, регулярно встречающая два или более космических тела. После того, как орбита установлена, для перемещения между ними не требуется двигательной установки, хотя могут наблюдаться незначительные правки траектории. Использование циклеров было рассмотрено в 1969 г. Уолтером М. Холлистером, который исследовал случай цикла Земля – Венера [43]. Холлистер не имел в виду какую-то конкретную миссию, но



постулировал их использование для регулярной связи между двумя планетами и многопланетных полетов.

Марсианский год равен 1.8808 земного года; Марс совершает восемь оборотов вокруг Солнца примерно за то же время, что и Земля – 15 оборотов [44]. В 1985 г. Базз Олдрин представил работу (на основе своего раннего исследования по лунному циклеру), в которой был определен марсианский циклер, соответствующий одному синодическому периоду [45]. Объект, движущийся по циклеру Олдрина (как он теперь называется), делает единственную эксцентрическую петлю вокруг Солнца. Он путешествует с Земли на Марс за 146 сут. (4.8 мес.), следующие 16 мес. проводит за орбитой Марса и еще 146 сут. уходит от орбиты Марса обратно до первого пересечения орбиты Земли.

Комплекс с земной геостационарной орбиты разгоняется и переходит на орбиту между Землей и Марсом, на которой не нужно маневрирование, ускорение и торможение (соответственно, не затрачивается энергия и топливо), после чего замедляется вокруг Марса, вращается на его геостационарной орбите, а затем возобновляет путь на циклере.

Путь от Земли до Марса занимает примерно 5 мес. (и столько же – в обратном направлении). Также орбита циклера создает небольшую дополнительную защиту от космической радиации.

Станция собирается на геостационарной орбите Земли из сборных частей. В этой части орбиты положение станции всегда находится над одной и той же точкой на земной поверхности, что создает удобные условия для строительства и парковки станции [11]. Пассажиры и груз добираются на станцию с помощью шаттлов и космических кораблей, которые остаются припаркованными на кольцах-портах и запасных парковках на осях и затем используются для высадки на Марс.

Описанная в проекте структура способна перемещаться и далее Марса, например, до пояса Койпера, границ Солнечной системы, гелиопаузы. Здесь внешние ударные волны галактического разряженного газа со скоростями до нескольких млн. км/ч гасят потоки солнечного ветра, создающие внутреннюю «домашнюю» и уютную среду для планет нашей системы. Хотя это явление не улавливается человеческим глазом, волны столкновения межзвездных сред можно наблюдать с помощью «умных стёкол» модулей, подчёркивающих флуктуации и бурление космических сред.

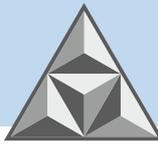
Каркас с модулями имеет форму двух пересекающихся тетраэдров, вращающихся в двух противоположных направлениях (рис. 8).

Каждый тетраэдр разбит на три части. Нижний тетраэдр, выделенный красным, вращается в направлении, указанном белой стрелкой (по часовой стрелке). Верхний тетраэдр вращается в направлении, указанной красной стрелкой (против часовой стрелки). Вращение нужно для создания искусственной гравитации за счет центробежной силы. В ближайших к оси модулях создаваемая гравитация равна лунной (около 16.6% от земной, а именно 0.166 g), а в отдаленных от центра вращения модулях – земной ($1 g = 9.80665$).

Тетраэдры равны по массе. В каждом из них масса распределена равномерно по форме. За счет вращения в двух противоположных направлениях балансируется положение комплекса. Скорость вращения равна двум оборотам в минуту.

Ось и кольца-порты не вращаются, они находятся в невесомости. У помещений отсутствует деление на пол и потолок, на всех поверхностях стен имеются поручни, помогающие в движении по помещениям. Все предметы крепятся к стенам. Используется мебель, специально разработанная для использования при отсутствии гравитации.

Главная центральная ось – прямая, в ней через каждые 100 м находятся особо защищенные зоны, в которых в случае скачков радиации можно безопасно укрыться, также в



них находятся небольшие хранилища. Такие помещения могут находиться в любой из функциональных зон. Внутри осей располагается центр управления, исследовательские лаборатории и телескопы, технические, производственные помещения, фермы, а также общественные зоны, жилые и хранилища.

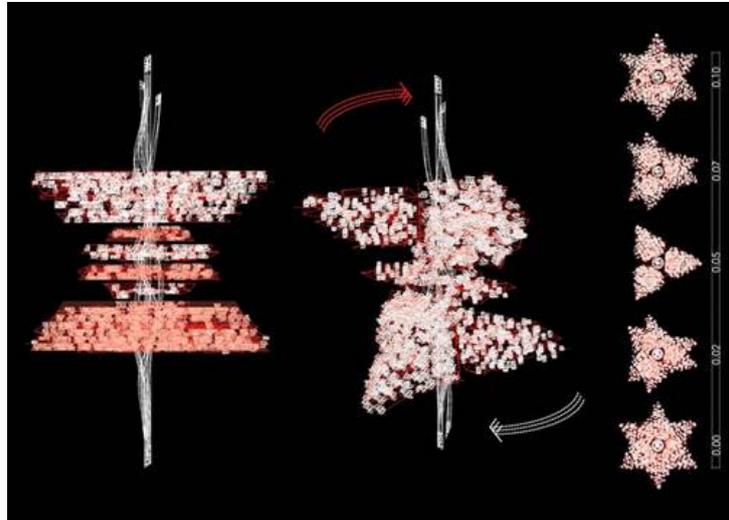


Рис. 8. Схема вращения частей с искусственной гравитацией (П. Петрова)

Fig. 8. Scheme of rotating parts with artificial gravity (P. Petrova)

Кольца-порты расположены сверху и снизу в 25 м от массы модулей (зоны прибытия). Транспорт по типу монорельса движется от главной оси по специальным переходам к внутреннему (белому) кольцу (рис. 9), в котором он разгоняется до скорости внешнего (красного) кольца вращающейся части каркаса.

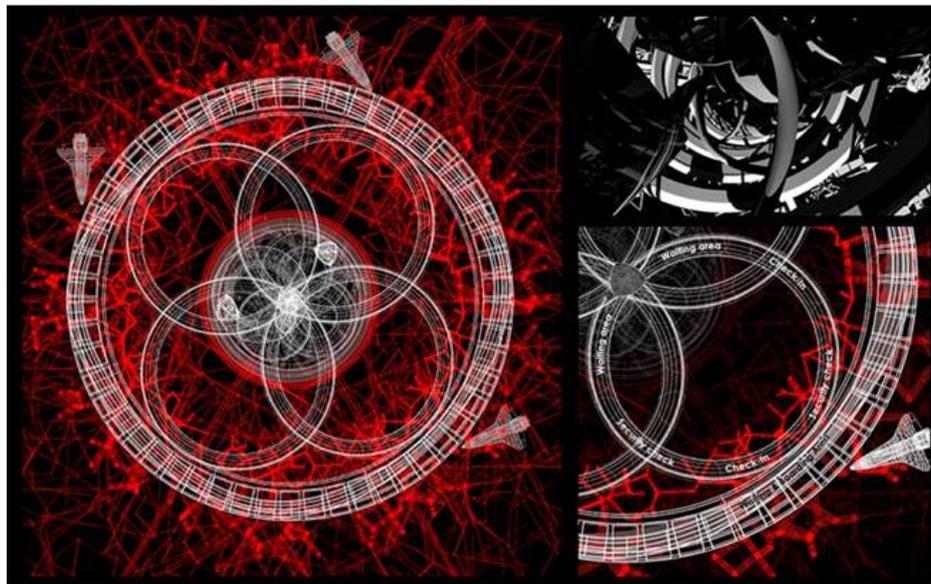


Рис. 9. Схема колец-портов с функциональным зонированием. Визуализация (П. Петрова)

Fig. 9. The scheme of the rings-ports with functional zoning. Visualization (P. Petrova)

Во внешнем кольце транспорт замедляется и перемещается в нужную часть каркаса. Диаметр верхнего красного кольца – 55 м, белого верхнего – 52 м. Минимальный диаметр красного кольца – 44 м, белого – 41 м.

Каркасные системы на кольцах-портах служат для крепления космического транспорта. Внутри такого каркаса расположены коридоры, соединяющие космический корабль с зоной прибытия в кольцах-портах.

По центру каждого кольца-порта проходит коридор с помещениями ожидания,



хранилищами, санузлами. Остальное пространство определено для свободного перемещения. Панорамное остекление формирует видовые точки по всему кольцу. В изогнутых соединениях колец-портов с осью находятся зоны регистрации, безопасности и зоны ожидания.

В 70-х годах XX столетия в космос были отправлены спутники Пионер [46] и Вояжер [47] с условно неограниченной дальностью полёта. На их борту находилась золотая пластина с укомплектованным в послание набором человеческих знаний, полученных на тот момент. Человеческое знание выражалось в различных формах – от теории простых чисел до распада атомного ядра, а также записях приветствий на 55 языках (шумерском, аккадском, хеттском, арамейском, древнегреческом, латыни, армянском, 10 южноазиатских, 4 китайских диалектах, русском, украинском и пр.). 16 ноября 1974 г. радиотелескоп Аресибо отправил послание продолжительностью 169 вземным цивилизациям с ожидаемым временем курьерской доставки около 25 000 лет. Время на размышление и ответ – ещё 25 тыс. лет. Затем предусмотрено время на обжалование.

В данном контексте на первый план выходит формообразование данного космического отеля, которое несет существенный гуманитарный аспект.

Модули, основанные на гексагональной геометрии, являются уникальными; они подобны отдельным символам и буквам (их 4500, рис. 10).

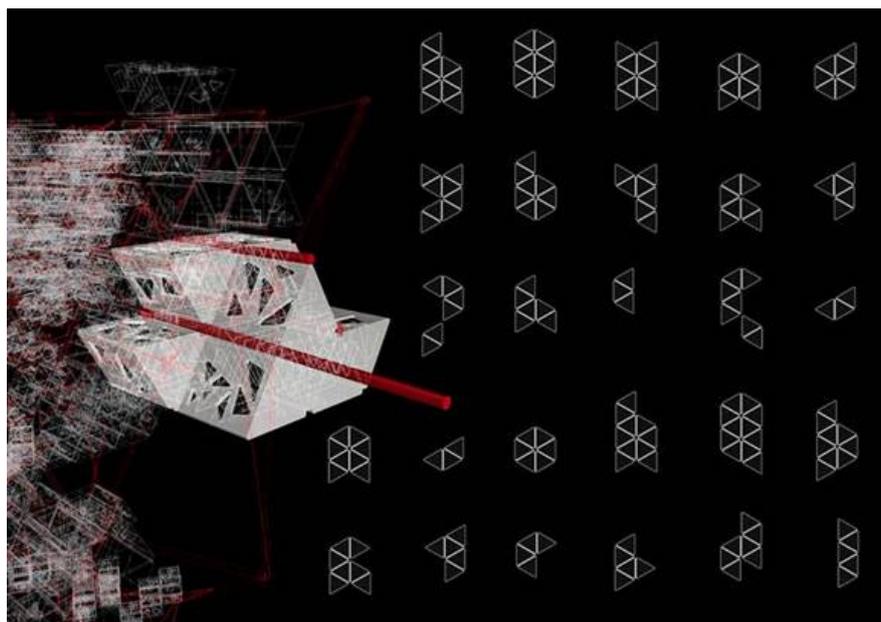


Рис. 10. Схема соединения модулей с каркасом. Схема возможных комбинаций модулей (П. Петрова)

Fig. 10. Layout of module connections to the frame. Layout of possible module combinations (P. Petrova)

Это имеет сходство с китайским алфавитом – очень расширенным, со всеми диалектами. Конструирование такого проекта, хотя и представляется весьма сложным, является тем не менее чисто инженерным заданием. Добавив в нагрузку такую цель, как иррациональное человеческое послание в темноту и непознаваемость космоса, получаем архитектурную задачу на стыке точных наук и гуманитарных ощущений. Эта неповторяемость составных частей придаёт рассматриваемой форме некоторый шум, как шум голосов многих людей – уникальных и осмысленных, но тонущих в общей массе возгласа послания. Случайным взглядом на форму здесь читаются и изгибы ветвей, и ветер в шелестящих листьях, а с другой стороны – и каллиграфические прописи.

Внутри каркаса проходят пути транспорта.

Такое послание составлено, но отправка отложена на неопределённый срок.



Модули крепятся к каркасу вдоль этажей по поверхности стен (рис. 11).

На одном из этажей каждого модуля (обычно в середине) есть переход к каркасу, куда прибывает транспорт. В каждом модуле пять этажей, на третьем – находится переход к каркасу.

На внешних стенках модулей расположено множество солнечных батарей. В некоторых углах и иногда вдоль стен расположены вставки с растениями, играющими роль в сокращении количества углекислого газа в помещениях и увеличении содержания кислорода [48]. Во всех помещениях есть доступные растения. Почти в каждом модуле (и во всех жилых и общественных модулях) один этаж выделен под сад.

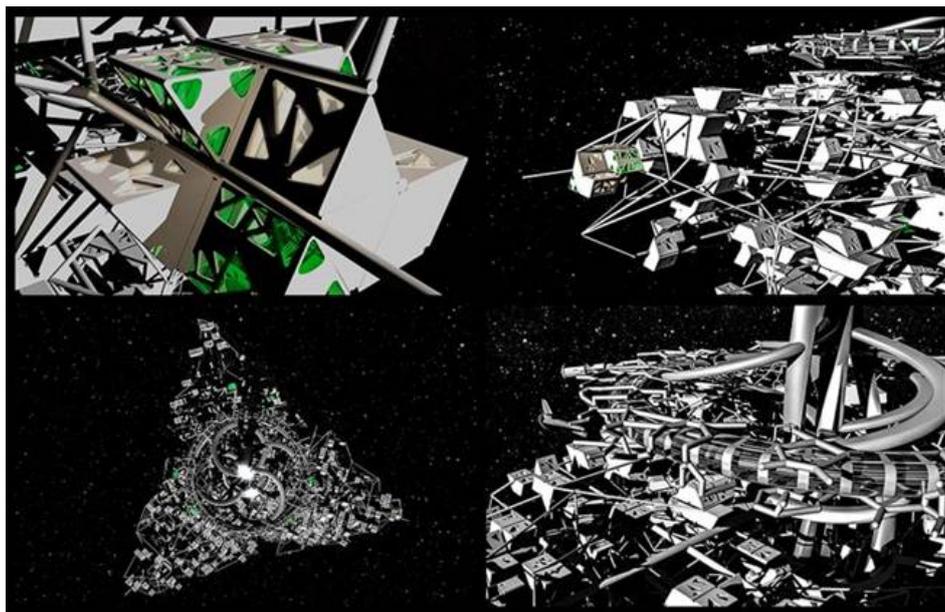


Рис. 11. Визуализации космического порта (П. Петрова, С. Расторгуев)

Fig. 11. Visualization of the space port (P. Petrova, S. Rastorguev)

На одном из этажей каждого модуля (обычно в середине) есть переход к каркасу, куда прибывает транспорт. В каждом модуле пять этажей, на третьем – находится переход к каркасу.

На внешних стенках модулей расположено множество солнечных батарей. В некоторых углах и иногда вдоль стен расположены вставки с растениями, играющими роль в сокращении количества углекислого газа в помещениях и увеличении содержания кислорода [48]. Во всех помещениях есть доступные растения. Почти в каждом модуле (и во всех жилых и общественных модулях) один этаж выделен под сад.

В жилом и некоторых общественных модулях находится тренажерный зал, в модулях с гравитацией, близкой к земной, расположены бассейны.

Множество помещений являются трансформируемыми пространствами, что облегчает длительное пребывание в них. Для реализации используются перегородки идвигающиеся стены, трансформируемая мебель.

В каждой группе модулей как минимум имеется один общественный (35% модулей). В производственных модулях (3%) находятся помещения для 3D-печати и переработки космического мусора. На фермах (5%) выращиваются фрукты и овощи, разводится рыба. Кроме них, 40% модулей – жилые, хранилища – 15%, исследовательские – 2%. При этом 35% всех модулей являются особо защищенными от космической радиации.

Проектирование объектов для космоса (особенно в условиях невесомости и полного отсутствия опоры) расширяет понимание того, чем является архитектура, заставляет



задуматься о том, что кажется привычным и обыденным. В космическом отеле имеются зоны, которые, на первый взгляд, не отличаются от отелей на планете Земля. Однако, присутствуют зоны, где всё выглядит неизведанным.

Отель собирается из стыкуемых частей на конкретном отрезке геостационарной орбиты Земли, которая располагается на высоте 36000 км над уровнем моря. Таким образом, положение станции не меняется по отношению к земной поверхности, что создает благоприятные условия для строительства, обслуживания и парковки объекта. Не подготовленным к космическим путешествиям людям будет легче адаптироваться и спокойно перенести длительный полёт.

Важной составляющей при проектировании отеля является создание психологически и физически комфортной среды, чтобы пассажиры смогли в полной мере получить удовольствие от пребывания, взглянуть на привычные вещи по-новому и переосмыслить темп обыденной жизни.

В ходе работы были исследованы и использованы принципы биомимикрии – подхода в архитектуре, использующего технологии и разработки при вдохновении природой [36]. Отвечая на неожиданные вызовы и попадая в необычные условия, архитектура порой приобретает причудливые формы. Но есть ли в эстетике архитектурного объекта какое-либо значение для стороннего наблюдателя кроме чисто гуманитарного?

Ричард Бакминстер Фуллер считал, что красота того или иного архитектурного или дизайнерского объекта – это следствие его оптимально спроектированной структуры и функциональной составляющей. Иными словами, красота объекта – это пройденный тест, результаты которого свидетельствуют, что всё спроектировано правильно, рационально и минимально достаточно.

ВЫВОДЫ

Представлены опыты по выходу архитектуры за границы традиционных компетенций. В целом затронута лишь незначительная область возможного применения архитектурных методов, в которой работает принцип бесконечно удаляющегося от исследователя горизонта познания.

Собраны данные, позволяющие проследить, как изменяется архитектура в зависимости от воздействий различных внешних факторов, мимикрируя в связи с этими воздействиями и обнаруживая своё сходство с живой природой.

Результаты исследований будем рассматривать как находку в дальнейшей практической деятельности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Расторгуев С.В. Настоящая архитектура непредсказуема // Татлин Моно. 2012, 3/31/110. С. 132–139.
2. **Rastorguev S.** Stream City Project // *l'Arca International*. 2015. 127. P. 66-69.
3. **Fauchier-Magnan, G.** (2014) La Terre est Bleue: Sea atlas of the 21th century, *Marine Nationale Française*, pp. 152-153.
4. **Rougerie, J.** (2021) *La Fondation Jacques Rougerie Database*. [online] International Database. Available at: <http://www.jacquesrougeriedatabase.com>
5. **Расторгуев С.В., Кудряшов М.Н.** Альтернатива. М.: Изд-во «Решения», 2022. 158 с.



6. **Орлова О.В., Расторгуев С.В.** Футуристические проекты для конкурса Jacques Rougerie // портал «Архитектура и энтропия»: [сайт]. 2022. URL: <https://cih.ru/fx/jr.html>
7. Challenging the Kármán line from above. NASA, Houston. We Have a Podcast // *Space Exploration*: [сайт]. 2018. URL: <https://space.stackexchange.com>
8. **Расторгуев С.В., Тихонов К.А.** Проект «Stream City» // *Архитектурный журнал ЦИХа*. 2013. URL: <https://cih.ru/j3/183.html>
9. **Ferl R.** Greenhouses for Mars // *NASA Science*: [сайт]. 2004. URL: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2004/25feb_greenhouses/
10. **Лемешко А.В.** Космический лифт «Вавилонская башня» // *Samlib*: [сайт]. 2009. URL: http://samlib.ru/editors/l/lemeshko_a_w/azz.shtml
11. **Kelso T.S.** Basics of the Geostationary Orbit // *CelesTrak*: [сайт]. 1998. URL: <http://celestrak.org/columns/v04n07/>
12. **Gosselin P.** Long Term Tide Gauge Data Show 21st Century Sea Level Rise Will Be Approximately As Much As The 20th Century // *NoTricksZone*: [сайт]. 18 April 2014. URL: <http://notrickszone.com/2014/04/18/long-term-tide-gauge-data-show-21st-century-sea-level-rise-will-be-approximately-as-much-as-the-20th-century/#sthash.v8PhgSdW.qwp9Pxfz.dpbs>
13. **Кудряшов М.Н., Киселёв А.С.** Проект «Капля в океане» // *Архитектурный журнал ЦИХа*. 2013. URL: <https://cih.ru/j3/199.html>
14. **Кудряшов М.Н., Расторгуев С.В., Сахаров Р.А.** Ковчеги / Arks // *Архитектурный журнал ЦИХа*. 2014. URL: <https://cih.ru/j3/256.html>
15. **Cook P., Webb M., Greene D.** Archigram group // *Archigram*: [сайт]. 2015. URL: <http://www.archigram.net/about.html>
16. **Katsnelson M.I.** Graphene: Carbon in Two Dimensions. New York: Cambridge University Press, 2012. 366 p.
17. **Zhu Y.** Laboratory Grows World Record Length Carbon Nanotube. Los Alamos National Laboratory // *Science Daily*. 17 September 2004.
18. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2004/09/040917091336.html>
19. **Cowing, K.** (2018) *New Study Finds Sea Level Rise Accelerating*. [online] SpaceRef. Available at: <https://spaceref.com/earth/new-study-finds-sea-level-rise-accelerating/>
20. **Кудряшов М.Н., Расторгуев С.В., Шишков А., Муродбеков Ф.** Коллекционер памяти / Collectionneur de mémoire // *Архитектурный журнал ЦИХа*. 2015. URL: <https://cih.ru/j3/303.html>
21. **Jencks C.A.** The New Paradigm in Architecture. Yale University Press, 2002. 288 p.
22. **Feldmann J., Levermann A.** Collapse of the West Antarctic Ice Sheet after local destabilization of the Amundsen Basin // *PNAS*. 2015. URL: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1512482112>
23. **Смирнова И.Е., Мезенина Л.А., Огурцов С.В., Бурькина А.В., Цветков А.А., Галицына С.А., Расторгуев С.В.** Т.Н.И.Р.С.Т. // *Архитектурный журнал ЦИХа*. 2017. URL: <https://cih.ru/j3/501.html>
24. **Lewis E.** The 8-minute travel time to Earth by sunlight hides a thousand-year journey that actually began in the core // *NASA*: [сайт]. 2007. URL: https://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt_sunlight.php



25. **Jacob A.** Light completely stopped for a record-breaking minute // *New Scientist*: [сайт]. 2013. URL: <https://www.newscientist.com/article/dn23925-light-completely-stopped-for-a-record-breaking-minute/>
26. **Yamakawa H.** Small Solar Power Sail Demonstrator "IKAROS" // *Japan Aerospace Exploration Agency*: [сайт]. 2015. URL: <https://global.jaxa.jp/projects/sas/ikaros/>
27. **Баранов В.Б.** Что такое солнечный ветер // *Астронет*: [сайт]. 2001. URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1171268>
28. **Кудряшов М.Н., Расторгуев С.В., Тер-Степанян А.Л., Аладов И.А.** Nomadic city // *Архитектурный журнал ЦИХа*. 2018. URL: <https://cih.ru/j3/633.html>
29. **Вайсберг О.Л.** Солнечный ветер // *Физика космоса: Маленькая энциклопедия*. 2-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1986. С. 636–639.
30. **Wenzhong Z.** The Theory of Super Photon and the Cosmological Insight into the Physical Origin of the Hubble Constant and the Universal Gravity // *Foundation theories of Physics*. December. 2019. DOI:10.13140/RG.2.2.13263.43680. URL: https://www.researchgate.net/publication/337683010_The_Theory_of_Super_Photon_and_the_Cosmological_Insight_into_the_Physical-Origin_of_the_Hubble_Constant_and_the_Universal_Gravity
31. **Новосёлов К.С.** Графен: материалы Флатландии // *Успехи физических наук*. 2011. Т. 181. С. 1299–1311. DOI:10.3367/UFNr.0181.201112f.1299
32. **Петрова П.В., Расторгуев С.В.** Проект «Spaceport Ra» // *Архитектурный журнал ЦИХа*. 2022. URL: <https://cih.ru/j3/a63.html>
33. Mars cycler // *Wikipedia*: [сайт]. 2022. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mars_cycler
34. **Mark J.J.** Ra (Egyptian God) // *Worldhistory*: [сайт]. 2021. URL: [https://www.worldhistory.org/Ra_\(Egyptian_God\)/](https://www.worldhistory.org/Ra_(Egyptian_God)/)
35. **Davis N.** Will you become a citizen of Asgardia, the first nation state in space? // *The guardian*: [сайт]. 2016. URL: <https://www.theguardian.com/science/2016/oct/12/will-you-become-a-citizen-of-asgardia-the-first-nation-state-in-space>
36. **Neel V.** The 11 biggest space missions of 2021 (and their chances of success). URL: <https://www.technologyreview.com/2021/01/04/1015519/the-11-biggest-space-missions-of-2021>
37. **Nixon D., Kaplinck J.** What does living in space herald for the future of architecture? // *Architectural-review*: [сайт]. 1984. URL: <https://www.architectural-review.com/essays/what-does-living-in-space-herald-for-the-future-of-architecture>
38. **Crook L.** BIG and ICON to 3D-print structure exploring "new Martian vernacular" for NASA // *Dezeen*: [сайт]. 2021. URL: <https://www.dezeen.com/2021/08/10/big-icon-3d-print-mars-dune-alpha-nasa/>
39. **Franco E.G., Kuritzky A.M., Lukacs R., Zahidi S. et. al.** Global Risks: Report 2022 // *Weforum*: [сайт]. 2022. URL: <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2022/>
40. **Abadie L.J., Cranford N., Lloyd C.W., Shelhamer M.J., Turner J.L.** NASA Human Research Program. The Human Body in Space // *Nasa*: [сайт]. 2021. URL: <https://www.nasa.gov/hrp/bodyinspace>
41. **Ravenscroft T.** Voyager Station space hotel will spin "slightly faster than the second hand of a clock" says its architect // *Dezeen*: [сайт]. 2021. URL:



- <https://www.dezeen.com/2021/03/29/space-hotel-2027-architect-tim-alatorre/>
42. **Crane K.W.** Market Analysis of a Privately Owned and Operated Space Station // *Jstor*: [сайт]. 2017. URL: <https://www.jstor.org/stable/>
 43. **Yazici A.M., Tiwari S.** Space Tourism: An Initiative Pushing Limits // *Toleho*. 2021. 3(1). P. 38-46. URL: https://www.researchgate.net/publication/350458479_Space_Tourism_An_Initiative_Pushing_Limits
 44. **Hollister W., Menning M.D.** Periodic swing-by orbits between earth and Venus // *ARC*: [сайт]. 1970. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.30134>
 45. Timekeeping on Mars // *Wikipedia*: [сайт]. 2022. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Timekeeping_on_Mars
 46. **Aldrin E.E., Friedlander A.L., Niehoff J.C., Byrnes D.V.** Cyclic Trajectory Concepts. 1986. URL: <https://engineering.purdue.edu/people/james.m.longuski.1/JournalArticles/1993/CyclerOrbitbetweenEarthandMars.pdf>
 47. Pioneer 10. // *Wikipedia*: [сайт]. 2022. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Pioneer_10
 48. Voyager program // *Wikipedia*: [сайт]. 2022. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Voyager_program
 49. **Grishin Yu. I.** Artificial Space Ecosystems // *Epizodyspace*: [сайт]. 1989. URL: <http://epizodyspace.ru/bibl/znan/1989/7/7-iss-kosm-ekos.html>

Поступила в редакцию 31.10.2022

Одобрена после рецензирования 30.11.2022

Принята к опубликованию 06.12.22

REFERENCES

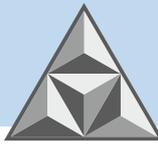
1. **Rastorguev, S.V.** (2012) Real architecture is unpredictable, *Tatlin Mono*. 3/31/110, pp. 132–139. (in Russian).
2. **Rastorguev S.** Stream City Project // *l'Arca International*. 2015. 127. P. 66-69.
3. **Fauchier-Magnan, G.** (2014) La Terre est Bleue: Sea atlas of the 21th century, *Marine Nationale Française*, pp. 152-153.
4. **Rougerie, J.** (2021) *La Fondation Jacques Rougerie Database*. [online] International Database. Available at: <http://www.jacquesrougeriedatabase.com>
5. **Rastorguev, S.V. & Kudryashov, M.N.** (2022) *Alternative*. M.: Izd-vo «Resheniya» (in Russian).
6. **Orlova, O.V. & Rastorguev, S.V.** (2022) *Futuristic projects for the competition Jacques Rougerie*. [online] Portal «Arhitektura i entropiya». Available at: <https://cih.ru/fx/jr.html> (in Russian).
7. Challenging the Kármán line from above. NASA, Houston. We Have a Podcast // *Space Exploration*: [сайт]. 2018. URL: <https://space.stackexchange.com>
8. **Rastorguev, S.V. & Tikhonov, K.A.** (2013) "Stream City" project, *Arhitekturnyj zhurnal CIHa*. [online] Available at: <https://cih.ru/j3/183.html> (in Russian).
9. **Ferl R.** Greenhouses for Mars // *NASA Science*: [сайт]. 2004. URL: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2004/25feb_greenhouses/
10. **Lemeshko, A.V.** (2009) *The Babel Tower Space Elevator*. [online] Samlib. Available at: http://samlib.ru/editors/l/lemeshko_a_w/azz.shtml (in Russian).



11. **Kelso T.S.** Basics of the Geostationary Orbit // *CelesTrak*: [сайт]. 1998. URL: <http://celestrak.org/columns/v04n07/>
12. **Gosselin P.** Long Term Tide Gauge Data Show 21st Century Sea Level Rise Will Be Approximately As Much As The 20th Century // *NoTricksZone*: [сайт]. 18 April 2014. URL: <http://notrickszone.com/2014/04/18/long-term-tide-gauge-data-show-21st-century-sea-level-rise-will-be-approximately-as-much-as-the-20th-century/#sthash.v8PhgSdW.qwp9PXfz.dpbs>
13. **Kudryashov, M.N. & Kiselyov, A.S.** (2013) The project "A drop in the ocean", *Arhitekturnyj zhurnal CIHa* [online]. Available at: <https://cih.ru/j3/199.html>. (in Russian).
14. **Kudryashov, M.N., Rastorguev, S.V. & Sakharov, R.A.** (2014) Arks, *Arhitekturnyj zhurnal CIHa*. [online] Available at: <https://cih.ru/j3/256.html> (in Russian).
15. **Cook P., Webb M., Greene D.** Archigram group // Archigram: [сайт]. 2015. URL: <http://www.archigram.net/about.html>
16. **Katsnelson M.I.** Graphene: Carbon in Two Dimensions. New York: Cambridge University Press, 2012. 366 p.
17. **Zhu Y.** Laboratory Grows World Record Length Carbon Nanotube. Los Alamos National Laboratory // *Science Daily*. 17 September 2004.
18. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2004/09/040917091336.html>
19. **Cowing, K.** (2018) *New Study Finds Sea Level Rise Accelerating*. [online] SpaceRef. Available at: <https://spaceref.com/earth/new-study-finds-sea-level-rise-accelerating/>
20. **Kudryashov, M.N., Rastorguev, S.V., Shishkov, A. & Murodbekov, F.** (2015) Memory Collector / Collectionneur de mémoire, *Arhitekturnyj zhurnal CIHa*. [online] Available at: <https://cih.ru/j3/303.html> (in Russian).
21. **Jencks C.A.** The New Paradigm in Architecture. Yale University Press, 2002. 288 p.
22. **Feldmann J., Levermann A.** Collapse of the West Antarctic Ice Sheet after local destabilization of the Amundsen Basin // *PNAS*. 2015. URL: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1512482112>
23. **Smirnova, I.E., Mezenina, L.A., Ogurtsov, S.V., Burykina, A.V., Tsvetkov, A.A., Golitsyna, S.A. & Rastorguev, S.V.** (2017) T.H.I.R.S.T., *Arhitekturnyj zhurnal CIHa*. [online] Available at: <https://cih.ru/j3/501.html> (in Russian).
24. **Lewis E.** The 8-minute travel time to Earth by sunlight hides a thousand-year journey that actually began in the core // *NASA*: [сайт]. 2007. URL: https://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/ttt_sunlight.php
25. **Jacob A.** Light completely stopped for a record-breaking minute // *New Scientist*: [сайт]. 2013. URL: <https://www.newscientist.com/article/dn23925-light-completely-stopped-for-a-record-breaking-minute/>
26. **Yamakawa H.** Small Solar Power Sail Demonstrator "IKAROS" // *Japan Aerospace Exploration Agency*: [сайт]. 2015. URL: <https://global.jaxa.jp/projects/sas/ikaros/>
27. **Baranov, V.B.** (2001) *What is the solar wind*. [online] Astronet. Available at: <http://www.astronet.ru/db/msg/1171268> (in Russian).
28. **Kudryashov, M.N., Rastorguev, S.V., Ter-Stepanyan, A.L. & Vladov, I.A.** (2018) Nomadic city, *Arhitekturnyj zhurnal CIHa*. [online] Available at: <https://cih.ru/j3/633.html> (in Russian).
29. **Weisberg O.L.** (1986) Solar wind, *Fizika kosmosa: Malen'kaya enciklopediya*. 2-e izd. M.:



- Sovetskaya enciklopediya, pp. 636–639. (in Russian).
30. **Wenzhong Z.** The Theory of Super Photon and the Cosmological Insight into the Physical Origin of the Hubble Constant and the Universal Gravity // *Foundation theories of Physics*. December. 2019. DOI:10.13140/RG.2.2.13263.43680. URL: https://www.researchgate.net/publication/337683010_The_Theory_of_Super_Photon_and_the_Cosmological_Insight_into_the_Physical-Origin_of_the_Hubble_Constant_and_the_Universal_Gravity
 31. **Novoselov, K.S.** (2011) Graphene: Flatland materials, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 181, pp. 1299–1311. DOI:10.3367/UFNr.0181.201112f.1299 (in Russian).
 32. **Petrova, P.V. & Rastorguev, S.V.** (2022) The Spaceport Ra project, *Arhitekturnyj zhurnal CIHa*. [online] Available at: <https://cih.ru/j3/a63.html> (in Russian).
 33. Mars cycler // *Wikipedia*: [сайт]. 2022. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mars_cycler
 34. **Mark J.J.** Ra (Egyptian God) // *Worldhistory*: [сайт]. 2021. URL: [https://www.worldhistory.org/Ra_\(Egyptian_God\)/](https://www.worldhistory.org/Ra_(Egyptian_God)/)
 35. **Davis N.** Will you become a citizen of Asgardia, the first nation state in space? // *The guardian*: [сайт]. 2016. URL: <https://www.theguardian.com/science/2016/oct/12/will-you-become-a-citizen-of-asgardia-the-first-nation-state-in-space>
 36. **Neel V.** The 11 biggest space missions of 2021 (and their chances of success). URL: <https://www.technologyreview.com/2021/01/04/1015519/the-11-biggest-space-missions-of-2021>
 37. **Nixon D., Kaplinck J.** What does living in space herald for the future of architecture? // *Architectural-review*: [сайт]. 1984. URL: <https://www.architectural-review.com/essays/what-does-living-in-space-herald-for-the-future-of-architecture>
 38. **Crook L.** BIG and ICON to 3D-print structure exploring "new Martian vernacular" for NASA // *Dezeen*: [сайт]. 2021. URL: <https://www.dezeen.com/2021/08/10/big-icon-3d-print-mars-dune-alpha-nasa/>
 39. **Franco E.G., Kuritzky A.M., Lukacs R., Zahidi S. et. al.** Global Risks: Report 2022 // *Weforum*: [сайт]. 2022. URL: <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2022/>
 40. **Abadie L.J., Cranford N., Lloyd C.W., Shelhamer M.J., Turner J.L.** NASA Human Research Program. The Human Body in Space // *Nasa*: [сайт]. 2021. URL: <https://www.nasa.gov/hrp/bodyinspace>
 41. **Ravenscroft T.** Voyager Station space hotel will spin "slightly faster than the second hand of a clock" says its architect // *Dezeen*: [сайт]. 2021. URL: <https://www.dezeen.com/2021/03/29/space-hotel-2027-architect-tim-alatorre/>
 42. **Crane K.W.** Market Analysis of a Privately Owned and Operated Space Station // *Jstor*: [сайт]. 2017. URL: <https://www.jstor.org/stable/>
 43. **Yazici A.M., Tiwari S.** Space Tourism: An Initiative Pushing Limits // *Toleho*. 2021. 3(1). P. 38–46. URL: https://www.researchgate.net/publication/350458479_Space_Tourism_An_Initiative_Pushing_Limits
 44. **Hollister W., Menning M.D.** Periodic swing-by orbits between earth and Venus // *ARC*: [сайт]. 1970. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.30134>
 45. Timekeeping on Mars // *Wikipedia*: [сайт]. 2022. URL:



https://en.wikipedia.org/wiki/Timekeeping_on_Mars

46. **Aldrin E.E., Friedlander A.L., Niehoff J.C., Byrnes D.V.** Cyclic Trajectory Concepts. 1986.
URL: <https://engineering.purdue.edu/people/james.m.longuski.1/JournalArticles/1993/CyclerOrbitbetweenEarthandMars.pdf>

47. Pioneer 10. // *Wikipedia*: [сайт]. 2022. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Pioneer_10

48. Voyager program // *Wikipedia*: [сайт]. 2022. URL:
https://en.wikipedia.org/wiki/Voyager_program

49. **Grishin Yu. I.** Artificial Space Ecosystems // *Epizodyspace*: [сайт]. 1989. URL:
<http://epizodyspace>

Received 31.10.2022

Approved after reviewing 30.11.2022

Accepted 06.12.22

**УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**
SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



ТОМ 3, ВЫПУСК 4, 2022 | VOL. 3, ISSUE 4

