

ISSN ONLINE 2782-1919

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



**Том 5
выпуск**

**4
2024**

**VOLUME 5
ISSUE 4**

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

Включен в апреле 2023 года в Перечень ВАК РФ

**Том 5
Выпуск 4**

Ярославль 2024

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор: С.В. ФЕДОСОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва)
Заместитель главного редактора: П.Б. РАЗГОВОРОВ (д.т.н., проф., Ярославль)
Ответственный секретарь: С.З. КАЛАЕВА (д.т.н., доцент., Ярославль)

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва),
М.О. БАКАНОВ (советник РААСН, д.т.н., доц., Иваново), 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., Москва),
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. МОИДРУС (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.И. МОХОВ (акад. РАЕН, д.т.н., проф.,
Москва), Т.А. НИЗИНА (советник РААСН, д.т.н., проф., Саранск), П.И. ПОСПЕЛОВ (д.т.н., проф., Москва),
Ю.В. ПУХАРЕНКО (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), 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 (советник РААСН, д.т.н., проф.,
Иваново), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD по техн. н., проф., Республика Сербия, Белград)

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Ярославский
государственный технический университет»

Адрес редакции: 150023, Россия, г. Ярославль, Московский проспект, 88

Телефон: +7 (4852) 44-68-13
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru
Электронный адрес: <http://comincon.ru>

Журнал издается при содействии Российской Академии архитектуры и строительных наук

Редактор: В.Б. Доброхотов
Англ. перевод: Л.А. Тюкина
Корректор: И.А. Воронов
Компьютерная верстка: А.С. Фролов

Зарегистрирован: 27 ноября 2020 (Свидетельство ЭЛ № ФС 77 - 79733)
Периодичность: 4 раза в год
Подписка и распространение: Свободный доступ

PUBLISHED BY YAROSLAVL STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Established in November 2020, published quarterly

Included in April 2023 in the List of the Higher Attestation Commission
of the Russian Federation

Volume 5

Issue 4

Yaroslavl 2024

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

«SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION»

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: S.V. FEDOSOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow)
Deputy Editor-in-Chief: P.B. RAZGOVOROV (doc.eng.sc., prof., Yaroslavl)
Executive secretary: S.Z. KALAEVA (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl)

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

A.A. ABDYKALYKOV (doc.eng.sc., prof., Kyrgyzstan, Bishkek), P.A. AKIMOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), M.O. BAKANOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., doc., Ivanovo) V.V. BELOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tver), A.M. BELOSTOTSKY (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), N.I. VATIN (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saint-Petersburg), V.M. GOTOVTSEV (doc.eng.sc., prof., Yaroslavl), A.V. ZAKHAROV (adv. RAACS, cand. arch., prof., Ivanovo), A.B. KAPRANOVA (doc. phys. and math. sc., prof., Yaroslavl), V.I. KOLCHUNOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), V.G. KOTLOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Yoshkar-Ola), N.N. KUDRYASHOV (cand. arch., prof., Yaroslavl), A.E. LEBEDEV (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl), S.N. LEONOVICH (for. acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Belarus, Minsk), V.L. MONDRUS (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), A.I. MOKHOV (acad. RANS, doc.eng.sc., prof., Moscow), T.A. NIZINA (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saransk), P.I. POSPELOV (doc.eng.sc., prof., Moscow), Yu.V. PUKHARENKO (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saint-Petersburg), S.P. RUDOBASHTA (doc.eng.sc., prof., Moscow), V.E. RUMYANTSEVA (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Ivanovo), V.P. SELYAEV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saransk), M.Yu. TARSHIS (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl), V.I. TRAVUSH (Vice Pres. RAACS, acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), A.A. TRESHCHEV (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tula), V.N. FEDOSEEV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Ivanovo), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD eng.sc., prof., Serbia, Belgrade)

Founder: Yaroslavl State Technical University
Editorial office address: 88, Moskovsky Prosp., Yaroslavl, 150023, Russia
Telephone: +7 (4852) 44-68-13
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru
Website: <http://comincon.ru>

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

Editor: V.B. Dobrokhotov
English translator: L.A. Tyukina
Proofreader: I.A. Voronov
Layout designer: A.S. Frolov

Registration: 27 November 2020 (Certificate EL No FS 77 - 79733)
Frequency: Quarterly
Subscription and distribution: Open Access

СОДЕРЖАНИЕ / TABLE OF CONTENTS

Строительные конструкции, здания и сооружения

С.А. Тумаков, Г.Н. Голубь

- 8 Расчет оснований массивных подпорных стен с применением электронных таблиц

S.A. Tumakov, G.N. Golub

Calculation of massive retaining wall foundations using spreadsheets

О.Н. Столяров, А.Е. Донцова, Г.Л. Козинец

- 21 3D печать текстиль-бетонных конструкций

O.N. Stolyarov, A.E. Dontsova, G.L. Kozinets

3D printing of textile-reinforced concrete

Строительные материалы и изделия

Т.А. Низина, А.О. Ковшов

- 35 Современное состояние научных исследований в области самовосстанавливающихся бетонов

T.A. Nizina, A.O. Kovshov

State of the art of scientific research in the field of self-healing concrete

А.В. Евсеев, Д.А. Карпилов, Я.А. Черкаев, И.А. Юраскова

- 55 Технологические особенности производства гетерогенных смесей и композитов при детерминированном формировании их однородности

A.V. Evseev, D.A. Karpilov, Ya.A. Cherkaev, I.A. Yuraskova

Technological characteristics of heterogeneous building mixtures and composites production at their homogeneous deterministic formation

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

Д.В. Герасимов, А.А. Игнатьев

- 75 Опытно-промышленная линия производства гранулированной асфальтобетонной смеси

D.V. Gerasimov, A.A. Ignatyev

Pilot production line for granulated asphalt concrete mix production

**Архитектура зданий и сооружений.
Творческие концепции архитектурной деятельности**

О.Н. Чеберева, Е.Ю. Стрельникова

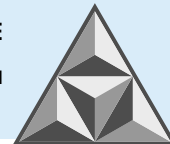
90 Опыт зарубежных исследований в области акустических архитектурных решений в школах для детей с аутизмом

O.N. Chebereva, E.Yu. Strelnikova

Case study on acoustic architectural practices in schools for children with autism

102 К юбилею Владимира Павловича Селяева

104 Информация для авторов



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.131 + 624.137 + 519.6

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-8-20

Расчет оснований массивных подпорных стен с применением электронных таблиц

С.А. Тумаков, Г.Н. Голубь

Сергей Анатольевич Тумаков, Григорий Николаевич Голубь*

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru**



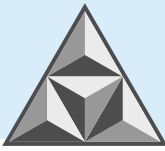
Рассмотрен вопрос расчета оснований массивных подпорных стен. Показаны конструктивные особенности различных видов подпорных сооружений. Проведен анализ существующих теоретических и практических методов расчета оснований по несущей способности. Приведены актуализированные вычислительные формулы расчета нагрузок и давлений на подпорные сооружения. Дано описание инженерного метода расчета активного давления на подпорные сооружения. Показаны алгоритмы вычислительных операций расчета оснований по первой и второй группам предельных состояний в электронной таблице. Разобраны подробности вычислительного итерационного процесса обработки табличных данных коэффициентов несущей способности грунтового основания. Отражены результаты применения электронной таблицы в расчете оснований подпорной стены. Представлены выводы по проведенному исследованию применения электронных таблиц в расчетах оснований массивных подпорных стен.

Ключевые слова: подпорные сооружения, давление грунта, предельные состояния, несущая способность основания, сдвиг по подошве, расчетное сопротивление

Для цитирования:

Тумаков С.А., Голубь Г.Н. Расчет оснований массивных подпорных стен с применением электронных таблиц // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 8-20.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-8-20



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-8-20

Calculation of massive retaining wall foundations using spreadsheets

S.A. Tumakov, G.N. Golub

Sergey Anatolyevich Tumakov, Grigory Nikolaevich Golub*

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

*sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru**



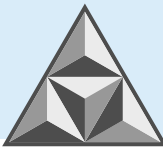
The paper deals with the calculation of the foundations of massive retaining walls. The authors show the design features of various types of retaining structures. The paper analyses the existing theoretical and practical methods for calculating the bearing capacity of foundations. The paper provides updated computational formulae for calculating loads and pressures on retaining structures. The paper describes an engineering method for calculating the active pressure on retaining structures. The paper presents algorithms of computational operations for calculating foundations for the first and the second groups of limit states in a spreadsheet. The authors describe the details of the computational iterative process of tabular data of the load-bearing capacity coefficients for the soil foundation. The paper shows the results of spreadsheet application to the calculation of retaining wall foundations. The authors draw conclusions on the conducted study of spreadsheet application in calculations of solid retaining wall foundations.

Keywords: retaining structures, soil pressure, limit states, bearing capacity of the foundation, shear on the base, calculated resistance

For citation:

Tumakov S.A., Golub G.N. Calculation of massive retaining wall foundations using spreadsheets // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 4. P. 8-20. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-8-20



ВВЕДЕНИЕ

Подпорной стеной является сооружение или конструкция, выполняемая для восприятия горизонтального давления и удержания грунта при различных высотных отметках с двух сторон стены. Подпорные стены широко применяются в гражданском и дорожном строительстве в тех случаях, когда необходимо обеспечить резкий перепад отметки планировки и удержать от обрушения находящийся за стеной массив грунта (рис. 1).



Рис. 1. Примеры подпорных сооружений

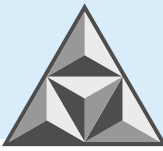
Fig. 1. Examples of retaining structures

Подпорные стены, которые удерживают грунт, сопротивляясь сдвигу и опрокидыванию за счет собственного веса, называют массивными подпорными стенами. Такие стены устраивают либо в предварительно устроенных траншеях, либо на поверхности земли (с последующей планировкой). Их изготавливают из железобетона, бетона, бутобетона и каменной кладки. Краткий исторический обзор по указанной теме приведен в [1].

Другим видом подпорных сооружений являются тонкостенные уголкового подпорные стены. Их устойчивость обеспечивается собственным весом стены и весом грунта, вовлекаемого конструкцией стены в работу. Еще один вид подпорных сооружений – гибкие, удерживающие грунт за счет заделки или введения дополнительных конструктивных элементов распорок и анкеров.

Актуальность вопроса применения и совершенствования расчета оснований подпорных стен обусловлена востребованностью данного вида сооружений. Точные модели расчета позволяют повысить надежность, а автоматизированные вычисления значительно снижают время выполнения проектных работ. Так, учет совместной работы уголкового подпорной стены с основанием показан в [2]. Определение пассивного давления грунта на подпорную стену с применением метода последовательного приближения описано в выпуске Белорусско-Российского университета [3], а общий подход к расчету грунта на подпорные стены в составе реализуемого проектного решения рассмотрен в [4].

Целью исследования является разработка и апробация инженерных методик расчета подпорных стен по актуализированным нормам проектирования с помощью электронных таблиц.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Теоретические основы и примеры расчета оснований подпорных стен подробно разобраны в [5].

Основания подпорных сооружений, в соответствии со Сводом правил СП 22.13330.2016, рассчитываются по двум группам предельных состояний.

По первой группе предельных состояний оснований Свод правил СП 43.13330.2012 требует выполнить расчет устойчивости положения стены против сдвига и расчет устойчивости грунта основания под подошвой стены. Расчетная схема подпорной стены показана на рис. 2.

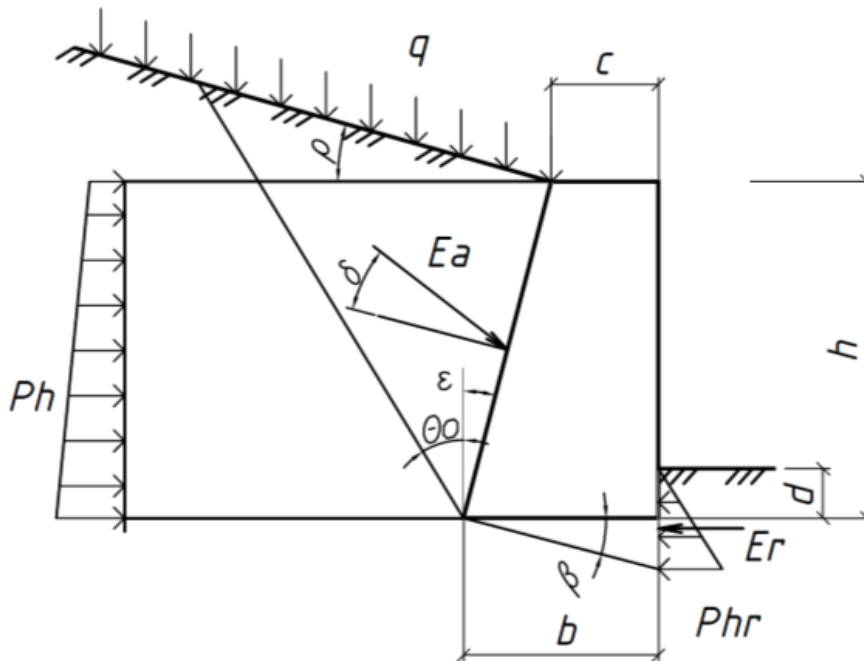


Рис. 2. Расчетная схема массивной подпорной стены

Fig. 2. Calculation diagram of a massive retaining wall

В настоящей работе рассматривается расчет оснований подпорных стен при следующих ограничениях: поверхность грунта – плоская; угол наклона поверхности грунта ρ меньше угла внутреннего трения φ ; на поверхности грунта может действовать равномерно распределенная нагрузка q ; слои грунта за подпорной стеной параллельны поверхности.

Горизонтальное активное давление на единицу высоты расчетной плоскости при $\varepsilon < (45^\circ - \varphi/2)$ на глубине y определяем исходя из гипотезы плоских поверхностей скольжения [6, 7]:

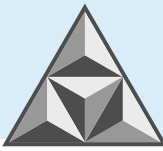
$$p_h = p_y \lambda_a - 2C\sqrt{\lambda_a}, \quad (1)$$

где λ_a вычисляем при известном угле трения грунта на контакте с расчетной плоскостью δ :

$$\lambda_a = \frac{\cos^2(\varphi - \varepsilon)}{\cos^2 \varepsilon \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta)\sin(\varphi - \rho)}{\cos(\varepsilon + \delta)\cos(\varepsilon - \rho)}} \right]^2}. \quad (2)$$

Вертикальное давление в грунте от собственного веса грунта и для расчетной плоскости на заданной глубине вычисляется по типовым формулам.

Для случая действия гусеничной нагрузки НГ-60 при движении вдоль подпорной стены, в соответствии с нормами проектирования СП 43.13330.2012, нормативное вертикальное давление на глубине определяем по формуле:



$$p_v^n = \frac{588}{a_y b_y}, \quad (3)$$

где a_y и b_y вычисляем по выражениям, приведенным на рис. 3, а расстояние a' – по формуле:

$$a' = a \frac{\operatorname{tg} \theta_o}{\operatorname{tg} \theta_o + \operatorname{tg} \varepsilon}. \quad (4)$$

Расстояние от поверхности грунта засыпки до начала эпюры интенсивности давления грунта от нагрузки y_a определяем:

$$y_a = \frac{a}{\operatorname{tg} \theta_o + \operatorname{tg} \varepsilon}. \quad (5)$$

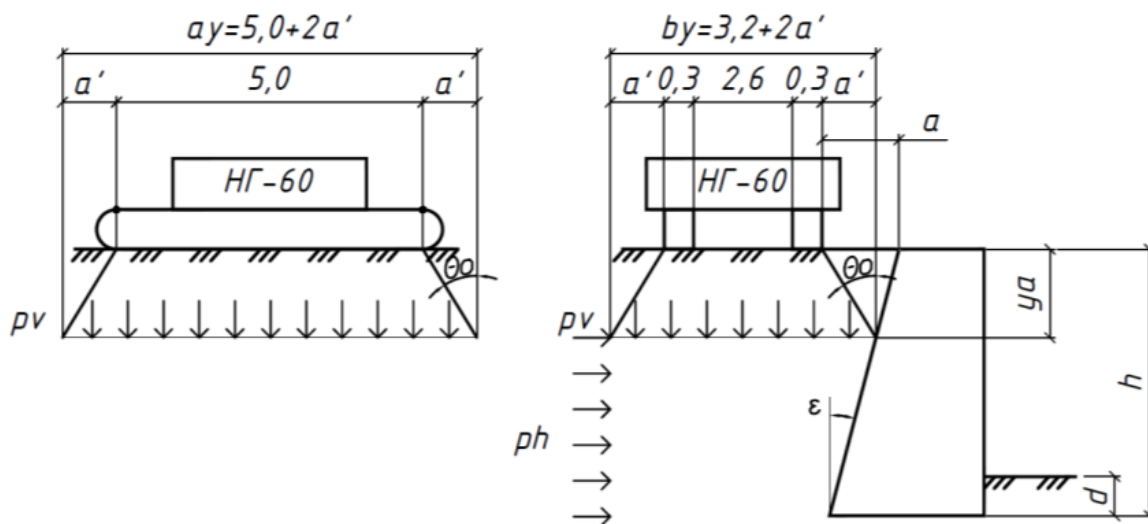


Рис. 3. Схема давления на сооружение от гусеничной нагрузки НГ-60

Fig. 3. Diagram of pressure on the structure by track load NG-60

Нормативное горизонтальное давление на подпорную стену от нагрузки НГ-60 определяем:

$$p_h^n = \lambda_a p_v^n. \quad (6)$$

Расчетные значения давления от подвижных нагрузок получаем умножением нормативных давлений на коэффициент надежности по нагрузке.

В соответствии с правилами проектирования СП 381.1325800.2018 в случае расположения нагрузки за пределами призмы активного давления грунта на подпорную стену (рис. 4), расстояние от поверхности грунта засыпки до начала эпюры интенсивности давления грунта от нагрузки y_a :

$$y_a = \frac{a}{\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} \varepsilon}. \quad (7)$$

Расстояние a' определим по формуле (8):

$$a' = a \frac{\operatorname{ctg} \varphi}{\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} \varepsilon}. \quad (8)$$

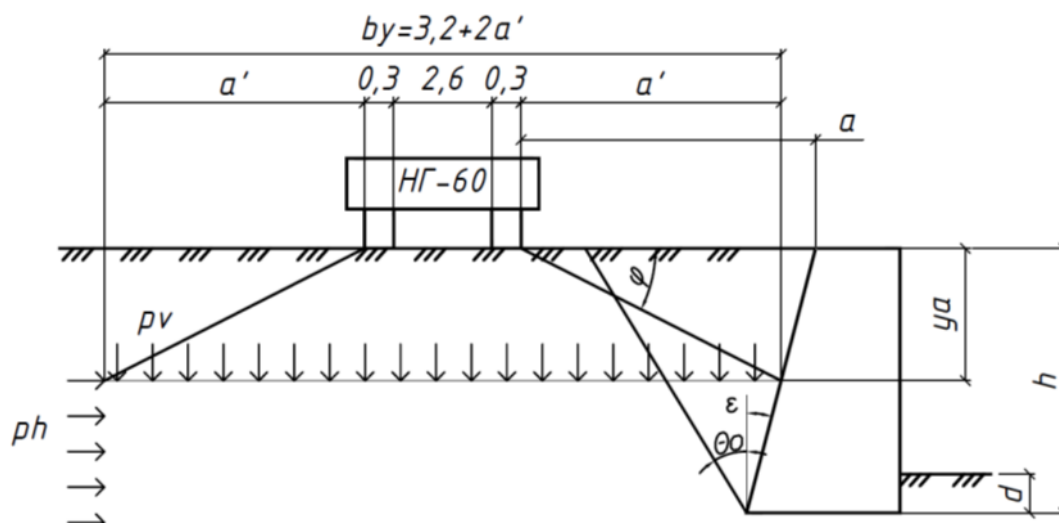
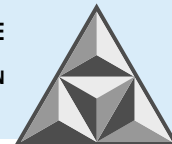


Рис. 4. Схема давления на сооружение от гусеничной нагрузки, расположенной за призмой активного давления грунта

Fig. 4. Scheme of pressure on the structure caused by the crawler load located behind the active soil pressure prism

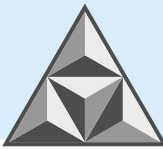
В настоящее время на рынке программного обеспечения имеется достаточное количество программ для расчета подпорных сооружений. Калькулятор подпорной стены SkyCiv выполняет расчеты основания подпорной стены по нормам ACI 318 и Еврокод 2. Программа ПоСт предназначена для выполнения расчета тонкостенных и массивных подпорных стен с учетом требований белорусских ТКП 45-5.01-67-2007 и ТКП 45-5.01-237-2011. Комплекс расчетов GEO5 позволяет решить широкий спектр задач подпорных сооружений по одной из пятидесяти настроек национальных стандартов. Продукты GIPRO, GeoWall, Фундамент, ОПОРА_X дают возможность производить расчет и проектирование подпорных сооружений по отечественным нормам.

Электронные таблицы положительно зарекомендовали себя в различных сферах вычислений [8, 9]. В профессиональной деятельности строителей их используют в расчетах напряжений анизотропных оснований, гибких фундаментов на упругом основании и прочих расчетах строительных конструкций. Так, применение электронных таблиц для определения жесткости связи под острием сваи при оценке несущей способности железобетонной плиты пола цеха на армированном грунтовом основании описано в [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Продemonстрируем выполнение расчета основания массивной подпорной стены с использованием электронной таблицы. В демонстрируемом варианте расчета наложены следующие ограничения: рассматривается основание, сложенное одним грунтом; отсутствует грунтовая вода; поверхность грунта – горизонтальная; на поверхности грунта расположена гусеничная нагрузка НГ-60; геометрия подпорной стены соответствует таковой, представленной на рис. 2.

На рис. 5 показаны поля таблицы с вводимой информацией для расчета. Обязательными исходными данными являются характеристики грунта основания и засыпки для расчета по двум группам предельных состояний и геометрические характеристики подпорной стены.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ГРУНТЫ	основание		рад			рад		габариты стены, м	
2		gamma1	18,90	gamma2		18		кН/м3	a	0,7
3		fi1, °	26	0,454 fi2, °		27	0,471		b	2,4
4		c1	8	c2		10		кПа	c	0,8
5									d	1,6
6	ГРУНТЫ	засыпка		рад			рад		h	6
7		gamma1	18	gamma2		17		кН/м3		
8		fi1, °	26	0,454 fi2, °		29	0,506			
9		c1	8	c2		9		кПа		
10	ограничение по c		4	ограничение по c		4,5		кПа		

Рис. 5. Поле таблицы для ввода исходной информации

Fig. 5. Table field for input of initial information

При вводе значений удельного сцепления грунта функцией ЕСЛИ (лог_выражение; значение_если_истина; [значение_если_ложь]) автоматически устанавливаются ограничения, которые участвуют в расчетах.

После ввода исходной информации автоматически обновляются значения ячеек вычисления δ , ε , λ и Θ .

При определении равнодействующей от давления на подпорную стену связного грунта и вычисленных по формуле (1) отрицательных давлениях в верхней части стены на участке с отрицательными давлениями принимается $p_n = 0$.

Согласно п. В.4 свода правил СП 43.13330.2012, давление на глубине h равно вычисленному, а вершина суммарной треугольной эпюры давления грунта переносится на поверхность. В ячейке С50 находится сдвигающая сила, равная сумме проекций сдвигающих сил на горизонтальную плоскость.

В такой электронной таблице предусмотрены проверки устойчивости подпорной стены против сдвига по формуле (9) для трех значений углов β : $\beta_1 = 0$ – плоский сдвиг, $\beta_2 = 0.5 \varphi_1$ и $\beta_3 = 0.5 \varphi_1$ – глубинный сдвиг.

$$F_{sa} \leq (\gamma_c / \gamma_n) F_{sr}, \quad (9)$$

где F_{sr} определяют по формуле:

$$F_{sr} = F_v \operatorname{tg}(\varphi_1 - \beta) + A c_1 + E_{hr}, \quad (10)$$

где φ_1 и c_1 – характеристики грунта основания;

A – площадь подошвы подпорной стены;

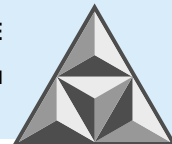
E_{hr} – пассивное давление грунта, определяемое по приложению М [8].

Приведем на рис. 6 результат расчета на плоский сдвиг для угла $\beta = 0$ и данных, приведенных на рис. 5.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
67	1 случай		бета =	0 град		0,000 рад				
68	F sr/γn	188,41	кН	<	F sa	200,02	кН		условие не выполнено	

Рис. 6. Результат расчета на плоский сдвиг

Fig. 6. Result of flat shear calculation



Условие (9) не выполняется. Для выполнения условия следует изменить один или несколько параметров габаритов подпорной стены. В частности, увеличение глубины заложения стены с 1.6 м на 2.0 м приводит к удовлетворению условия (9).

В рассматриваемом приложении электронной таблицы при выполнении условия $tg \delta < \sin \varphi_1$ (здесь δ – угол наклона равнодействующей внешней нагрузки на основание) предусмотрена проверка выполнения условия расчета основания по несущей способности. Вертикальная сила предельного сопротивления основания подпорной стены вычисляется по формуле из СП 22.13330.2016:

$$N_u = b'l'(N_\gamma \xi_\gamma b' \gamma_1 + N_q \xi_q \gamma'_1 d + N_c \xi_c c_1). \tag{11}$$

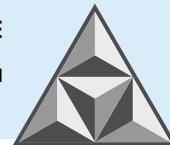
В настоящее время вопрос определения коэффициентов несущей способности основания N_γ , N_q и N_c является решаемым. Наиболее удачно данная тема освещена в работе М.В. Малышева [11]. Также заслуживают внимания эмпирические формулы для вычисления коэффициентов [12], предложенные А.М. Карауловым. Учет длительности нагружения основания представлен в [13]. Численные методы расчета несущей способности описаны в работе Ван Баарса [14]. Поскольку предлагаемый алгоритм расчета оснований подпорной стены носит прикладной характер, нами при вычислении вертикальной силы предельного сопротивления основания использованы таблицы коэффициентов несущей способности основания N_γ , N_q и N_c по СП 22.13330.2016. Для этого на лист 3 из СП 22.13330.2016 занесены данные по размерам коэффициентов N_γ , N_q и N_c в зависимости от табличных значений δ и φ_1 . Поиск этих коэффициентов, с опорой на фактические размеры δ и φ_1 , осуществляется двойной интерполяцией. Сначала в столбце U вычисляют коэффициенты при фактическом δ и табличных φ , затем путем второй интерполяции столбца U определяют коэффициенты исходя из фактического φ . Интерполирование выполняется при помощи стандартной функции электронной таблицы ПРЕДСКАЗ; поиск диапазона чисел производится с использованием функций ПОИСКПОЗ и СМЕЩ.

Пример вычисления коэффициента N_γ для $\delta = 19.07^\circ$ и $\varphi_1 = 26^\circ$ приведен на рис. 7.

ГРАДУСЫ		=ПРЕДСКАЗ(В16;СМЕЩ(У4:U13;ПОИСКПОЗ(В16;А4:А13;1)-1;0;2);СМЕЩ(А4:А13;ПОИСКПОЗ(В16;А4:А13;1)-1;0;2))																			
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1	N _γ																				
2	δ																				
3	φ	0	4,9	5	9,8	10	14,5	15	18,9	20	22,9	25	26,5	29,8	30	32,7	35	35,2	40	45	чек
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	5	0,2	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	10	0,6	0,42	0,42	0,12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	15	1,35	1,03	1,02	0,63	0,61	0,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	20	2,88	2,19	2,18	1,50	1,47	0,89	0,82	0,39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,33
9	25	5,87	4,53	4,5	3,23	3,18	2,12	2	1,26	1,05	0,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,23
10	30	12,39	9,49	9,43	6,83	6,72	4,67	4,44	3,03	2,63	1,85	1,29	0,95	0	0	0	0	0	0	0	2,97
11	35	27,5	20,72	20,58	14,87	14,63	10,27	9,79	6,90	6,08	4,51	3,38	2,82	1,60	0	0	0	0	0	0	6,77
12	40	66,01	48,65	48,3	34,42	33,84	23,69	22,56	16,02	14,2	10,75	8,26	7,07	4,46	4,3	2,79	0	0	0	0	15,7
13	45	177,6	127,12	126,1	87,80	86,2	59,47	56,5	37,59	32,3	25,57	20,7	17,89	11,64	11,26	8,12	5,45	5,22	0	0	36,8
14																					
15	δ	19,07																			
16	φ	26																			
17	N _γ	=ПРЕДСКАЗ(В16;СМЕЩ(У4:U13;ПОИСКПОЗ(В16;А4:А13;1)-1;0;2);СМЕЩ(А4:А13;ПОИСКПОЗ(В16;А4:А13;1)-1;0;2))																			

Рис. 7. Вычисление коэффициента N_γ по таблице данных
 Fig. 7. Calculation of the N_γ coefficient using the data table

На рис. 8 представлен результат расчета основания подпорной стены по несущей способности. Характеристики грунтов взяты, как это показано на рис. 7. Габариты подпорной стены: $a = 0.7$ м, $b = 3.3$ м, $c = 2.3$ м, $d = 1.6$ м, $h = 6.0$ м.



	A	B	C	D	E	F	G
128	b'	2,07 м					
129							
130	tg δ1	0,345655	<	sin φ1	0,438371		
131							
132	δ1	0,332799	рад	19,06799	градусы		
133			φ1	26	градусы		
134							
135	лист 3	N γ	1,575143	N q	5,576984	N c	9,203425
136							
137	N u/γп	548,02	кН	>	F v =	539,03	кН
138				условие выполнено			

Рис. 8. Результат расчета основания подпорной стены по несущей способности

Fig. 8. Result of the load-bearing capacity calculation of the retaining wall foundation

По второй группе предельных состояний в электронной таблице реализованы алгоритм вычисления среднего и максимального давления по подошве подпорной стены и проверка выполнения условий $p \leq R$ и $p_{max} \leq 1.2R$. Расчетное сопротивление R находят согласно своду правил СП 22.13330.2016, давления по подошве фундамента вычисляют в зависимости от размера эксцентриситета равнодействующей вертикальной нагрузки на основание.

ВЫВОДЫ

Для расчета оснований массивных подпорных стен по двум группам предельных состояний предложена электронная таблица, содержащая элементы автоматических вычислений по актуализированным нормам проектирования. Предлагаемая таблица в настоящее время используется в образовательном процессе Ярославского государственного технического университета (Россия) для студентов, обучающихся по направлению «Строительство». Результаты расчетов неоднократно проверены на соответствие результатов, полученных альтернативными способами.

Разработанную электронную таблицу рекомендуется применять при проведении практических расчетов оснований подпорных стен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Черепанова Д.А.** Особенности применения современных габионных конструкций для повышения устойчивости грунтовых откосов // *Символ науки: межд. науч. журнал*. 2023. № 1 (1). С. 76-78.
2. **Кикава Т.Р., Мегрелишвили З.Н.** Некоторые вопросы расчета подпорной стенки // *Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности: сб. науч. тр. по мат. Межд. науч.-практ. конф.* Тамбов, 2013. С. 66-69.
3. **Кулабухов А.В., Смоляр А.П.** К вопросу о расчете пассивного давления грунта на подпорную стенку // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Мат. Международной науч.-техн. конф.* Могилев, 2024. С. 202.
4. **Поляков А.А.** Общий подход к расчету давления грунта на подпорные стенки // *Вестник Коломенского ин-та (филиала) Московского политех. ун-та. Сер.: Естественные и технические науки*. 2018. № 11. С. 187-191.
5. **Волосухин В.А., Дыба В.П., Евтушенко С.И.** Расчет и проектирование подпорных стен гидротехнических сооружений. М.: Изд. Ассоциации строит. вузов, 2015. 96 с.
6. **Шапиро Д.М.** Инженерный метод расчета давления грунта на подпорные стенки // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2017. Т. 8. № 3. С. 51-61. DOI 10.15593/2224-9826/2017.3.06.



7. **Шапиро Д.М.** Практический метод расчета оснований и грунтовых сооружений в нелинейной постановке // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1985. № 5. С. 19-21.
8. **Дуркина Н.В.** О применении электронных таблиц Microsoft Excel в расчетах различных строительных конструкций // *Научные чтения: Сб. мат. науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лес. ин-та по итогам науч.-исслед. работы в 2008 г.* Сыктывкар, 2009. С. 564-566.
9. **Демидова О.Л., Малинина Н.Л.** Подготовка студентов технических специальностей МАИ по дисциплине «Численные методы» с применением электронных таблиц Excel // *Мат. XIX Межд. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015)*. Алушта, 2015. С. 718-719.
10. **Тумаков С.А., Голубь Г.Н.** Оценка несущей способности железобетонной плиты пола цеха на армированном грунтовом основании // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4. № 4. С. 8-19.
11. **Мальшев М.В.** Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. М.: Стройиздат, 1994. 226 с.
12. **Караулов А.М.** Несущая способность оснований осесимметричных фундаментов зданий и сооружений // Спец. 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения»: дисс... доктора техн. наук. Новосибирск, 2008. 291 с.
13. **Мирсаяпов И.Т., Королева И.В.** Расчет несущей способности и осадок оснований фундаментов при длительном действии статической нагрузки // *Изв. Казанского гос. арх.-строит. ун-та*. 2011. № 3 (17). С. 71-78.
14. **Van Baars S.** Numerical check of the Meyerhof bearing capacity equation for shallow foundations // *Innovative Infrastructure Solutions*, 2017. № 3 (1). P. 1-13. DOI: 10.1007/s41062-017-0116-1.

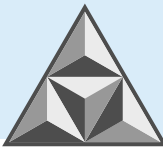
Поступила в редакцию 16.10.2024

Одобрена после рецензирования 19.11.2024

Принята к опубликованию 03.12.2024

REFERENCES

1. **Cherepanova, D.A.** (2023), "Features of application of modern gabion structures for increasing the stability of soil slopes", *Simvol nauki: mezhd. nauch. zhurnal [Symbol of Science: Interd. scientific journal]*, vol. 1, no. 1, pp. 76-78 (in Russian).
2. **Kikava, T.R. and Megrelishvili, Z.N.** (2013), "Some issues of calculation of retaining wall", *Aktual'nye voprosy v nauchnoi rabote i obrazovatel'noi deyatel'nosti: sbornik nauchnykh trudov po mat. Mezhd. nauchno-prakt. konf [Actual issues in scientific work and educational activity: collection of scientific papers on mat. Inter. Sci. Pract. Conf.]*, Tambov, Russia, pp. 66-69 (in Russian).
3. **Kulabukhov, A.V. and Smolyar, A.P.** (2024), "On the issue of calculation of passive soil pressure on the retaining wall", *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: Mat. Mezhd. nauch.-tekhn. konf. [Materials, equipment and resource-saving technologies: Proc. of the International Scientific and Technical Conference]*, Mogilev, Belarus, p. 202 (in Russian).
4. **Polyakov, A.A.** (2018), "General approach to the calculation of soil pressure on retaining walls", *Vestnik Kolomenskogo in-ta (filiala) Moskovskogo politekh. un-ta. Ser.: Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Bulletin of Kolomna Institute (branch) of Moscow Polytechnic Univ. of Science and Technology. Ser.: Natural and technical sciences]*, no. 11, pp. 187-191 (in Russian).
5. **Volosukhin, V.A., Dyba, V.P. and Evtushenko, S.I.** (2015), "Расчет и проектирование подпорных стен гидротехнических сооружений" [Calculation and design of retaining walls of hydraulic structures], Izd. ASV, Moscow, Russia (in Russian).
6. **Shapiro, D.M.** (2017), 'Engineering method for calculating soil pressure on retaining walls', *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture]*, vol. 8, no 3, pp. 51-61. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.06 (in Russian).
7. **Shapiro, D.M.** (1985), 'A practical method for calculating foundations and soil structures in a nonlinear setting', *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Foundations, Foundations and Soil Mechanics]*, no. 5, pp. 19-21 (in Russian).

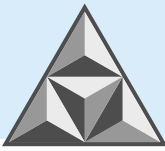


8. **Durkina, N.V.** (2009), 'About application of Microsoft Excel spreadsheets in calculations of various building constructions', *Nauchnye chteniya: Sb. mat. nauch.-prakt. konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava Syktyvkar'skogo les. in-ta po itogam nauch.-issled. raboty v 2008 g. [Scientific readings: Collection of materials of scientific and practical conference of the teaching staff of Syktyvkar Forest Institute on the results of scientific and research work in 2008]*, Syktyvkar, Russia, pp. 564-566 (in Russian).
9. **Demidova, O.L. and Malinina, N.L.** (2015), 'Preparation of students of technical specialities of MAI on the discipline "Numerical Methods" with the use of Excel spreadsheets', *Mat. XIX Mezhd. konf. po vychislitel'noi mekhanike i sovremennym prikladnym programmnyim sistemam (VMSPPS'2015) [Mat. XIX Inter. Conf. on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (VMSPPS'2015)]*, Alushta, Russia, pp. 718-719 (in Russian).
10. **Tumakov, S.A. and Golub, G.N.** (2023), 'Assessment of the load-bearing capacity of the existing reinforced concrete floor slab of the workshop on a reinforced soil foundation', *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 4, no. 4, pp. 8-19 (in Russian).
11. **Malyshev, M.V.** (1994), *Prochnost' gruntov i ustojchivost' osnovanij sooruzhenij [Strength of Soils and Stability of Foundations of Structures]*, Stroyizdat, Moscow, Russia (in Russian).
12. **Karaulov, A.M.** (2008), "Bearing capacity of axisymmetric foundations of buildings and structures", Abstract of D. Sc. dissertation, spec. 05.23.02 "Bases and Foundations, Underground Structures", Novosibirsk, Russia (in Russian).
13. **Mirsayapov, I.T. and Koroleva, I.V.** (2011), Calculation of bearing capacity and settlements of foundations under the long-term action of static load, *Izv. Kazanskogo gos. arkh.-stroit. un-ta [Proc. of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]*, vol. 3, no. 17, pp. 71-78 (in Russian).
14. **Van Baars, S.** (2017), Numerical check of the Meyerhof bearing capacity equation for shallow foundations, *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 3, no. 1, pp. 1-13. DOI: 10.1007/s41062-017-0116-1.

Received 16.10.2024

Approved 19.11.2024

Accepted 03.12.2024



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.97

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-21-34

3D печать текстиль-бетонных конструкций

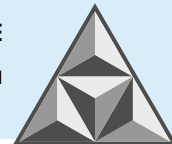
О.Н. Столяров, А.Е. Донцова, Г.Л. Козинец

Олег Николаевич Столяров, Анна Евгеньевна Донцова*, Галина Леонидовна Козинец

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

stolyarov_on@spbstu.ru, anne.dontsoova@ya.ru, kozinets_gl@spbstu.ru*



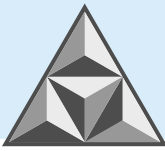
Предложено технологическое решение по использованию текстильного армирования при возведении стеновых конструкций с применением аддитивных технологий. Данное решение подразумевает предварительное изготовление армирующих каркасов из текстильной армирующей сетки со встроенным слоем внутрисконструкционной теплоизоляции. Используется щелочестойкая основовязаная сетка из стекловолокна. Обработка армирующих сеток жидким стеклом повышает прочностные характеристики результирующего композита – текстильно-армированного бетона. Подготовленные каркасы раскладываются на печатаемой конструкции по мере движения сопла строительного 3D принтера. По предложенной технологии изготовлены опытные прототипы элементов стеновых конструкций. Применение армирующей сетки позволяет уменьшить затраты ручного труда на связь внешней и внутренней поверхностей печатаемой стены, дает возможность встраивать в возводимую стену теплоизолирующий материал в ходе печати. Также снижаются требования к бетонной смеси, поскольку армирующая сетка способна играть роль опалубки и предотвращать растекание при печати.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивные технологии, мелкозернистый бетон, несъемная опалубка, текстильно-армированный бетон

Для цитирования:

Столяров О.Н., Донцова А.Е., Козинец Г.Л. 3D печать текстиль-бетонных конструкций // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 21-34.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-21-34



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-21-34

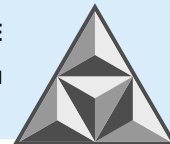
3D printing of textile-reinforced concrete

O.N. Stolyarov, A.E. Dontsova, G.L. Kozinets

Oleg Nikolaevich Stolyarov, Anna Evgenyevna Dontsova*, Galina Leonidovna Kozinets

Peter The Great Saint-Petersburg Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russian Federation

stolyarov_on@spbstu.ru, anne.dontsoova@ya.ru, kozinets_gl@spbstu.ru*



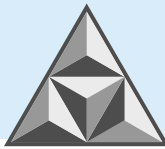
A paper proposes the technological solution for the use of textile reinforcement with the additive technologies in the construction. This solution involves the preliminary manufacture of reinforcing frames. Those are the textile reinforcing net made of an alkali-resistant basic knitted fiberglass with an integrated layer of wall insulation. The treatment of reinforcing net with liquid glass increases the strength characteristics of the resulting composite – textile reinforced concrete. The technology consists in spreading of the prepared frames on the printed structure as a nozzle of 3D printer moves. The use of reinforcing net allows ones to reduce the manual labour costs for the connection of the external and internal surfaces of the printed wall, makes it possible to embed heat-insulating material into the wall under construction in the printing process. Moreover, the technology reduces the requirements for the concrete mix, since the reinforcing net acts as a formwork and prevents spreading during printing.

Keywords: 3D printing, additive technologies, fine-grained concrete, permanent formwork, textile reinforced concrete

For citation:

Stolyarov O.N., Dontsova A.E., Kozinets G.L 3D printing of textile-reinforced concrete // *Smart Composites in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 4. P. 21-34. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-21-34



ВВЕДЕНИЕ

С развитием аддитивных технологий значительно расширился список областей, в которых сокращаются объемы ручного труда. Одним из примеров является технология 3D печати бетона (3DPC – 3D printed concrete). Применение строительного 3D принтера позволяет отказаться от использования опалубки при возведении сооружений. Актуальным вопросом в рамках технологии строительной 3D печати является армирование возводимых конструкций. Армирование текстильными материалами довольно широко распространено при бетонировании, однако в строительной 3D печати представлено лишь отдельными примерами армирования ровингами (нитьями). В настоящей работе разрабатывается технологическое решение по использованию встроенного армирующего каркаса из текстильной сетки для 3D бетонных конструкций. После укладки пространственных армирующих каркасов предполагается заполнение их бетонной смесью, консолидирующей слои конструкции в единое целое.

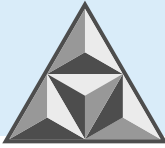
Технологии 3D печати осваиваются и применяются во многих областях и с различными печатными материалами – металлами [1, 2], полимерами [3, 4], биоматериалами [5] и бетоном [6]. Печать металлами и пластиками технологически сходна: материал разогревается до температуры плавления и через сопло подается по заданной траектории. Эта технология освоена в промышленных масштабах и доступна даже обывателям. Строительная 3D печать несколько иная, поскольку бетонная смесь существенно отличается по свойствам от термопластичных материалов. Ввиду этого строительные аддитивные технологии еще должны пройти длительный путь технологического развития.

Основной процесс в любом случае можно описать этапами: проектирование → подготовка модели к печати → загрузка задания на принтер → конструкция. Технологически важным является фактор масштаба. При печати металлами и пластиками габариты печати ограничены размерами стола 3D принтера. При печати строительных конструкций пространство ограничивается размерами конструкции самого 3D принтера и возможностями подачи бетонной смеси. Обычно изготавливаемые строительные конструкции на один-два порядка крупнее изделий, создаваемых классическими 3D принтерами. При этом применение 3D печати в строительстве позволяет повысить энергоэффективность возводимых конструкций за счет изменения внутренней конфигурации стен и заполнения полостей теплоизоляционными материалами [7, 8]. Известны два вида технологий строительной 3D печати: печать частицами с выборочной активацией связующего [9-11] и экструзия бетона [12, 13].

Первая технология подразумевает возведение слоев строительной конструкции из цементно-песчаной смеси и внесение добавок с последующим орошением водой для активации цемента. Форма бетонной конструкции регулируется с помощью изменения мест орошения. Эта технология успешно освоена для заводского изготовления бетонных изделий, однако не подходит для возведения конструкций на строительной площадке с большим числом внешних переменных факторов [14].

Вторая технология подразумевает нанесение бетонной смеси через сопло на основание – плиту или ленточный фундамент и последующее наращивание слоев. Для этого используют строительный 3D принтер, который состоит из внешней рамы, позволяющей печатающей головке перемещаться по площадке, бункеров для хранения сухих составляющих или готовых сухих смесей, системы приготовления и подачи бетонной смеси к печатающей головке, насоса для подачи смеси.

Процесс печати определяется программным кодом или регулируется через панель управления принтером. В ходе печати непрерывно заготавливается бетонная смесь, которая



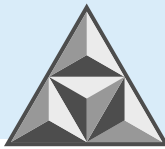
подается в зону печати. Обычно возводимые стеновые конструкции содержат два основных слоя – внешний и внутренний. В межслойном пространстве целесообразно устанавливать ребра жесткости для придания конструкции большей устойчивости. Также это пространство может быть заполнено теплоизоляционным материалом для повышения сопротивления стены теплопередаче или содержать встроенные инженерные системы для водо- и электроснабжения. Выводы инженерных систем из стены в здание закладываются гильзами во время печати или делаются по месту в готовой стене [15]. Закладка коммуникаций параллельно с процессом печати обеспечивает снижение трудозатрат. Дверные и оконные проемы в ходе печати остаются незаполненными, а над проемами монтируют закладные для формирования верхней грани проема.

Строительная 3D печать осуществляется послойным нанесением бетонной смеси на основание и нижележащие слои. Высота напечатанных стен может достигать 3 м; стандартная толщина слоя составляет 20 мм. Бетонная смесь подается через круглое или квадратное сопло. Скорость движения сопла, его размер, форма и расстояние от него до конструкции оказывают наибольшее влияние на характеристики готовой конструкции [16]. Выравнивание стены выполняется сгребающей насадкой, установленной в задней части сопла. Внешние поверхности напечатанных стен могут быть отделаны финишными материалами. Важным параметром при строительной печати является скорость схватывания слоев: соединение между слоями не должно быть холодным швом бетонирования, но и деформация нижнего слоя под весом верхнего недопустима. Это условие выполняется при наложении слоев в интервале 5-10 мин [17]. Скорость схватывания варьируется в зависимости от погодных условий и может быть отрегулирована путем введения добавок к бетонной смеси.

Хотя применение аддитивных технологий в строительстве является перспективным направлением, на сегодняшний день строительная 3D печать окончательно не освоена. Проблемы связаны с необходимостью динамично регулировать скорость схватывания смеси для достижения требуемой межслойной адгезии и конструктивной прочности элемента. Наличие внешних климатических факторов также осложняет печать по сравнению с традиционной 3D печатью, осуществляемой в условиях статичного внутреннего микроклимата.

На практике предлагаются следующие решения перечисленных проблем: использование быстросхватывающихся строительных смесей [17] и дисперсного армирования волокнами [18]. Дисперсное армирование хорошо показало себя при печати пластиками [19] и широко используется в традиционном бетонировании. Для дисперсного армирования бетона обычно используют фибру (как синтетическую, так и неорганического происхождения).

Отметим, что в традиционных бетонных работах широко используют несъемную опалубку [20]. Ее применение позволяет уменьшить число технологических операций и, как следствие, повысить скорость строительства. На рынке представлен широкий спектр разновидностей несъемной опалубки, в частности, пенопластовые блоки с пустотами, которые заполняют бетоном. Такие блоки применяет компания Vatiprint 3D: опалубочные блоки вручную устанавливают на подготовленные пазы; после бетонирования конструкцию стены можно описать как «бетон–утеплитель–бетон». В строительной 3D печати использование подобной технологии допускается, с обязательным учетом высоты экструдированного бетонного слоя. Габариты панелей несъемной опалубки должны быть пропорциональны толщине слоев печати. Прочие виды несъемной опалубки принципиально близки, различаясь при этом типом панелей и наличием встроенной арматурной сетки. Также существует сетчатая несъемная опалубка, позволяющая сформировать криволинейные конструкции [20]. Деформируемость такой опалубки делает ее схожей с опалубкой, предлагаемой в настоящей работе.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приведенный выше анализ литературных источников дает возможность представить подходящую опалубочную конструкцию для 3D печати бетоном. Это должна быть многослойная система, подразумевающая наличие слоев бетона снаружи и теплоизоляции внутри стены. Удобной формой теплоизоляционного материала являются готовые плиты или бруски. В существующих технологиях 3D печати также используется указанный формат теплоизоляции, однако закладка изолирующего материала осуществляется вручную, что повышает трудозатраты на проведение процесса. Другая опция – введение во внутрстенное пространство теплоизолирующих гранул или распыление пенного утеплителя, недостатком чего являются узкая распространенность и высокая стоимость, неприемлемые для массового производства. Использование теплоизолирующих плит превращает технологию в универсальную. Предлагаемая конструкция стены представлена на рис 1.

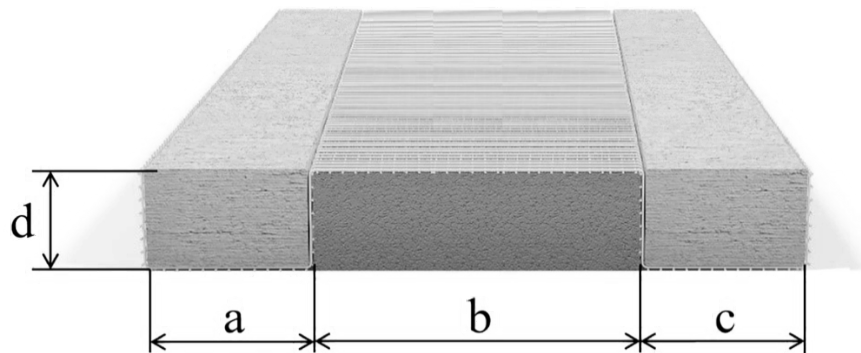


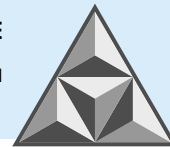
Рис. 1. Модель элемента 3D печатной конструкции

Fig. 1. A model of the 3D-printed wall element

Габариты внутренней (a) и наружной (c) стен и теплоизоляционного материала (b) определяются исходя из требуемой несущей способности стены и ее сопротивления теплопередаче, тогда как высота слоя (d) – возможностями строительного 3D принтера. Как уже упомянуто ранее, стандартная толщина слоя при 3D печати бетоном составляет 20 мм. Увеличение этой толщины приводит к повышению нагрузки на нижележащие слои и их деформации. Использование предлагаемой конструкции опалубки позволяет варьировать толщину наносимого слоя бетона, поскольку бортики армирующего каркаса будут предотвращать расползание слоев.

Связь внутреннего и внешнего слоя стены осуществляется через армирующий каркас из текстильной сетки. Концептуально это похоже на металлические скобы, вставляемые при 3D печати вручную для связывания внешнего и внутреннего слоев, однако со снижением трудозатрат. Теплопроводность армирующей сетки ($0.036 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$) значительно ниже теплопроводности стали, что предотвращает образование мостиков холода в стене.

Для возведения такой стеновой конструкции опалубочный каркас должен быть пространственно-жестким. Он должен включать в себя теплоизолирующий брусок и полые части для последующего заполнения их бетоном. Текстильной сетке можно придать объемную форму и пространственную жесткость за счет нанесения покрытия в деформированном состоянии. Тогда при строительной 3D печати с использованием таких армирующих каркасов технология будет включать этапы: укладка армирующих каркасов по траектории стены; заполнение полостей бетонной смесью. Длину элемента опалубки рационально подбирать в соответствии с типовыми длинами теплоизолирующих плитных материалов. Применение такой опалубки позволит заполнить большой слой возводимой конструкции за один проход



экструдера. После нанесения бетонной смеси может быть уложен следующий слой опалубки. Трехмерная модель стеновой конструкции, которую можно напечатать на 3D принтере с применением таких армирующих каркасов, представлена на рис. 2.

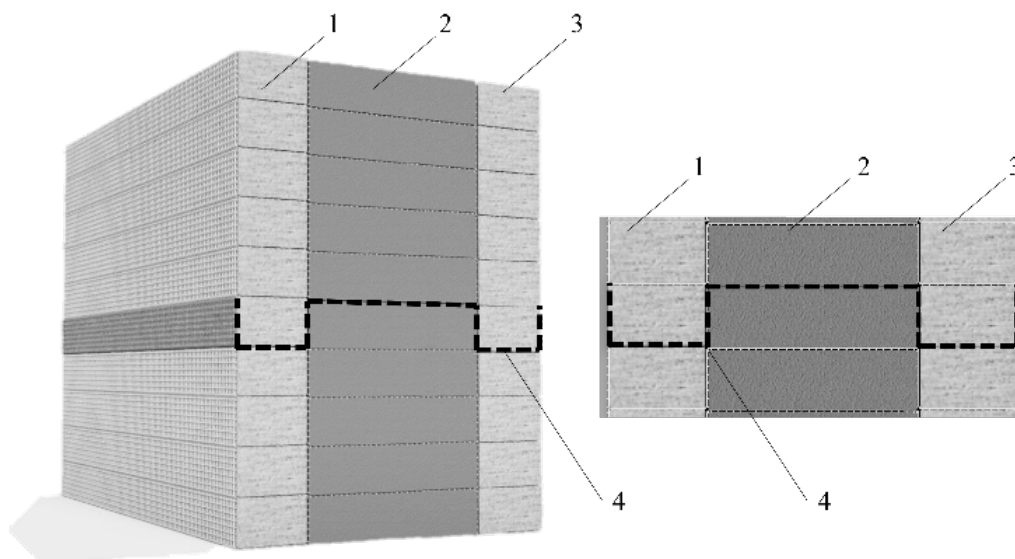


Рис. 2. Модель 3D печатной стеновой конструкции: 1 – наружная стена; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – внутренняя стена; 4 – армирующий каркас
Fig. 2. A model of the 3D-printed wall: 1 – external wall; 2 – thermal insulation; 3 – internal wall; 4 – reinforcing framework

Сетчатая структура армирующего каркаса обеспечивает межслойную адгезию бетона. Это экспериментально подтверждено при испытании балок на изгиб [21, 22]. Предлагаемый прием позволит решить уже упомянутую проблему низкой прочности сцепления вертикальных слоев при печати бетоном.

Конструкция получает дополнительную устойчивость за счет двухуровневой перевязки слоев (рис. 3).

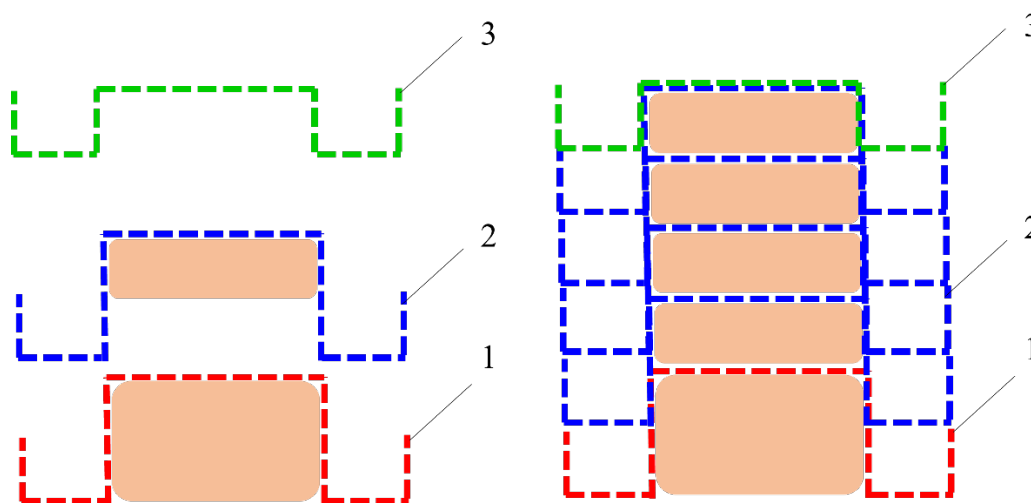
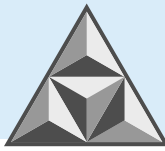


Рис. 3. Вариант стеновой конструкции с перевязкой внутренней и наружной стен:
 1 – начальный элемент опалубки, увеличенный слой теплоизоляции;
 2 – элемент опалубки; 3 – элемент опалубки без теплоизоляции
Fig. 3. A version of the 3D-printed wall with embedded bracing of wall elements:
 1 – bottom framework element with enlarged height of thermal insulation;
 2 – regular framework element; 3 – top framework element without thermal insulation



Для возведения стены требуется применить три типа армирующих элементов. Первый тип (1) содержит утолщенный слой теплоизоляции, выступающий на уровень второго слоя печати. Второй тип (2) – рядовой элемент опалубки, содержащий утеплитель, причем на уровень выше, чем полости для бетонной смеси. Третий тип (3) является завершающим и не содержит теплоизолирующего элемента в составе; он устанавливается на верхнем слое стеновой конструкции.

Экспериментальное изготовление прототипа печатной текстиль-бетонной конструкции

Экспериментально изготовлены образцы несъемной опалубки со встроенным теплоизоляционным слоем. Обычно при текстильном армировании предпочтительно применение углеродных сеток как наиболее прочных и долговечных, однако в данном случае достаточно щелочестойких стеклянных (ЩСС) ровингов. Это экспериментально подтверждено испытаниями на изгиб [21, 22] и сцепление армирующих нитей с бетонной матрицей [23]. Достаточная изгибная прочность обеспечивает совместную работу вертикальных слоев стены, а сцепление текстиля с бетоном гарантирует устойчивость возводимой конструкции.

Существует ряд факторов, которые необходимо учитывать в технологии изготовления несъемной текстильной опалубки для 3D печати. Во-первых, должна обеспечиваться достаточная жесткость проектируемого армирующего каркаса для поддержания устойчивой формы бетонных слоев. Во-вторых, армирующая сетка поставляется в рулонах и легко деформируется. Пространственную жесткость каркасу может придать покрытие жидким стеклом, эпоксидной смолой и другими составами [23]; при этом пропитка жидким стеклом (силикат натрия или калия) наиболее доступна и экономична. Экспериментально установлено, что такая обработка повышает механические характеристики получаемого композита и не увеличивает массу текстильного армирования [23].

Изготовленный трехмерный образец несъемной опалубки представлен на рис. 4.

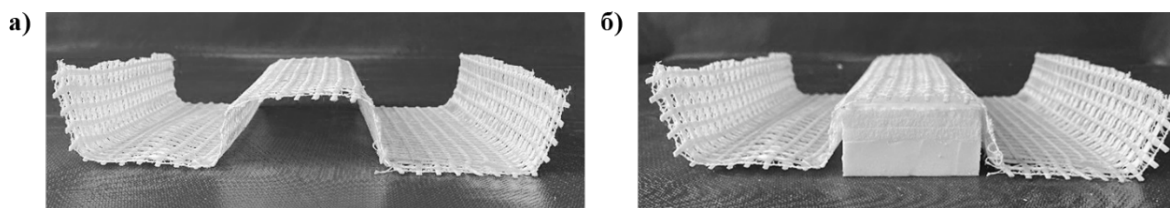


Рис. 4. Каркас несъемной опалубки из щелочестойкой текстильной сетки:
a – без теплоизоляционного материала; *b* – с теплоизоляционным материалом

Fig. 4. A leave-in-place form of alkali-resistant textile:
a – without thermal insulation; *b* – with embedded thermal insulation

Боковые части каркаса заполняли бетонной смесью, а в центральной его части помещали теплоизоляционный материал. Каркас был обработан жидким стеклом для сохранения пространственной формы. Размер армирующего каркаса зависит от ширины текстильной сетки и может варьироваться в зависимости от толщины слоев стены. Представленный армирующий каркас технологически доступен и универсален. Подготовка каркасов может происходить как вне строительной площадки, так и непосредственно на ней перед печатью конструкции. Процесс изготовления армирующих каркасов показан на рис. 5.

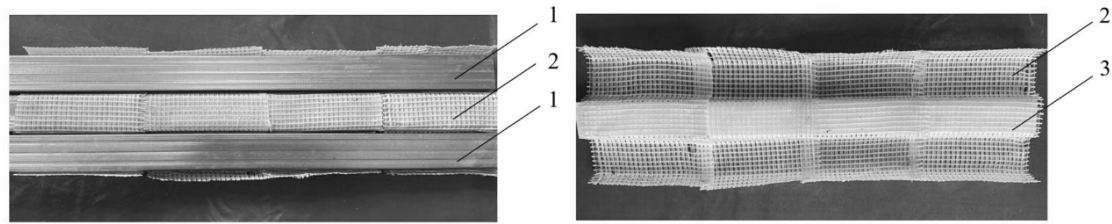
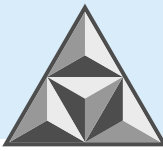


Рис. 5. Процесс изготовления каркаса несъемной опалубки из щелочестойкого текстиля:
1 – оснастка для изготовления армирующего каркаса; 2 – армирующий каркас;
3 – теплоизоляционный материал

Fig. 5. A preparation of the leave-in-place form of alkali-resistant textile:
1 – accessory equipment; 2 – reinforcing textile; 3 – insulation

Для придания каркасам пространственной формы используются П-образные профили, на которые укладывают армирующую сетку. Центральный профиль, играющий роль теплоизоляционной панели, накрывается сеткой, а на нее укладывают крайние профили. Деформированная сетка покрывается жидким стеклом. При высокой подвижности исходной сетки она может быть дополнительно прикреплена к профилям на время твердения. При использовании длинных профилей несколько армирующих сетчатых элементов могут готовиться параллельно. После придания сетке пространственной жесткости в каркас устанавливают теплоизоляционный материал, как это показано выше на рис. 4, б. В случае высокой жесткости теплоизолирующих панелей они могут быть установлены в армирующий каркас еще на этапе его формирования. Тогда покрытие армирующего каркаса приклеит теплоизолирующую панель к сетке каркаса. Для создания длинных армирующих каркасов армирующая сетка может укладываться внахлест в местах стыков (см. рис. 5, б.)

В ходе печати армирующие каркасы укладываются по контуру изготавливаемой стены, после чего 3D принтер заполняет ячейки бетонной смесью. После прохода экструдера вручную выкладываются армирующие каркасы второго слоя, затем осуществляется проход для формирования нового слоя. Описанный алгоритм повторяется, пока стена не достигнет проектной высоты. В предлагаемых армирующих каркасах присутствует как горизонтальное, так и вертикальное армирование. В рамках укладки армирующих каркасов рабочий проверяет напечатанный слой и, при необходимости, корректирует ход печати. Укладка армирующих каркасов является менее трудозатратной, чем установка армирующих металлических скоб.

Относительное положение каркасов без бетона показано на рис. 6, а. Фрагмент готовой стены представлен на рис. 6, б.

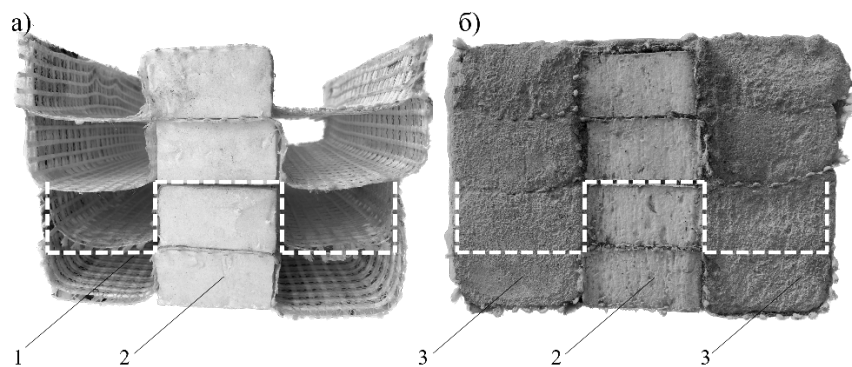


Рис. 6. Принцип формирования стеновой конструкции из несъемной опалубки:
1 – армирующий каркас; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – бетон;
а – каркас стены без бетона; б – готовая стеновая конструкция

Fig. 6. A concept of the 3D-printed wall with leave-in-place form:
1 – reinforcing textile formwork; 2 – thermal insulation; 3 – concrete
а – framed wall without concrete; б – built-up wall structure



Каркас, соответствующий одному слою печатной конструкции, показан белым пунктиром. Экструзию бетона производили по питающей трубе на экспериментальном стенде под действием силы тяжести, без применения насоса и полноценного строительного 3D принтера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изготовленная стеновая конструкция является готовым к эксплуатации строительным изделием. Качество поверхности внешней и внутренней граней может быть улучшено за счет подбора оптимальной бетонной смеси и изготовления армирующих каркасов. В этом случае поверхность оставляют без дополнительной отделки. Если же планируется оштукатуривание напечатанной стены, ячеистая структура внешней армирующей сетки, играющей роль бортиков каркаса, обеспечит повышение адгезии штукатурной смеси. Изготовленный фрагмент стены с черновым штукатурным покрытием показан на рис. 7.

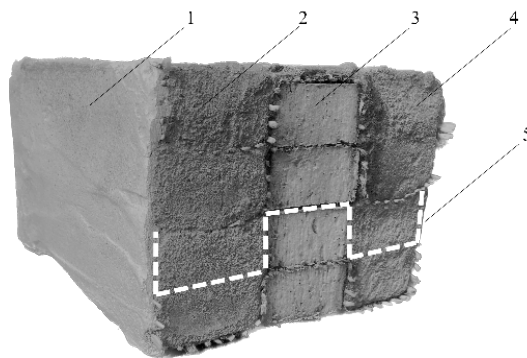
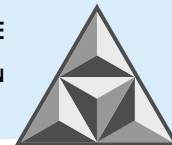


Рис. 7. Готовая стеновая конструкция: 1 – отделка; 2 – наружная стена; 3 – теплоизоляционный материал; 4 – внутренняя стена; 5 – армирующий каркас
Fig. 7. A built-up wall structure: 1 – finishing; 2 – external wall; 3 – thermal insulation; 4 – internal wall; 5 – reinforcing framework

Предлагаемые армирующие каркасы упрощают технологию 3D печати бетоном. Кроме того, применение армирующих каркасов разрешает одну из центральных проблем строительной 3D печати – деформацию нижележащих слоев под давлением верхних. Каркас из текстильной сетки придает слою пространственные границы, позволяя снизить требования к скорости схватывания бетонной смеси. При этом возводимая конструкция содержит встроенную теплоизоляцию, и собственный вес ее легче по сравнению с традиционными монолитными строительными изделиями. Применение 3D печати бетоном совместно с пространственными армирующими каркасами приведет к сокращению временных затрат на строительство, а также повышению гибкости и адаптивности проектных решений.

ВЫВОДЫ

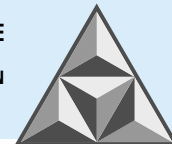
Показана возможность использования в 3D строительных конструкциях текстильного армирования; при этом пространственный армирующий каркас из текстильной сетки одновременно является опалубочным элементом. Существенные ограничения в форме создаваемых каркасов отсутствуют, так как текстильная сетка подвижна. Наличие в каркасе пустот для внешнего и внутреннего слоя бетона обеспечивает перевязку слоев печатной стены в горизонтальном направлении.



Наличие борозд в армирующем каркасе предотвращает растекание нижних слоев конструкции. Многофункциональность предлагаемого каркаса позволяет сократить затраты на строительное производство методом 3D печати. Каркас с предварительно заполненными бетоном полостями может использоваться для перемычек над дверными и оконными проемами, обеспечивая связность и однородность конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Buchanan C., Gardner L.** Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges // *Engineering Structures*. 2019. № 180. P. 332-348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.045.
2. **Kanyilmaz A., Demir A.G., Chierici M., Berto F., Gardner L., Kandukuri S.Y., Kassabian P., Kinoshita T., Laurenti A., Paoletti I., du Plessis A., Razavi N.** Role of metal 3D printing to increase quality and resource-efficiency in the construction sector // *Additive Manufacturing*. 2022. № 50. P. 102541. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102541.
3. **Bedarf P., Dutto A., Zanini M., Dillenburger B.** Foam 3D printing for construction: A review of applications, materials, and processes. *Automation in Construction*. 2021. № 130. P. 103861. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103861.
4. **Singh S., Ramakrishna S. Berto F.** 3D Printing of polymer composites: A short review // *Material Design & Processing Communications*. 2020. № 2 (2). DOI: 10.1002/mdp2.97.
5. **Vanaei S., Parizi M.S., Vanaei S., Salemizadehparizi F., Vanaei, H.R.** An Overview on Materials and Techniques in 3D Bioprinting Toward Biomedical Application // *Engineered Regeneration*. 2021. № 2. P. 1-18. DOI: 10.1016/j.engreg.2020.12.001.
6. **Клюев С.В., Клюев А.В., Шорстова Е.С.** Фибробетон для 3D аддитивных технологий // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 4. С. 14-20.
7. **Khan M. S., Sanchez F., Zhou H.** 3D-printing of concrete: Beyond horizons // *Cement and Concrete Research*. 2020. №. 33. pp. 106070. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106070.
8. **Nemova D., Kotov E., Andreeva D., Khorobrov S., Olshevskiy V., Vasileva I., Zaborova D., Musorina T.** Experimental Study on the Thermal Performance of 3D-Printed Enclosing Structures // *Energies*. 2022. № 15 (12). P. 4230. DOI: 10.3390/en15124230.
9. **Feng P., Meng X., Chen J.F., Ye L.** Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders // *Construction and Building Materials*. 2015. № 93. P. 486-497. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132.
10. **Lowke D., Dini E., Perro, A., Weger D., Gehlen C., Dillenburger B.** Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges // *Cement and Concrete Research*. 2018. № 112. P. 50-65. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.018.
11. **Ingaglio J., Fox J., Naito C.J., Bocchini P.** Material characteristics of binder jet 3D printed hydrated CSA cement with the addition of fine aggregates // *Construction and Building Materials*. 2019. № 206. P. 494-503. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.065.
12. **Hou S., Duan Z., Xiao J., Ye J.** A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design // *Construction and Building Materials*. 2021. № 273. P. 121745. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121745.
13. **Şahin H.G., Mardani A.** Mechanical properties, durability performance and interlayer adhesion of 3DPC mixtures: A state-of-the-art review // *Structural Concrete*. 2023. № 24 (4). P. 5481-5505. DOI: 10.1002/suco.202200473.
14. **Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J.** 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // *Cement and Concrete Research*. 2018. № 112. P. 37-49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
15. **García-Alvarado R., Moroni-Orellana G., Banda-Pérez P.** Architectural evaluation of 3d-printed buildings // *Buildings*. 2021. № 11 (6). pp. 254. DOI: 10.3390/buildings11060254.
16. **Yang L., Sepasgozar S. M. E., Shirowzhan S., Kashani A., Edwards D.** Nozzle criteria for enhancing extrudability, buildability and interlayer bonding in 3D printing concrete // *Automation in Construction*. 2023. № 146. P. 104671. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104671.



17. **Xu Y., Yuan Q., Li Z., Shi C., Wu Q., Huang Y.** Correlation of interlayer properties and rheological behaviors of 3DPC with various printing time intervals // *Additive Manufacturing*. 2021. № 47. P. 102327. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102327.
18. **Ramezani A., Modaresi S., Dashti P., GivKashi M. R., Moodi F., Ramezaniapour A.A.** Effects of Different Types of Fibers on Fresh and Hardened Properties of Cement and Geopolymer-Based 3D Printed Mixtures: A Review // *Buildings*. 2023. № 13 (4). P. 945. DOI: 10.3390/buildings13040945.
19. **Liu D., Zhang Z., Zhang X., Chen Z.** 3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities // *Construction and Building Materials*. 2023. № 405. P. 133364. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133364.
20. **Li W., Lin X., Bao D.W., Min Xie Y.** A review of formwork systems for modern concrete construction // *Structures*. 2022. № 38. P. 52-63. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.01.089.
21. **Volkova A.A., Paykov A.V., Stolyarov O.N., Semenov S.G., Melnikov B.E.** Structure and properties of textile reinforced concrete // *Journal of Civil Engineering*. 2015. № 59 (7). P. 50-56. DOI: 10.5862/MCE.59.5. URL: <https://engstroy.spbstu.ru/article/2015.59.5> (дата обращения: 10.10.2024).
22. **Volkova A., Paykov A., Semenov S., Stolyarov O., Melnikov B.** Flexural Behavior of Textile-Reinforced Concrete // *MATEC Web of Conferences*. 2016. № 53. P. 01016. DOI: 10.1051/matecconf/20165301016.
23. **Quadflieg T., Leimbrink S., Gries T., Stolyarov O.** Effect of coating type on the mechanical performance of warp-knitted fabrics and cement-based composites // *Journal of Composite Materials*. 2018. № 52 (19). P. 2563-2576. DOI: 10.1177/0021998317750003.

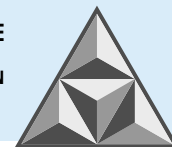
Поступила в редакцию 22.08.2024

Одобрена после рецензирования 17.09.2024

Принята к опубликованию 10.12.2024

REFERENCES

1. **Buchanan, C. and Gardner, L.** (2019), "Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges", *Engineering Structures*, vol. 180, pp. 332-348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.045.
2. **Kanyilmaz, A., Demir, A.G., Chierici, M., Berto, F., Gardner, L., Kandukuri, S. Y., Kassabian, P., Kinoshita, T., Laurenti, A., Paoletti, I., du Plessis, A. and Razavi, N.** (2022), "Role of metal 3D printing to increase quality and resource-efficiency in the construction sector", *Additive Manufacturing*, vol. 50, p. 102541. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102541.
3. **Bedarf, P., Dutto, A., Zanini, M. and Dillenburger, B.** (2021), "Foam 3D printing for construction: A review of applications, materials, and processes", *Automation in Construction*, vol. 130, p. 103861. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103861.
4. **Singh, S., Ramakrishna, S. and Berto, F.** (2020), "3D Printing of polymer composites: A short review", *Material Design & Processing Communications*, vol. 2, no. 2. DOI: 10.1002/mdp2.97.
5. **Vanaei, S., Parizi, M. S., Vanaei, S., Salemizadehparizi, F. and Vanaei, H.R.** (2021), "An Overview on Materials and Techniques in 3D Bioprinting Toward Biomedical Application", *Engineered Regeneration*, vol. 2, pp. 1-18. DOI: 10.1016/j.engreg.2020.12.001.
6. **Klyuyev, S.V., Klyuev, A. V. and Shorstova, E.S.** (2019), "Fiber concrete for 3D-printing", *Stroitel'nye materialy i izdeliya [Construction materials and products]*, vol. 4, no. 2, pp. 14-20 (In Russian).
7. **Khan, M.S., Sanchez, F. and Zhou, H.** (2020), "3D printing of concrete: Beyond horizons", *Cement and Concrete Research*, no. 133. p. 106070. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106070.
8. **Nemova, D., Kotov, E., Andreeva, D., Khorobrov, S., Olshevsky, V., Vasileva, I., Zaborova D. and Musorina, T.** (2022), "Experimental Study on the Thermal Performance of 3D-Printed Enclosing Structures", *Energies*, vol. 15, no. 12, p. 4230. DOI: 10.3390/en15124230.
9. **Feng, P., Meng, X., Chen, J. F. and Ye, L.** (2015), "Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders", *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 486-497. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132.

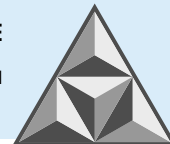


10. **Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen C. and Dillenburger, B.** (2018), "Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges", *Cement and Concrete Research*, vol. 112, pp. 50-65. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.018.
11. **Ingaglio, J., Fox, J., Naito, C. J. and Bocchini, P.** (2019), "Material characteristics of binder jet 3D printed hydrated CSA cement with the addition of fine aggregates", *Construction and Building Materials*, vol. 206, pp. 494-503. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.065.
12. **Hou, S., Duan, Z., Xiao, J. and Ye, J.** (2021), "A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design", *Construction and Building Materials*, vol. 273, p. 121745. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121745.
13. **Şahin, H.G. and Mardani, A.** (2023), "Mechanical properties, durability performance and interlayer adhesion of 3DPC mixtures: A state-of-the-art review", *Structural Concrete*, vol. 24, no. 4, pp. 5481-5505. DOI: 10.1002/suco.202200473.
14. **Buswell, R.A., Leal, de Silva W.R., Jones, S.Z. and Dirrenberger, J.** (2018), "3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research", *Cement and Concrete Research*, vol. 112, pp. 37-49. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
15. **García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G. and Banda-Pérez, P.** (2021), "Architectural evaluation of 3d-printed buildings", *Buildings*, vol. 11, no. 6, p. 254. DOI: 10.3390/buildings11060254.
16. **Yang, L., Sepasgozar, S. M. E., Shirowzhan, S., Kashani, A. and Edwards, D.** (2023), "Nozzle criteria for enhancing extrudability, buildability and interlayer bonding in 3D printing concrete", *Automation in Construction*, vol. 146, p. 104671. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104671.
17. **Xu, Y., Yuan, Q., Li, Z., Shi, C., Wu, Q. and Huang, Y.** (2021), "Correlation of interlayer properties and rheological behaviors of 3DPC with various printing time intervals", *Additive Manufacturing*, vol. 47, p. 102327. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102327.
18. **Ramezani, A., Modares, S., Dashti, P., GivKashi, M.R., Moodi, F. and Ramezani-pour, A.A.** (2023), "Effects of Different Types of Fibers on Fresh and Hardened Properties of Cement and Geopolymer-Based 3D Printed Mixtures: A Review", *Buildings*, vol. 13, no. 4, p. 945. DOI: 10.3390/buildings13040945.
19. **Liu, D., Zhang, Z., Zhang, X. and Chen, Z.** (2023), "3D printing concrete structures: State of the art, challenges, and opportunities", *Construction and Building Materials*, vol. 405, p. 133364. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133364.
20. **Li, W., Lin, X., Bao, D.W. and Min Xie, Y.** (2022), "A review of formwork systems for modern concrete construction". *Structures*, vol. 38, pp. 52-63. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.01.089.
21. **Volkova, A.A., Paykov, A.V., Stolyarov, O.N., Semenov, S.G. and Melnikov, B.E.** (2015), "Structure and properties of textile reinforced concrete", *Magazine of Civil Engineering*, vol. 59, no. 7, pp. 50-56. DOI: 10.5862/MCE.59.5.
22. **Volkova, A., Paykov, A., Semenov, S., Stolyarov, O. and Melnikov, B.** (2016), "Flexural Behavior of Textile-Reinforced Concrete", *MATEC Web of Conferences*, vol. 53, p. 01016. DOI: 10.1051/matecconf/20165301016.
23. **Quadflieg, T., Leimbrink, S., Gries, T. and Stolyarov, O.** (2018) "Effect of coating type on the mechanical performance of warp-knitted fabrics and cement-based composites", *Journal of Composite Materials*, vol. 52, no. 19, pp. 2563-2576. DOI: 10.1177/0021998317750003.

Received 22.08.2024

Approved 17.09.2024

Accepted 10.12.2024



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.32

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-35-54

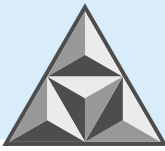
Современное состояние научных исследований в области самовосстанавливающихся бетонов

Т.А. Низина, А.О. Ковшов

Татьяна Анатольевна Низина*, **Артем Олегович Ковшов**

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
Саранск, Российская Федерация

*nizinata@yandex.ru**, *a-kovshov@list.ru*



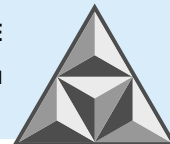
Изложены основные принципы получения самовосстанавливающегося бетона. Приведены основные направления научных исследований в области повышения долговечности бетонов с введением биологических добавок, а именно бактерий-продуцентов известняка. Представлены принципы самозалечивания трещин в бетонном камне при помощи микроорганизмов. Описан международный и российский опыт внедрения разработок в области самовосстанавливающихся материалов на основе вяжущих веществ.

Ключевые слова: бетон, самовосстанавливающийся бетон, биобетон, трещины, микроорганизмы, бактерии

Для цитирования:

Низина Т.А., Ковшов А.О. Современное состояние научных исследований в области самовосстанавливающихся бетонов // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 35-54. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-35-54



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-35-54

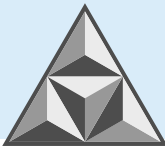
State of the art of scientific research in the field of self-healing concrete

T.A. Nizina, A.O. Kovshov

Tatyana Anatolyevna Nizina*, **Artem Olegovich Kovshov**

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogaryov, Saransk, Russian Federation

*nizinata@yandex.ru**, *a-kovshov@list.ru*



The paper presents the basic principles of obtaining self-healing concrete. The authors give the main scientific research trends in the field of increasing the durability of concrete with the introduction of biological additives - bacteria of limestone producers. The paper shows the principles of self-healing of cracks in concrete stone using microorganisms. The paper discusses the international and Russian experience of development implementation in the field of self-healing materials based on binders.

Keywords: concrete, self-healing concrete, bioconcrete, cracks, microorganisms, bacteria

For citation:

Nizina T.A., Kovshov A.O. State of the art of scientific research in the field of self-healing concrete // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 4. P. 35-54.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-35-54



ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день бетон занимает лидирующие позиции среди строительных материалов по всему миру. На протяжении нескольких веков ученые и инженеры разрабатывали множество рецептов, позволяющих получать бетоны с различными характеристиками. Тем не менее, среди множества исследований и достижений остаются неразрешенными вопросы, касающиеся прочности, трещиностойкости и долговечности бетонных конструкций. Устойчивость к значительным сжимающим нагрузкам и экономическая доступность бетона предопределила его незаменимость в строительстве. Кроме того, этот материал может принимать практически любые формы, что позволяет архитекторам реализовывать самые смелые идеи. Однако у бетона есть недостатки. Он демонстрирует ограниченные показатели прочности при растяжении, а также подвержен воздействию усадки и усталостных нагрузок. Влияние внешней среды также может существенно сказаться на его долговечности и надежности. Поэтому исследование путей улучшения его физико-механических свойств до сих пор не теряет своей актуальности.

Одним из наиболее перспективных решений данной проблемы является создание рецептов бетонов, способных противостоять распространению трещин. Концепция самовосстанавливающегося бетона охватывает широкий спектр инновационных технологий и методов, направленных на изменение внутренней структуры материала, что позволяет ему восстанавливаться после механических повреждений и становиться более устойчивым к агрессивным внешним факторам.

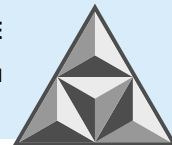
Поскольку бетон остается крайне востребованным в области ремонта и строительства, поиск и внедрение современных и эффективных подходов и методов его производства может значительно повысить долговечность конструкций, уменьшить затраты на их обслуживание и ремонт [1].

Самовосстанавливающийся бетон входит в обширный спектр современных инновационных решений, направленных на трансформацию структуры материала, что повышает устойчивость к разнообразным воздействующим факторам. В наше время весьма актуальны подходы, которые соединяют в себе экоориентированные и высокотехнологичные решения, открывая новые горизонты для применения бетона в условиях современных строительных стандартов и экологических требований [2].

Материал, способный самостоятельно устранять повреждения, возникающие при эксплуатации, позволяет не только снизить расходы на ряд различных промышленных процессов за счет увеличения срока службы, но и предотвратить таковые, связанные с его повреждением. При этом, чтобы материал идентифицировать как самовосстанавливающийся, необходимо, чтобы процесс заживления происходил без вмешательства человека.

КОНЦЕПЦИЯ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ БЕТОНА И ПОИСК ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ ОСНОВНОЙ ЗАДАЧИ

Трещины, возникающие в бетонных конструкциях, являются закономерной реакцией материала на внешние механические нагрузки и воздействия, которые накапливаются с течением времени. Эти физические нарушения структуры не только визуально ухудшают состояние бетона, но и служат «воротами» для атмосферной влаги, что, в свою очередь, значительно влияет на прочностные характеристики материала. Увеличение проницаемости бетона для воды ведет к развитию коррозионных процессов и, как следствие, снижению долговечности конструкций.



Растрескивание бетона – обычное явление. Без надлежащей обработки трещины в бетонных конструкциях имеют тенденцию расширяться, что в конечном итоге потребуют дорогостоящего ремонта. С помощью современных технологий можно уменьшить степень растрескивания, однако полное устранение трещин в бетоне является предметом исследований ученых на протяжении многих лет.

Долговечность бетонных и железобетонных изделий и конструкций является ключевым показателем, определяющим как срок службы сооружений, так и затраты, связанные с техническим обслуживанием и восстановлением. Понимание механизмов, способствующих образованию трещин, представляет собой важную задачу не только для строителей, но и для исследователей-материаловедов. Современные научные исследования в этой области акцентируют внимание на разработке и внедрении инновационных методов повышения долговечности указанного строительного материала. Особое место среди данных технологий занимает концепция самовосстанавливающегося бетона [3-6]. Любой процесс, при котором бетон восстанавливает свои эксплуатационные характеристики после первоначального повреждения, называют самовосстановлением бетона [7].

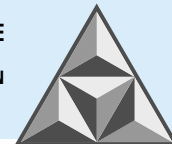
Концепция самовосстановления развилась на базе биологических форм жизни, то есть растений и животных, которые естественным образом проявляют способность к самовосстановлению при появлении повреждений. Самовосстанавливающиеся материалы можно разбить на две основные категории – в зависимости от механизмов, которые запускают их восстановление, и природы этих процессов, а именно: автономные и неавтономные. Неавтономные материалы нуждаются в активизации внешними факторами (высокая температура или свет), что ограничивает их использование в определенных условиях. Напротив, автономное самовосстановление представляет собой идеальный вариант. Такие материалы способны восстанавливаться самостоятельно, без дополнительных внешних воздействий. Это обеспечивает их привлекательность для многочисленных приложений, где независимость от внешних факторов играет ключевую роль. Технология самовосстановления позволяет повысить прочностные характеристики бетонной конструкции, а также предотвратить коррозию армирующих элементов [8].

Основной задачей при разработке рецептуры самовосстанавливающегося бетона является поиск бактерий, способных выживать в суровых условиях эксплуатации. В природе существуют различные виды бактерий, используемые в области строительства. В табл. 1 приведены микроорганизмы, используемые для осаждения карбоната кальция в бетоне. Исследование показало [9], что при просачивании воды бактерии в бетоне пробуждаются и начинают быстро размножаться. В лабораторных условиях в течение 7 сут. они преобразуют питательные вещества в известняк.

Таблица 1. Микроорганизмы, осаждающие карбонат кальция в бетоне [9]

Table 1. Microorganisms that precipitate calcium carbonate in concrete [9]

Тип микроорганизма	Система	Тип кристаллов	Ссылки
Фотосинтезирующий организм: <i>Synechococcus GL24</i>	меромиктическое озеро	Кальцит (CaCO ₃)	C.Y. Tai, F.B. Chen
Фотосинтезирующий организм: <i>Chlorella</i>	люцерновое озеро	Кальцит (CaCO ₃)	S. Sanchez-Moral, J. Canaveras
Сульфатредуцирующие бактерии: <i>Изолят SRB, LVform6</i>	аноксигенный гиперсолёный лиман	Доломит (Ca(Mg)CO ₃)	M.T. Gonzalez Murioz
Азотный цикл: <i>Bacillus subtilis</i>	разложение мочевины в синтезированной среде	Кальцит (CaCO ₃)	S. Castanier et al.
Азотный цикл: <i>Bacillus cereus</i>	аммонификация и восстановление нитратов	Кальцит (CaCO ₃)	S. Castanier et al.
Азотный цикл: <i>Bacillus subtilis JC3</i>	аммонификация (разложение аминокислот)	Кальцит (CaCO ₃)	M. Seshagiri Rao



В щелочных средах глинистых почв водородный показатель часто изменяется под влиянием процессов аммонизации и редукции сульфатов, осуществляемых благодаря жизнедеятельности микроорганизмов, а также в результате взаимодействия с водой, содержащей элементы, выщелоченные из силикатных минералов. Поскольку такие среды обладают ограниченной буферной способностью, pH в них может колебаться, что, в свою очередь, способствует увеличению разнообразия микробов, устойчивых к щелочным условиям.

Промышленные процессы (производство цемента, целлюлозно-бумажной продукции, извлечение полезных ископаемых, утилизация доменного шлака, гальванопокрытия и др.) являются источниками создания нестабильных искусственных щелочных сред, благоприятных для исследования и эксплуатации микробного разнообразия в этих экосистемах. Из нейтральных почв были выделены грамположительные и эндоспорообразующие алкалофильные бактерии вида *Bacillus*, неспорообразующие бактерии вида *Pseudomonas*, *Paracoccus*, *Micrococcus*, *Aeromonas*, *Corynebacterium* и *Actinopolyspora*, устойчивые к щелочной среде грибы. Основной причиной проведения обширных исследований экстремофилов в последние десятилетия является перспективное биотехнологическое практическое применение этих микробов и продуктов их жизнедеятельности [9].

Эффективность методов самовосстановления бетона при помощи деятельности бактерий-продуцентов известняка доказана опытным путем. В [10] приводятся результаты экспериментов по изучению заживления бетона в присутствии различных бактерий и концентраций питательных веществ. Результаты такого исследования представлены на рис. 1.

Не менее важная задача – поиск подходящего питательного вещества для поддержания продуцирования известняка. В первых опытах использовали сахар, однако он ухудшал свойства бетона (способствовал снижению прочности); впоследствии в качестве источника питания был выбран лактат кальция [11].

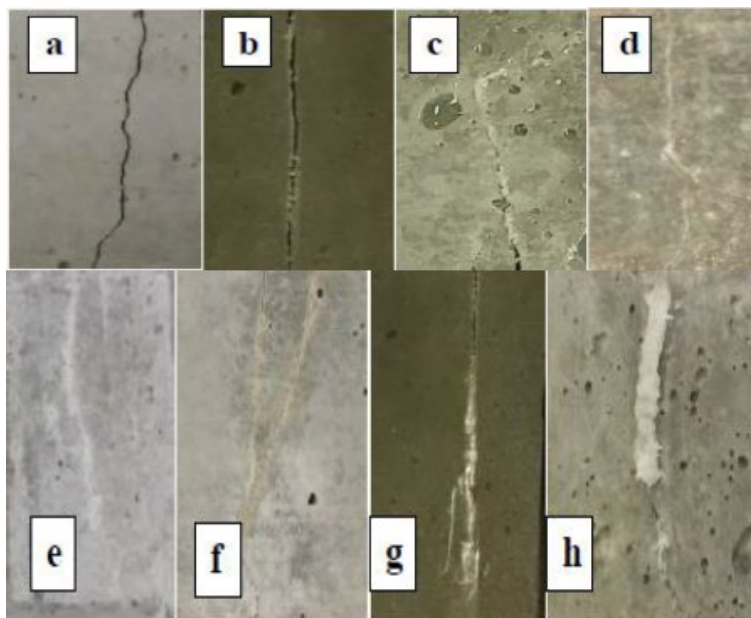
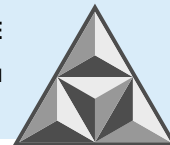


Рис. 1. Фотоснимки, демонстрирующие затягивание трещин: *a* – контрольный образец; *b* – образец без бактерий, но с добавлением питательных веществ; *c* и *d* – образцы, обработанные бактериями *B. subtilis*; *e* и *f* – образцы, обработанные бактериями *S. ureae*; *g* и *h* – образцы, обработанные бактериями *S. Pasteurii* [10]

Fig. 1. Photographs showing crack tightening: *a* – control sample; *b* – sample without bacteria but with added nutrients; *c* and *d* – samples treated with *B. subtilis* bacteria; *e* and *f* – samples treated with *S. ureae* bacteria; *g* and *h* – samples treated with *S. Pasteurii* bacteria [10]



Для эффективного протекания химической реакции с выделением карбоната кальция необходимы следующие условия:

- достаточная концентрация химических соединений (в основном, карбонат- и бикарбонат-ионы и растворенные свободные ионы кальция);
- ширина трещины (допустимая ширина трещины – 150 мкм, однако наиболее эффективны трещины с размером ≤ 50 мкм);
- кислород (благодаря ему лактат кальция реконструируется в нерастворимый известняк, затвердевающий и заполняющий поверхности трещин);
- давление воды (необходимо обеспечить контакт воды и капсул; при стремительном токе жидкости эффективность технологии снижается) и ее наличие в целом [10].

Бетон, при достаточном содержании соединений кальция, обладает свойством «залечивать» трещины. Самостоятельное заживление вызвано выпадением кальцита, который образуется в результате реакции CO_3^{2-} в воде, вводимой в трещину, и ионов Ca^{2+} , растворенных в пасте, а также протеканием реакции гидратации в трещине [12, 13]. При этом свойства материала варьируются в зависимости от типа вяжущего, степени гидратации и особенно сильно – от количества непрореагировавшего цементного клинкера в бетонной матрице [14, 15]. По мере увеличения размеров зерен цемента они не гидратируются полностью и, как правило, останутся непрореагировавшими.

Самовосстанавливающиеся бетоны, основанные на использовании микробиологических систем, функционируют по следующему порядку:

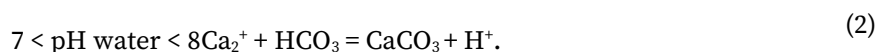
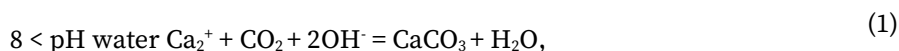
1. Лактат кальция в комбинации со специализированными бактериальными культурами помещается в микрокапсулы из биоразлагаемого полимера, имеющего диаметр в пределах 2-4 мм.

2. С помощью химически активных добавок данные капсулы интегрируются в состав бетонной смеси, что обеспечивает их равномерное распределение.

3. В условиях эксплуатации капсулы сохраняют свою целостность; бактерии остаются в состоянии анабиоза. При образовании микротрещин структура капсул подвергается разрушению, позволяя влаге проникнуть к бактериальным формам и активировать их жизненные процессы.

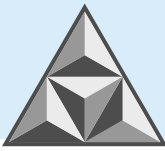
4. В результате активации наблюдается быстрый рост популяции бактерий, которые метаболизируют лактат кальция. В процессе своей жизнедеятельности они выделяют карбонат кальция, который служит природным заполнителем, эффективно реконструируя микротрещины.

Продуктом реакции ионов кальция с диоксидом углерода или гидрокарбонатом является растворенный в воде карбонат кальция:



Скорость образования кристаллов в трещине зависит от ее размеров и не зависит от типа воды или ее состава [16].

История самозалечивания бетонов уходит корнями в античность. Так, древнейшим архитектурным примером конструкций из этого материала являются постройки в римских городах. Древние римляне были мастерами инженерного дела, строили обширные сети дорог и акведуков, порты и массивные здания, руины которых сохранились на протяжении двух тысячелетий. Многие из этих сооружений были построены из бетона: знаменитый римский Пантеон, имеющий самый большой в мире купол из неармированного бетона, и сегодня остается нетронутым, а некоторые древнеримские акведуки до сих пор доставляют воду в Рим [17].



Поразительно, что бетонные монументы римлян сохранились до наших дней спустя два тысячелетия, и это не идет в сравнение со сроком эксплуатации современных зданий, рассчитанных на 50-100 лет. Ученые обнаружили потенциальный ответ на вопрос «почему древнеримские здания смогли выдержать испытание временем». Установлено, что трещины в древних конструкциях «самозатягиваются». Материал стен и перекрытий состоит из трех компонентов: известняка, вулканического пепла и воды. В течение многих лет архитекторы и историки предполагали, что вулканический материал делает его прочным, и это так, но не является главным объяснением способности материала к самовосстановлению трещин [18].

На рис. 2 представлены результаты гиперспектральной съемки бетонных образцов из коммуны Приверно (Италия). Красным цветом окрашены области бетонного камня с наибольшим содержанием кальция, желтым цветом – серы, синим – алюминия, зеленым – кремния.

Исследователи из Массачусетского технологического института в 2023 г. опубликовали в журнале «Science Advances» результаты анализа древних образцов римского бетона (возраст – около 2000 лет), извлеченных из раскопок в коммуне Приверно (Италия) [17]. Считалось, что римские строители применяли гашеную известь, получаемую нагреванием известняка при высоких температурах, что позволило создавать высокореактивный порошок, который затем «гасился» водой и смешивался с пуццолоной. Однако детальное исследование образцов выявило иной подход к производству бетона, что ставит под сомнение устоявшиеся представления о технологиях римских зодчих.

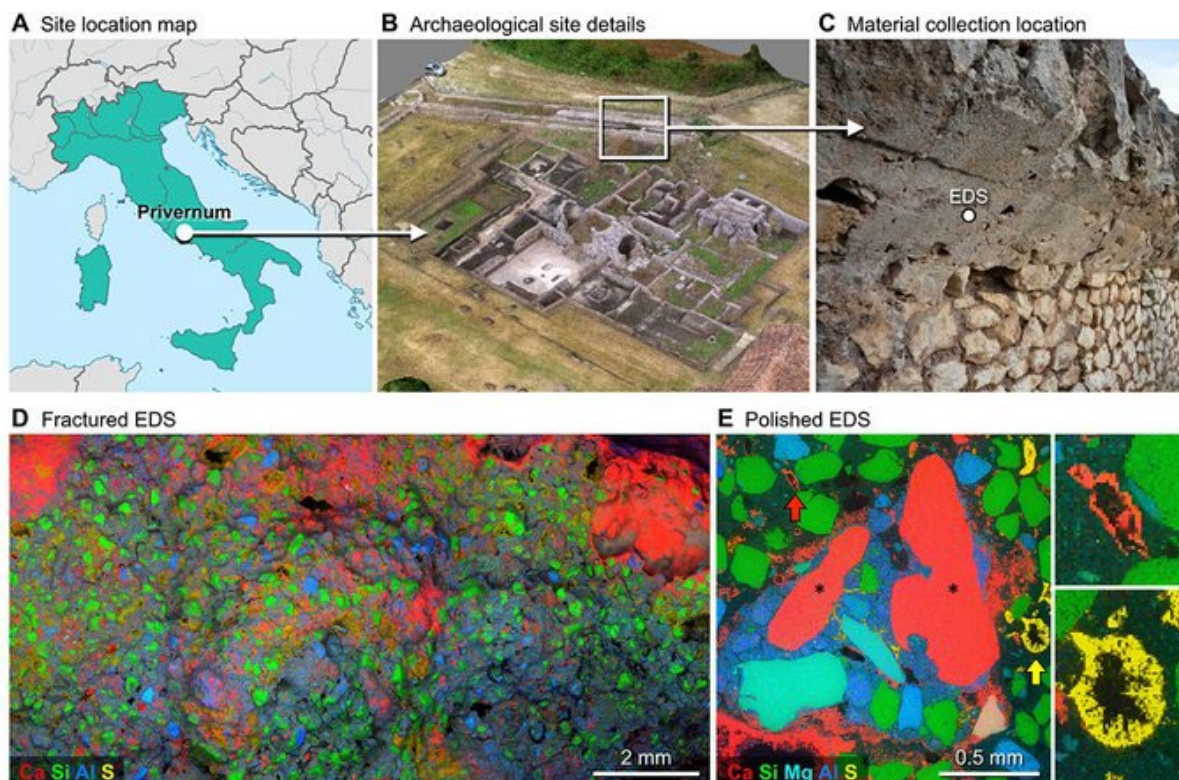
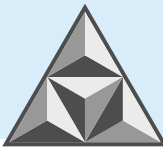


Рис. 2. Результаты гиперспектральной съемки бетонных образцов из коммуны Приверно [17]

Fig. 2. Results of hyperspectral imaging of concrete samples from Priverno commune [17]

Когда древние римляне готовили раствор, они нагревали известь, чтобы превратить ее в негашеный продукт, который расширяется при реакции с водой. В процессе эксплуатации бетона начинают образовываться крошечные трещины, но негашеная известь не дает им увеличиваться. При дожде известь реагирует с водой и кристаллизуется в различные формы

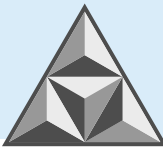


карбоната кальция, быстро заполняя трещину или реагируя с вулканическим пеплом, чтобы «восстановить» материал [18].

Серьезные научные исследования в области самовосстановления вяжущих материалов открылись лишь во второй половине XX столетия; различные ученые и инженеры внесли свой вклад в ее развитие. Одним из пионеров данного направления стал инженер-химик Джон Йонг, который в 1988 г. опубликовал статью в журнале *Cement and Concrete Research*. В своей работе он предложил инновационный подход к использованию микробных агентов для заполнения микротрещин в бетонных конструкциях, тем самым способствуя восстановлению их структурной целостности.

Важный прорыв в области научного знания о вяжущих и их свойствах совершил инженер-строитель гонконгского происхождения Виктор Ли. Ученый посвятил свою жизнь разработке новой технологии производства гибких самовосстанавливающихся бетонов. После своей эмиграции в США он занимался созданием инновационного решения для уменьшения строительного шума, от которого страдал развивающийся Гонконг. В ходе учебы в Университете Виктор Ли был удивлен явным контрастом в состоянии между американской и гонконгской инфраструктурами, что наглядно проявлялось в ветхости дорог и мостов в США. Это наблюдение придало ему мощный импульс к стремлению разработать эффективные технологии для стабилизации и модернизации строительных материалов. По мнению Виктора Ли, внедрение самовосстанавливающегося бетона потребует первоначальных затрат, втрое превышающих стоимость традиционного материала. Однако его прогнозы указали, что экономия, достигнутая благодаря сокращению расходов на ремонт и обслуживание, окажется значительной [20]. В 2002 г. Виктор Ли представил предшественника гибкого бетона. Этот бетон служил основой сердцевины нескольких высотных зданий в Японии, в том числе – жилой башни в Осаке, используемой с целью поглощения энергии во время землетрясений [19]. Согласно расчетам Ли, аналогичный мост, построенный из самовосстанавливающегося бетона, мог сократить эксплуатационные расходы на 50%, что приводило к суммарной экономии в размере 11 млн. долл. [21]. Эти финансовые ожидания потенциально оправдывали более высокие начальные инвестиции.

Процесс восстановления бетонных покрытий новым материалом можно сравнить с физиологическими механизмами заживления кожных покровов человека. Незначительное повреждение, например, порез от бумаги заживает гораздо быстрее, чем более серьезная рана, достигающая в глубину двух сантиметров. Аналогично, когда в бетоне (на основе технологии Ли) возникают микроскопические трещины, сравнимые по толщине с человеческим волосом, происходит активный процесс самовосстановления. При этом сухой бетонный композит под воздействием атмосферной влаги начинает активно ее поглощать, что приводит к созданию новых структур бетона, заполняющих образовавшиеся трещины. Параллельно ионы кальция, высвобождающиеся из поврежденного бетона, взаимодействуют с влагой и углекислым газом, содержащимся в воздухе. Это приводит к образованию карбоната кальция, который, по сути, представляет собой мел. Данная реакция не только способствует заполнению трещин, но и позволяет восстановить первоначальные механические свойства бетона, что значительно повышает его долговечность и эксплуатационные характеристики. Этот механизм самовосстановления демонстрирует взаимосвязь химических процессов и физических изменений и открывает новые перспективы для улучшения свойств строительных материалов [19].



В течение последних лет Ли и его команда работали над гибким цементным композитом, ECC (Engineered Cement Composite) (рис. 3).

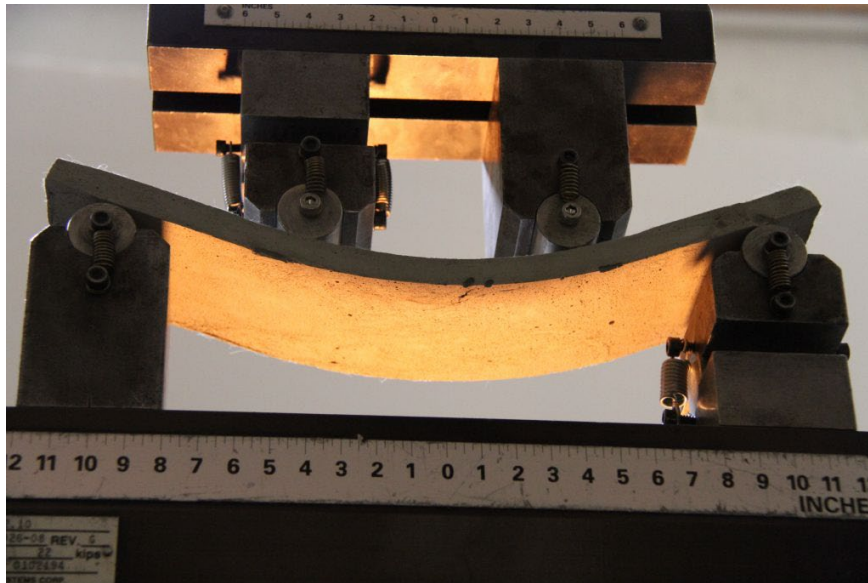


Рис. 3. Испытания на изгиб цементного композита [22]

Fig. 3. Bending tests of cement composite [22]

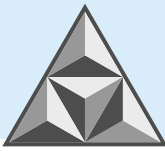
В новом рецепте на поверхности цементного камня присутствует сверхсухой цемент, обладающий способностью вступать в реакцию с водой и углекислым газом с образованием карбоната кальция, заполняющего полость микротрещины. В лабораторных условиях экспериментальные образцы восстановили значительную часть своей первоначальной прочности после того, как исследователи подвергли их трехпроцентной деформации, являющейся критической для разрушения традиционного бетона.

Традиционный бетон сравним с керамикой или стеклом; он такой же хрупкий и может полностью разрушиться при растяжении во время землетрясения или при другом перегруженном состоянии. Цементный композит Ли по характеру деформации от нагрузки аналогичен упругому металлу. Благодаря армирующим волокнам со специальным покрытием, которые удерживают структуру вещества, такой бетон изгибается без разрушения и остается неповрежденным и безопасным для использования [21].

В строительной практике для усиления бетонных конструкций существует метод армирования стальными прутьями с целью минимизации образования трещин. Тем не менее, эти трещины, несмотря на усилия строителей, зачастую все равно достигают значительных размеров, что позволяет влаге и антиобледенительным солям проникать внутрь конструкций. Это, в свою очередь, вызывает коррозию арматуры и значительно снижает прочность конструкций.

В отличие от традиционных методов, самовосстанавливающийся бетон не требует использования стальной арматуры для ограничения ширины трещин, что устраняет проблему коррозии и ее негативные последствия. Данная инновационная технология открывает новые горизонты в строительной отрасли, обеспечивая долговечность и устойчивость бетонных сооружений.

Проблематикой разработки бетона с автономной способностью к восстановлению занимались многочисленные исследователи, среди которых выделяются коллективы ученых из Нидерландов и Великобритании. Значительных успехов достигли голландские исследователи



под руководством Хэнка Йонкерса из Технологического университета Делфта, а также их британские коллеги из Университета Бата. Они разработали новую формулу бетона, способного к саморегенерации, что является значительным шагом вперед в области материаловедения и строительных технологий [1].

В последние годы наблюдается активное развитие научных исследований в области самовосстанавливающегося бетона. Это открывает новые горизонты для создания инновационных строительных материалов [23, 24]. Исследования направлены на разработку технологических решений для создания биобетона, обладающего способностями к восстановлению несущей способности в условиях эксплуатации. Одним из наиболее перспективных методов является введение в состав бетонной смеси специализированных бактерий. Микроорганизмы, благодаря своей метаболической активности, проявляют способность к восстановлению бетонной структуры, что значительно увеличивает долговечность и эксплуатационные характеристики материала [1]. Так, голландские ученые провели испытания поверхности биобетона, который демонстрирует удивительную способность к самовосстановлению трещин и повреждений, вызванных внешними воздействиями и нагрузками (рис. 4).

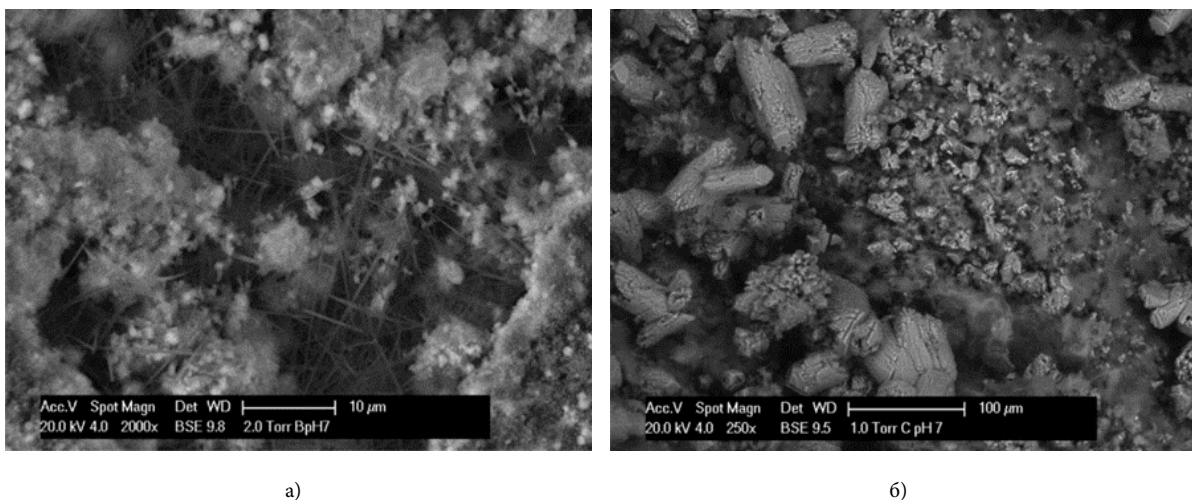


Рис. 4. Поверхность контрольного образца (а) и восстановленная поверхность образца (б) биобетона [25]

Fig. 4. Surface of control sample (a) and reconstructed surface of bioconcrete sample (b) [25]

Важный шаг сделан в 1990-х годах, когда под руководством профессора Хэнка Йонкерса из Делфтского технологического университета (Нидерланды) были проведены широкомасштабные исследования, направленные на изучение микроорганизмов, способных синтезировать карбонат кальция в присутствии влаги. Это биохимическое взаимодействие позволило достичь прорыва в области обратимой реставрации бетонных структур. Экспериментальные результаты подтвердили эффективность использования таких бактерий в маломасштабных бетонных образцах, что открывает новые горизонты для практического применения технологий, направленных на продление срока службы бетонных конструкций и снижение затрат на их обслуживание [16].

Основная цель работы голландских ученых заключается в разработке бетонного материала, способного регенерировать повреждения, возникающие в результате образования трещин, при помощи специально подобранных бактерий, продуцирующих известняк. Бактерии, использованные в экспериментах, носят названия *Bacillus pseudofirmus*, *Bacillus cohnii* и *Bacillus halodurans* (рис. 5).

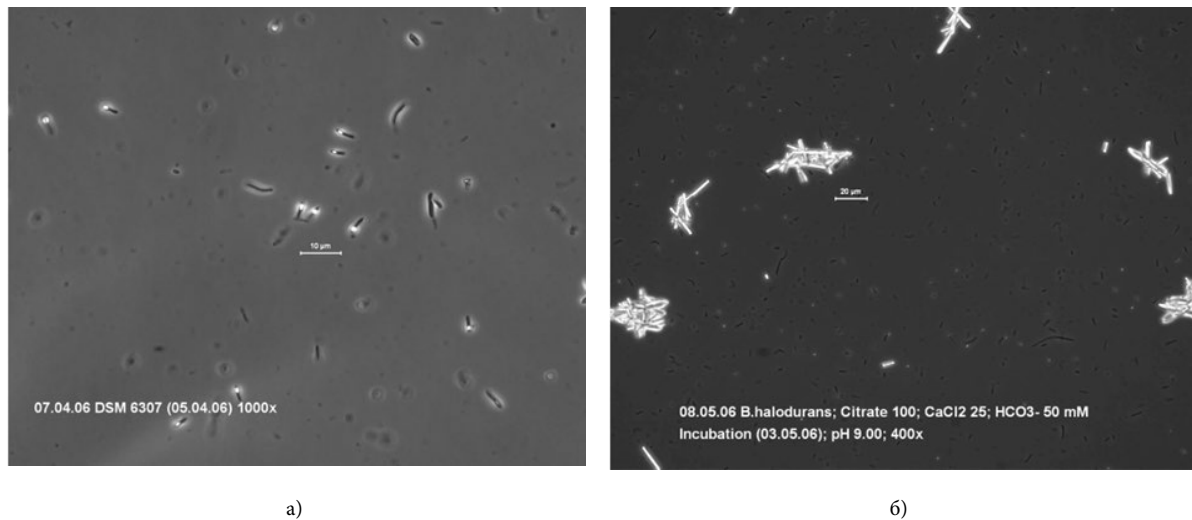
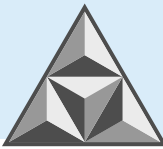


Рис. 5. Бактерии *Bacillus cohnii* (а) и *Bacillus halodurans*, продуцирующие известняк (б) [25]
Fig. 5. Limestone-producing bacteria *Bacillus cohnii* (a) and *Bacillus halodurans* (b) [25]

Эти микроорганизмы рода бацилл, находясь в спящем состоянии в специальной оболочке (споре), активизируются в момент поступления влаги, которая служит катализатором их метаболической деятельности. При контакте с водой и питательными веществами споры разрушаются и бактерии начинают активно размножаться, в результате чего происходит процесс минерализации. В частности, бактерии преобразуют кальций в известняк, который затем заполняет образовавшиеся микротрещины, обеспечивая тем самым герметизацию и предотвращая дальнейшее разрушение структуры материала [25].

Основной проблемой, стоящей перед исследователями на пути внедрения технологии самовосстанавливающихся бетонов в процессы строительства, является стоимость питательного вещества для микроорганизмов-продуцентов известняка. Сметы по апробированным рецептурам показывают, что 50% от стоимости восстанавливаемой бетонной смеси приходится на лактат кальция (табл. 2) [10].

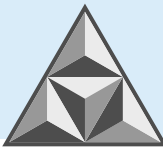
Таблица 2. Стоимость материалов восстанавливающего средства для биобетона [10]

Table 2. Material cost of bioconcrete restoration agent [10]

Компоненты	Расход на 1 м ³ бетона, кг	Стоимость 1 кг компонента, руб.	Стоимость материала на 1 м ³ бетона, руб.
Пемза	56.93	0.35	0.45
Дрожжевой экстракт	116.67	0.10	863.21
<i>Bacillus subtilis</i>	0.93	7.39	27843
Мочевина	9.33	32.45	301.82
Лактат кальция	9.33	16676	1561.16
Итого			3025.75

В связи с этим дополнительным направлением исследований в данной области становится поиск экономичного питательного вещества для бактерий, которое не снижает механические свойства бетона. Кроме того, необходимо разработать технологию производства питательного компонента в промышленных объемах. Важно, чтобы процесс самовосстановления протекал относительно быстро по сравнению со скоростью разрушения бетонного камня под действием атмосферной влаги; в противном случае разработка окажется неэффективной.

Новая технология заделки трещин должна представлять собой непрерывный процесс самовосстановления, происходящий в результате экологически безопасных биологических



процессов. Для снижения стоимости технологии предпочтительно участие микроорганизмов, достаточно распространенных в биосфере. В [26] *Bacillus pasteurii*, которая в изобилии содержится в почве, использовали для индуцирования выпадения соединений кальция в осадки. Жизненно важно понимать основы участия микроорганизмов в устранении трещин. «Бактериальный бетон» – это бетон, который можно получить, добавляя в него бактерии, способные постоянно осаждать кальцит. Это явление называют «микробиологически индуцированным осаждением кальцита». Показано, что распространенная почвенная бактерия *Bacillus Pasteruii* при благоприятных условиях может непрерывно осаждать новый высоконепроницаемый слой кальцита на поверхности уже существующего слоя бетона. Однако благоприятные условия, необходимые для осуществления процесса в естественной среде, возникают достаточно редко, поэтому необходимо их организовать.

Область применения бетонов с эффектом самозалечивания крайне обширна. Впервые самовосстанавливающийся бетон использовали при строительстве спасательной станции на озере в Нидерландах (рис. 6), затем новый материал применили при реализации проекта моста Zeelandbrug (рис. 7).



Рис. 6. Спасательная станция в Нидерландах, где впервые использовали самовосстанавливающийся бетон [16]

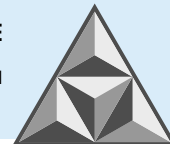
Fig. 6. Rescue station in the Netherlands where self-healing concrete was used for the first time [16]



Рис. 7. Мост Zeelandbrug в Нидерландах [16]

Fig. 7. The Zeelandbrug bridge in the Netherlands [16]

Этот мегаструктурный объект является одним из самых протяженных мостов в Нидерландах, предназначенных как для автомобильного, так и для пешеходного движения. Внедрение самовосстанавливающегося бетона существенно увеличило долговечность мостового сооружения и привело к сокращению эксплуатационных расходов на обслуживание, что подчеркнуло экономическую целесообразность проекта.



На территории Японии была адаптирована технология самовосстанавливающегося бетона в процессе возведения многоуровневого офисного здания компании Hugo Boss в Токио (рис. 8).



Рис. 8. Офисное здание компании Hugo Boss в Токио [27]

Fig. 8. The Hugo Boss office building in Tokyo [27]

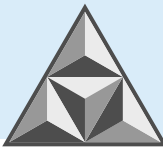
Применение данного инновационного строительного материала не только ускорило этапы строительства, но и обеспечило выдающееся качество отделки бетонных поверхностей. Отметим, что данный аспект особенно востребован при формировании архитектурного облика, соответствующего требованиям современности и высоким эстетическим стандартам [16].

Самозалечивающийся бетон успешно используется для возведения сложных строительных объектов по всему миру; перечисленные выше примеры демонстрируют разнообразные области применения этого материала. Следовательно, актуальной задачей становится разработка новых рецептов такого бетона.

Исследование микробных сообществ, находящихся в искусственно созданных щелочных средах (известковый шлам, известняковые матрицы, цемент) составляют недостаточно изученный и недооцененный раздел микробиологии. Разнообразие бактериальных видов, обнаруживаемых в таких щелочных экосистемах, потенциально может предоставить ценные данные о микробных популяциях, которые, в свою очередь, могут применяться для улучшения свойств строительных материалов. Эти микроорганизмы способны выживать при экстремальных значениях pH, характерных для цементных матриц [9].

Несмотря на то что микроорганизмы считаются разнообразным [13, 28] и распространенным видом организмов на планете, их пространственное распределение на континентальном уровне остается недостаточно изученным [29]. Экологи, занимающиеся биогеографией микроорганизмов, ссылаются на утверждение М. Бейеринка [30]: «Все есть везде, окружающая среда производит отбор». В ряде исследований предприняты попытки подтвердить данное утверждение и выявить наиболее значимые экологические факторы, влияющие на микробные сообщества в природных условиях [31].

В условиях щелочной среды клетки сталкиваются с множеством физиологических вызовов. Прежде всего, критически важной задачей является поддержание уровня pH. Для выживания микроорганизмы должны активно регулировать водородный показатель своей цитоплазмы, создавая более кислую среду, чтобы компенсировать внешнюю щелочность. Эти адаптационные механизмы требуют подходящих условий (включая умеренный климат), что подчеркивает важность комплексной оценки факторов, определяющих устойчивость микроорганизмов к экстремальным условиям обитания. Эти условия предопределяют уровень



pH, близкий к нейтральному, температуру от 293 до 313 K, давление 1 атм. и соответствующий уровень доступности воды, а также питательных веществ и солей. Многие экстремальные условия (кислые или термальные воды, соленые и/или щелочные озера, пустыни и океанское дно) слишком суровы для нормального существования. Любое состояние окружающей среды, которое может восприниматься как выходящее за пределы допустимого диапазона, является экстремальным [6].

Однако в таких условиях размножаются разнообразные микробы. Эти организмы, известные как экстремофилы, не только переносят специфические условия, но и нуждаются в них для выживания и роста. В целом микробы переносят более широкий спектр экстремальных условий окружающей среды по сравнению с представителями других форм жизни. Пределы роста и размножения микроорганизмов варьируются в условиях: -12°C (261 K)... $+100^{\circ}\text{C}$ (373 K); pH 0...13; гидростатическое давление – до 1400 атм., концентрация соли – на уровне насыщенных растворов. Помимо естественных экстремальных условий (горячие источники, соленые озера), существуют и искусственные среды, в которых микроорганизмы адаптируются. Это могут быть условия эксплуатации холодильного оборудования и систем парового отопления, а также кислотно-солевых шахтных вод.

В условиях экстремального окружающего воздействия микроорганизмы демонстрируют исключительную адаптивность и способность к выживанию. Эти экстремофилы не просто переносят специфические стрессовые условия; напротив, их жизненные циклы и репродукция зависят от наличия экстремальных факторов. В рамках микробиологической классификации существует множество экстремофилов, способных адаптироваться к условиям существования. При этом микроорганизмы демонстрируют исключительные способности, превосходя другие биологические системы в отношении выживания и размножения в условиях экстремального воздействия окружающей среды [9].

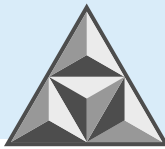
Перспективы развития исследований в данной области демонстрируют экспоненциальный рост по мере выделения новых штаммов микроорганизмов, выявления новых соединений и метаболических путей, что потребует глубоко изучить молекулярные и биохимические характеристики клеточных компонентов. На сегодняшний день одним из ярких примеров коммерческого применения являются щелочные протеазы, используемые в производстве моющих средств.

Глобальные и масштабные исследования, проводимые в отношении разнообразия экстремофильных микробов, подтвердили, что существующие знания в этой области представляют собой лишь малую часть от скрытых возможностей. В ближайшем будущем предполагается обнаружение новых и потенциально полезных экстремофильных организмов, которые могут быть адаптированы для производства биобетона [9].

Резюмируя вышеизложенное, отметим, что силами исследований отечественных и иностранных ученых получены теоретические и экспериментальные данные о возможности процесса самовосстановления бетона. Основными направлениями исследований в данной области являются:

- поиск бактерий, способных выживать в суровых условиях;
- поиск экономичного питательного вещества для бактерий;
- установление методов контроля за процессом заживания.

Следует отметить, что высокая стоимость биобетона имеет обратную сторону: строительные конструкции, выполненные из такого материала, рассчитаны на срок эксплуатации более 100 лет и почти не требуют ремонта. Это важно для обслуживания зданий и сооружений с повышенным уровнем ответственности и местах, где ремонтные работы недоступны или затруднены.



Применение самовосстанавливающегося бетона обеспечивает сохранение несущей способности конструкций через сохранение их целостности при появлении микротрещин.

Следы залечивания трещин в композитах на цементной основе сохранились с античных времен, однако на протяжении двух тысячелетий механизм процесса не подвергался серьезному исследованию. Однако в конце XX столетия развилась исследовательская деятельность, включающая теоретические и экспериментальные подходы к решению этого важнейшего практического вопроса, имеющему перспективы для последующего воплощения в рамках развития строительного производства и материаловедения.

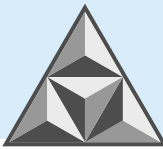
ВЫВОДЫ

Установлено, что явления самовосстановления бетона связаны с протеканием сложных физико-механических и химических механизмов в цементной матрице. Исследования по данной теме на современном этапе открывают возможность создания новейших композитных материалов с уникальными свойствами. Эти разработки весьма полезны при решении вопроса о снижении расходов на обслуживание зданий путем продления срока их эксплуатации.

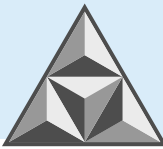
Показано, что основной механизм, лежащий в основе самовосстановления, подразумевает использование специальной инкапсулированной системы, содержащей живые микроорганизмы, которые активируются при контакте с водой. Открыты новые горизонты для увеличения устойчивости бетонных конструкций к агрессивным внешним воздействиям. Рекомендованные технологии самовосстановления не только способствуют снижению затрат на техническое обслуживание, но и представляют собой шаг вперед в направлении устойчивого развития строительной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жукова Г.Г., Сайфулина А.И. Исследование применения самовосстанавливающегося бетона // *Construction and Geotechnics*. 2020. Т. 11. № 4. С. 58–68. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.05
2. Кодзоев М.-Б.Х., Исаченко, С.Л. Самовосстанавливающийся бетон [Электронный ресурс] // *Научный журнал «Бюллетень науки и практики»*. 2018. Т. 4. № 4. С. 287-290 (дата обращения: 12.10.2024).
3. Jacobsen S., Marchand J., Boisvert L. Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete // *Cement and Concrete Research*. 1996. № 26. P. 869-881.
4. Jacobsen S., Sellevold E.R. J. Self-healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw // *Cement and Concrete Research*. 1995. № 26. P. 55-62.
5. Hearn N. Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference? // *Materials and Structures*. 1998. № 31. P. 563-567.
6. Ahn T.H., Kishi T. Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2010. № 8. P. 171-186.
7. De Rooij M, Van Tittelboom K., de Belie N., Schlangen E. Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC // *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*. 2013. № 11. DOI: 10.1007/978-94-007-6624-2.
8. Qureshi, T., Al-Tabbaa A. Self-Healing Concrete and Cementitious Materials // *Advanced Functional Materials*. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.92349.
9. Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Смирнов В.Ф. Бактерии для получения самовосстанавливающихся бетонов // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2018. Т. 5. № 4. DOI: 10.15862/07SATS418.
10. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Самовосстанавливающиеся бетоны, модифицированные микробиологической добавкой: дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 240 с.
11. Токарев А.С., Панин П.А., Медведев В.С. Самовосстанавливающийся бетон // *Наука, образование и культура*. 2021. С. 29-30.



12. **Edvardsen C.** Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete // *ACI Materials Journal*. 1999. № 96 (4). P. 448-454.
13. **Sisomphon K., Copuroglu O., Koenders E.A.B.** Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive // *Cement & Concrete Composites*. 2012. № 34 (4). P. 566-574.
14. **Huang H., Ye G., Damidot D.** Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste // *Cement and Concrete Research*. 2013. № 52. P. 71-81.
15. **Hilloulin B., Hilloulin D., Grondin F., Loukili A., de Belie N.** Mechanical regains due to self-healing in cementitious materials: Experimental measurements and micro-mechanical model // *Cement and Concrete Research*. 2016. № 80. P. 21-32.
16. Самовосстанавливающийся бетон: Технология получения и свойства [Электронный ресурс]. URL: <https://dtf.ru/science/2691081-samovosstanavlivayushiy-beton-tehnologiya-polucheniya-i-svoistva> (дата обращения: 14.10.2024).
17. **Seymour L.M, Maragh J., Sabatini P., Di Tommaso M., Weaver J.C. and Masic A.** (2023), "Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete" // *Science Advance*. № 9. DOI: 10.1126/sciadv.add1602.
18. **Kwong Emily McCoy, Berly Lu Thomas, Ramirez Rebecca.** Why Ancient Roman Concrete Is So Strong and Self-Healing [Электронный ресурс]. URL: <https://www.npr.org/2023/02/22/1158783249/rome-wasnt-built-in-a-day-but-they-sure-had-strong-concrete> (дата обращения: 14.10.2024).
19. Железобетонная гибкость [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.ru/forbes/issue/2009-12/33674-zhelezobetonnaya-gibkost> (дата обращения: 14.10.2024)
20. Profile - Victor Li - Progressive Engineer [Электронный ресурс]. URL: <https://progressiveengineer.com/profile-victor-li/> (дата обращения: 13.10.2024)
21. **Victor C. Li.** Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure, 2019. DOI: 10.1007/978-3-662-58438-5
22. Concrete Innovations [Электронный ресурс]. URL: <https://csengineermag.com/concrete-innovations/> (дата обращения: 14.10.2024)
23. **Абашкин Р.Е., Руднев М.О.** Перспективы применения самовосстанавливающихся материалов // *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. Тр. XI Межд. Науч.-практ. Конф. (19-21 марта 2014 года) в 4-х т.* 2014. Т. 1. С. 25-28.
24. **Ситников Н.Н., Хабибулина И.А., Машенко В.И., Ризаханов Р.Н.** Оценка перспектив применения самовосстанавливающихся материалов и технологий на их основе // *Перспективные материалы*. 2018. № 2. С. 5-16. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-2-5-16.
25. **Jonkers Henk M., Schlangen Erik.** Development of a bacteria-based self-healing concrete. 2008. DOI:10.1201/9781439828410.ch72
26. **Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Фомичев В.Т.** Химические аспекты процесса устранения трещин бетона с помощью бактерий [Электронный ресурс] // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2018. № 3. URL: <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf> (дата обращения 14.10.2024).
27. Mengapa BOSS menjadi salah satu destinasi wajib dikunjungi saat berwisata ke Jepang? [Электронный ресурс] // *Japanese station* – URL: <https://japanesestation.com/japan-travel/travel-destination/mengapa-boss-menjadi-destinasi-wajib-dikunjungi-saat-berwisata-ke-jepang> (дата обращения: 15.10.2024)
28. **Huang H., Ye G., Damidot D.** Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials // *Cement and Concrete Research*. 2024. № 60. P. 68-82.
29. **Jiang J., Li W., Yuan Z.** Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials // *Cement and Concrete Composites*. № 57. 2015. P. 116-127.
30. **Van Tittelboom K., Gruyaert E., Rahier H., de Belie N.** Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation // *Construction and Building Materials*. 2012. № 37. P. 349-359.
31. **Qian S., Zhou J., de Rooij M.R., Schlangen E.** Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials // *Cement and Concrete Composites*. 2009. № 31 (9). P. 613-621.
32. **Акарачкин С.А.** Самовосстанавливающиеся материалы // *Решетневские чтения 2014: материалы XVIII Междунар. науч. конф.* Красноярск. 2014. С. 329-330.



33. **Teall Oliver, Pilegis Martins, Davies Robert, Sweeney John, Jefferson Tony, Lark Robert, Gardner Diane.** A shape memory polymer concrete crack closure system activated by electrical current // *Smart Mater. Struct.* 2018. № 27 (7). DOI: 10.1088/1361-665X/aac28a.

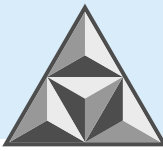
Поступила в редакцию 25.10.2024

Одобрена после рецензирования 30.11.2024

Принята к опубликованию 10.12.2024

REFERENCES

1. **Zhukova, G.G. and Sayfulina, A.I.** (2020), "Research of application of self-healing concrete", *Construction and Geotechnics*, vol. 11, no. 4, pp. 58–68, DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.05 (in Russian).
2. **Kodzoev, M.-B.H. and Isachenko, S.L.** (2018), "Self-healing concrete" [online], *Nauchnyi zhurnal «Byulleten' nauki i praktiki» [Scientific journal 'Bulletin of science and practice']*, vol. 4, no. 4, pp. 287-290 (accessed 12.10.2024) (in Russian).
3. **Jacobsen, S., Marchand, J. and Boisvert, L.** (1996), "Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete", *Cement and Concrete Research*, no. 26, pp. 869-881.
4. **Jacobsen, S. and Sellevold, E.R.J.** (1995), "Self-healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw", *Cement and Concrete Research*, no. 26, pp. 55-62.
5. **Hearn, N.** (1998), "Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference?", *Materials and Structures*, no. 31, pp. 563-567.
6. **Ahn, T.H. and Kishi, T.** (2010), "Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures", *Journal of Advanced Concrete Technology*, no. 8, pp. 171-186.
7. **De Rooij, M., Van Tittelboom, K., de Belie, N. and Schlangen, E.** (2013), "Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC", *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*, vol. 11, DOI: 10.1007/978-94-007-6624-2.
8. **Qureshi, T., and Al-Tabbaa, A.** (2020), "Self-Healing Concrete and Cementitious Materials", *Advanced Functional Materials*, doi: 10.5772/intechopen.92349.
9. **Erofeev, V.T., Al Dulaimi, Salman, Dawood Salman and Smirnov, V.F.** (2018), "Bacteria for the production of self-healing concrete", *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya» [Online Journal "Transport Structures"]*, vol. 5, no. 4, doi: 10.15862/07SATS418 (in Russian).
10. **Al Dulaimi Salman Dawood Salman** (2019), "Self-healing concretes modified with microbiological admixture", Ph.D. Thesis, Moscow, Russia (in Russian).
11. **Tokarev, A.S., Panin, P.A. and Medvedev, V.S.** (2021), "Self-healing concrete", *Nauka, obrazovanie i kultura [Science, Education and Culture]*, pp. 29-30 (in Russian).
12. **Edvardsen, C.** (1999), "Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 96, no. 4, pp. 448-454.
13. **Sisomphon, K., Copuroglu, O. and Koenders, E.A.B.** (2012), "Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive", *Cement & Concrete Composites*, vol. 34, no. 4, pp. 566-574.
14. **Huang, H., Ye, G. and Damidot, D.** (2013), "Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste", *Cement and Concrete Research*, no. 52, pp. 71-81.
15. **Hilloulin, B., Hilloulin, D., Grondin, F., Loukili, A. and de Belie, N.** (2016), "Mechanical regains due to self-healing in cementitious materials: Experimental measurements and micro-mechanical model", *Cement and Concrete Research*, no. 80, pp. 21-32.
16. Self-healing concrete: Technology of obtaining and properties [online]. Available at: <https://dtf.ru/science/2691081-samovosstanavlivayushii-sya-beton-tehnologiya-polucheniya-i-svoistva> (accessed 12.10.2024).
17. **Seymour, L.M, Maragh, J., Sabatini, P., Di Tommaso, M., Weaver, J.C. and Masic, A.** (2023), "Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete", *Science Advance*, no. 9, DOI: 10.1126/sciadv.add1602.



18. **Kwong, Emily McCoy, Berly Lu, Thomas and Ramirez, Rebecca.** "Why Ancient Roman Concrete Is So Strong and Self-Healing" [online]. Available at: <https://www.npr.org/2023/02/22/1158783249/rome-wasnt-built-in-a-day-but-they-sure-had-strong-concrete> (accessed: 14.10.2024).
19. Concrete flexibility [online]. Available at: <https://www.forbes.ru/forbes/issue/2009-12/33674-zhelezobonnaya-gibkost> (accessed: 14.10.2024).
20. Profile - Victor Li - Progressive Engineer [online]. Available at: <https://progressiveengineer.com/profile-victor-li/> (accessed: 13.10.2024).
21. **Li, Victor.** (2019), "Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure". DOI: 10.1007/978-3-662-58438-5.
22. Concrete Innovations [online]. Available at: <https://cseengineermag.com/concrete-innovations/> (accessed: 14.10.2024)
23. **Abashkin, R.E. and Rudnev, M.O.** (2014), "Prospects of application of self-healing materials", *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii: sbornik nauchnykh trudov XI Mezhd. nauchno-prakticheskoi konferentsii (19-21 marta 2014 goda) v 4-kh tomakh [Modern instrumental systems, information technologies and innovations: collection of scientific papers of the XI International Scientific and Practical Conference (19-21 March 2014) in 4 volumes]*, vol. 1, pp. 25-28 (in Russian).
24. **Sitnikov, N.N., Khabibullina, I.A., Mashchenko, V.I. and Rizakhanov, R.N.** (2018), "Assessment of prospects for the application of self-healing materials and technologies based on them", *Perspektivnye materialy [Prospective Materials]*, no. 2. pp. 5-16, DOI: 10.30791/1028-928-978X-2018-2-5-16 (in Russian).
25. **Jonkers, Henk M. and Schlangen, E.** (2008), "Development of a bacteria-based self-healing concrete", DOI: 10.1201/9781439828410.ch72.
26. **Erofeev, V.T., Al Dulaimi, Salman Dawood Salman and Fomichev, V.T.** (2018), "Chemical aspects of concrete crack repair process using bacteria" [online], *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya» [Online Journal 'Transport Structures']*, no. 3. Available at: <https://t-s.today/PDF/13SATS318.pdf> (accessed 14.10.2024) (in Russian).
27. Mengapa BOSS menjadi salah satu destinasi wajib dikunjungi saat berwisata ke Jepang? Japanese station. Available at: <https://japanestation.com/japan-travel/travel-destination/mengapa-boss-menjadi-destinasi-wajib-dikunjungi-saat-berwisata-ke-jepang> (accessed: 15.10.2024).
28. **Huang, H., Ye, G. and Damidot, D.** (2024), "Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, no. 60, pp. 68-82.
29. **Jiang, J., Li, W. and Yuan, Z.** (2015), "Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials", *Cement and Concrete Composites*, no. 57, pp. 116-127.
30. **Van Tittelboom, K., Gruyaert, E., Rahier, H., and de Belie, N.** (2012), "Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation", *Construction and Building Materials*, no. 37, pp. 349-359.
31. **Qian, S., Zhou, J., de Rooij, M.R., and Schlangen, E.** (2009), "Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials", *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 9, pp. 613-621.
32. **Akarachkin, S.A.** (2014), "Self-healing materials", *Reshetnevskie chteniya 2014: materialy XVIII Mezhdunar. nauch. konf. Reshetnev [Readings 2014: Proceedings of the XVIII International Scientific Conference]*, Krasnoyarsk, Russia, pp. 329-330 (in Russian).
33. **Teall, Oliver, Pilegis, Martins, Davies, Robert, Sweeney, John, Jefferson, Tony, Lark, Robert and Gardner, Diane** (2018), "A shape memory polymer concrete crack closure system activated by electrical current", *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no.7. DOI: 10.1088/1361-665X/aac28a.

Received 25.10.2024

Approved 30.11.2024

Accepted 10.12.2024



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 005.6, 658.56

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-55-74

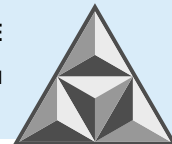
Технологические особенности производства гетерогенных строительных смесей и композитов при детерминированном формировании их однородности

А.В. Евсеев, Д.А. Карпилов, Я.А. Черкаев, И.А. Юраскова

**Алексей Владимирович Евсеев, Дмитрий Александрович Карпилов, Ярослав Андреевич Черкаев,
Ирина Андреевна Юраскова***

Тульский государственный университет, Тула, Российская Федерация

*ews1972@mail.ru, karpilovdima@yandex.ru, yaroslav.cherkaev@yandex.ru, yuraskova.ira@yandex.ru**



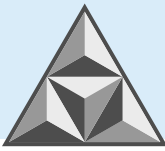
Проведен обзор состояния производства строительных смесей традиционными методами, систематизированы литературные и патентные данные по данному направлению. Представлены результаты экспериментального исследования технологии детерминированного формирования строительных смесей. Рассмотрены вопросы обеспечения необходимого уровня качества смеси за счет распределения компонентов на уровне малых доз и гарантированного характера процесса. Теория и практика процесса детерминированного формирования смеси представлена и исследована в различных вариантах конструкций нонмиксеров – конвейерном, роторном и бироторном. Механизмы упорядоченной укладки микродоз компонентов в нонмиксерах определяют технологические схемы разделения потоков компонентов.

Ключевые слова: гетерогенная смесь, композитные строительные материалы, детерминированное формирование однородности, гарантированный уровень качества

Для цитирования:

Евсеев А.В., Карпилов Д.А., Черкаев Я.А., Юраскова И.А. Технологические особенности производства гетерогенных смесей и композитов при детерминированном формировании их однородности // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 55-74.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-55-74



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-55-74

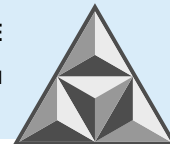
Technological characteristics of heterogeneous building mixtures and composites production at their homogeneous deterministic formation

A.V. Evseev, D.A. Karpilov, Ya.A. Cherkaev, I.A. Yuraskova

**Aleksey Vladimirovich Evseev, Dmitry Alexandrovich Karpilov, Yaroslav Andreevich Cherkaev,
Irina Andreevna Yuraskova***

Tula State University, Tula, Russian Federation

*ews1972@mail.ru, karpilovdima@yandex.ru, yaroslav.cherkaev@yandex.ru, yuraskova.ira@yandex.ru**



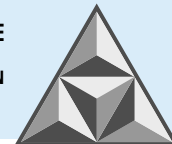
The article reviews the production of building mixes by traditional methods through scientific literature and patent data systematising. It also presents the results of an experimental study of building mixtures deterministic formation technology. The research dwells on ensuring the necessary level of mixture quality due to the distribution of components at the low dose level and the nature of the process. The article highlights theoretical and practical issues of deterministic mixture formation and observes various versions of nonmixer designs – conveyor, rotary, and birotor ones. The mechanisms of microdoses laying in nonmixers determine the technological schemes for separating the flows of components.

Keywords: heterogeneous mixture, composite building materials, deterministic uniformity formation, guaranteed quality level

For citation:

Evseev A.V., Karpilov D.A., Cherkaev Ya.A., Yuraskova I.A. Technological characteristics of heterogeneous building mixtures and composites production at their homogeneous deterministic formation // *Smart Composites in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 4. P. 55-74. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-55-74



ВВЕДЕНИЕ

В строительной индустрии востребована смесевая продукция с высокими содержаниями компонентов и гарантированным уровнем качества. Смесью компонентов часто обладает разнообразными физико-механическими и химическими свойствами, а строительные композиты характеризуются широким диапазоном соотношений компонентов (1:10 и выше). Это позволяет создавать материалы с уникальными характеристиками, адаптированными под конкретные нужды и условия эксплуатации.

Смеси высокого качества требуются для обеспечения нужд не только строительной, но и пищевой, фармацевтической, химической, электротехнической, металлургической, авиационно-космической и других отраслей промышленности, а также оборонно-промышленного комплекса [1-4].

Одним из основных аспектов, связанных с производством смесей с включением различных фракций, являются ограничения, связанные с технологическими особенностями традиционного смесительного оборудования. Реализуемый способ получения смеси основан на вероятностных методах достижения однородности продукции. Описание сложных физико-механических процессов перемещения компонентов в рабочем объеме смесителя заключается в установлении связей между стохастическими входными и выходными параметрами: компоненты, смеситель, смесь. Данное представление не дает возможности непосредственно управлять указанными процессами, а технологический цикл не обеспечивает получение смесевой продукции заданного качества [5-8]. Например, при производстве добавок для дорожных работ, используемых в качестве антиобледенителей, важно обеспечить высокие концентрации и равномерное распределение частиц по всему объему.

В наши дни требования к продуктам формируются под влиянием отраслевых стандартов и изменяющихся предпочтений клиентов. Это приводит к тому, что технические нормы и регламенты становятся более жесткими. На сегодняшний день определены следующие требования к смесям: коэффициент вариации – 0.5-1.5%, при этом соотношение компонентов должно быть 1:100 и выше, что сложно реализовать на традиционном смесительном оборудовании.

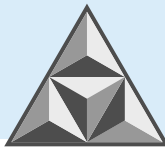
Теоретические основы и исследования в области производства смесей обосновали и осуществили Капранова А.Б. [9, 10], Макаров Ю.И. [11], Чувпило А.В. [12], Александровский А.А. [13] и др., что отражено в многочисленных работах [11-19].

Широкое распространение в современном производстве композиты получили за счет высоких эксплуатационных характеристик и специальных свойств. В области создания и производства композитных материалов основные разработки принадлежат российским ученым Васильеву В.А., Васину С.А., Евсееву А.В. Мизонову В.Е., Першину В.Ф., а также зарубежным специалистам – Исикаве К., Тагути Г., Фейгенбауму А. [20-24] и др.

Создание новых материалов и развитие технологий их производства способствовало развитию многих отраслей промышленности. В настоящее время смеси и композиты активно применяются в строительстве.

Анализ методов создания неоднородных смесей и машин для их производства

Метод создания смесей, который считается традиционным, подразумевает случайное перемещение частиц в рабочей зоне смесителя. Это приводит к равномерному распределению изначально разделенных компонентов. От способа их смешивания и характеристик



(физические, механические, химические, магнитные и др.) зависит конструкция смесителя. На качество смеси влияет объем смесителя, форма и скорость движения рабочих элементов, режим и продолжительность смешивания, а также состав исходных компонентов.

Контроль качества смеси осуществляется методами статистического анализа путем отбора проб при остановке смесителя, при этом оценивается распределение ключевого компонента.

Особенности организации технологического процесса, конструкция и соотношение компонентов в строительной смеси – ключевые аспекты [25-27], которые определяют классификацию традиционных смесителей (рис. 1).



Рис. 1. Классификация смесительного оборудования [28]

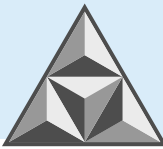
Fig. 1. Classifications of mixing equipment [28]

Существует несколько способов смешивания компонентов; один из них – периодический. Он заключается в том, что компоненты загружаются, смешиваются и выгружаются за один цикл. Однако первая и третья часть этого цикла не приносят пользы. Время, в течение которого происходит смешивание локальных объемов компонентов, остается неизменным. Это означает, что в пределе конечное распределение частиц будет соответствовать равновесному состоянию для выбранного режима работы.

Другой способ – непрерывное смешивание. В этом случае цикличность в работе оборудования отсутствует. Производительность определяется настройкой дозирующих устройств, а качество смеси зависит от распределения времени пребывания локальных объемов материалов в смесителе. Хотя качество смешивания не достигает равновесного состояния, его можно улучшить путем установки каскада смесителей. Это сужает закон распределения по времени пребывания и качеству проработки. Также качество можно улучшить организацией обратных перетоков между смесителями.

В процессе смешивания применяются методы, основанные на непрерывной работе дозатора и питателя. Точность функционирования этих устройств имеет ключевое значение для обеспечения высокого качества смеси. Наряду с этим, для достижения максимальной точности в весовой дозировке требуется использовать дискретные методы, что подразумевает необходимость применения питателей, уменьшающих колебания и сглаживающих пульсации при подаче компонентов. Это усложняет смесительную установку.

Современное оборудование для смешивания дополняется устройствами, которые выполняют особые технологические операции, такие как измельчение, уплотнение или разрыхление, сушка или увлажнение, удаление пыли, аэрация и гранулирование.



Анализ научной литературы и патентных данных в этой области показал [7, 9, 29, 30, 31], что процессы, протекающие в смесителе, носят вероятностный характер. В связи с этим возникает необходимость использования теории вероятностей и математической статистики для анализа случайных процессов и их вероятностных характеристик. Также отмечается, что при традиционном способе приготовления смеси, основанном на стохастических процессах, трудно обеспечить равномерное распределение компонентов и достичь гарантированной однородности смеси.

Также проблемой традиционного смесительного оборудования является то, что оно не позволяет получить соотношение компонентов более чем 1:10 за один технологический переход. Кроме того, традиционные методы требуют значительных энергетических затрат на производство продукции из-за многократного манипулирования объемами смеси с помощью рабочих органов смесителей.

Для обеспечения высокого качества готового продукта необходимо отказаться от традиционных технологий приготовления смесей в пользу управляемого формирования.

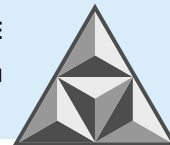
Предпосылки появления способов детерминированного формирования однородности строительных смесей и композитов

Чувпило А.В. и Макаров Ю.И. еще в 1960-х гг. разработали новые конструкции аппаратов непрерывного действия, которые формировали смесь путем внедрения тонкодозированных потоков компонентов в процессе непрерывного транспортирования, что позволило получить смеси лучшего качества. Коэффициент вариации достигал 2-4% при соотношении компонентов не более 1:10.

Чувпило А.В. [12, 32, 33], изучая процесс непрерывного смешения порошковых материалов, исследовал зависимость концентрации компонента на выходе из смесителя при различных способах его подачи на входе аппарата. Им подробно рассмотрен вопрос о влиянии способа дозирования компонентов на однородность смеси, заложены основы для рассмотрения смесителей сыпучих материалов как динамических систем, обладающих способностью сглаживания флуктуации входящих потоков компонентов. Этот подход затем был развит Макаровым Ю.И., его коллегами и учениками. Чувпило А.В. также применил аппарат марковских процессов для установления состояния смешения (диффузионное или конвективно-диффузионное). В [33] он показал, что вероятность равномерного распределения компонента увеличивается с повышением его доли в смеси и уменьшается с ростом числа компонентов.

Макаров Ю.И. [4, 11] для описания входящих потоков компонентов и выходящего потока смеси использует теорию случайных функций, представляя смеситель в виде системы, сглаживающей флуктуации потоков компонентов. Он использует простейшие модели – идеального смешения и вытеснения, диффузионную, ячеечную. Это обстоятельство не позволяет идентифицировать данные модели как однородные; получение объективного результата требует использования модели реального процесса приготовления смеси.

Вопросы повышения качества смесей путем управляемого формирования их однородности рассматривали многие отечественные ученые – Баранцева Е.А., Верлока И.И., Евсеев А.В., Капранова А.Б., Макаров Ю.И., Мизонов В.Е., Першин В.Ф., Подгорнов Ю.И., а также зарубежные исследователи [2, 4, 16, 34]. Однако эти работы имеют, скорее, рекомендательный характер для будущих теоретических исследований. Анализ таких работ показывает, что создание строительных смесей с заданной однородностью традиционными методами затруднительно, так как процесс трудно поддается описанию и управлению.



Одним из возможных путей решения этой задачи является теоретическое описание технологии детерминированного формирования однородности гетерогенных смесей [35] и строительных композитов и выбор соответствующего оборудования для успешной реализации [36].

Принципы детерминированного создания однородности строительных смесей и композитов

Возможность создания строительных смесей с соотношением компонентов выше 1:100 с гарантированным качеством, а также улучшение экономических, экологических и безопасных параметров их производства достигается благодаря отказу от традиционного стохастического смешивания.

Нонмиксеры обеспечивают гарантированное отклонение содержания ключевого компонента в смеси не более чем на 0,5-2,0% и позволяют создавать новые смеси с высокой вероятностью. Обеспечение необходимого качества смеси происходит за счет распределения компонентов на уровне малых доз. В зависимости от типа дозаторов компоненты подаются дискретно или тонкоструйными потоками.

Основная идея метода заключается в следующем: с помощью питателей создаются непрерывные или дискретные потоки компонентов. Затем из этих потоков отбираются небольшие порции, которые перемещаются под действием силы тяжести и размещаются в специальной емкости. Многократное повторение этого процесса приводит к образованию упорядоченной структуры смеси. Этот процесс можно назвать детерминированным, то есть заранее определенным. Качество готовой смеси зависит от точности выдачи небольших порций компонентов через питатели и от надежности распределения этих порций в емкости.

Технология нонмиксинга заключается в создании однородной смеси с определенными качественными характеристиками. Нонмиксинг представляет собой упорядоченное распределение небольших порций компонентов на этапе дозирования, что позволяет получить детерминированную структуру смеси с известными показателями. На основе теоретических исследований были предложены конструкции нонмиксеров, осуществляющих формирование смеси [37-41].

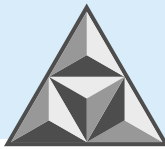
В табл. 1 представлено сравнение показателей традиционного смесительного оборудования и нонмиксеров.

Таблица 1. Технические характеристики устройств для создания смесей [28]

Table 1. Technical characteristics of devices for mixture formation [28]

Параметры	Традиционные смесители	Нонмиксеры
Соотношение компонентов	1:10	1:20 и выше
Уровень отклонения содержания ключевого компонента, %	2,0 и выше	0,5 и выше
Средняя потребляемая мощность, кВт	4-10	1,5
Процесс формирования смеси	стохастический	детерминированный

Поскольку спрос на высококачественную продукцию и эффективные технологии в строительстве растет, использование технологии детерминированного формирования однородности смесей становится перспективным. На этой основе становится возможным проектировать новые конструкции нонмиксеров.



Конструкции нонмиксеров

Для решения научно-технических задач, связанных с различными видами производственных процессов создания строительных смесей, разработаны различные конструкции нонмиксеров. Теория и практика нонмиксинга реализована в трех вариантах конструкций нонмиксеров – конвейерном, роторном и бироторном. В нонмиксерах используются различные механизмы для упорядоченной укладки микродоз компонентов. Эти механизмы играют ключевую роль в технологических схемах разделения потоков компонентов и синтеза готовой строительной смеси с определенной дискретной структурой. Некоторые конструктивные решения находятся в стадии разработки, апробации и внедрения.

На рис. 2 показан конвейерный нонмиксер, который обеспечивает равномерное смешивание компонентов. Этот тип нонмиксера работает по принципу наложения слоев смеси друг на друга, создавая непрерывную «слоеную» ленту толщиной от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров для сыпучих материалов или от 3 до 12 слоев, состоящих их штучных компонентов.

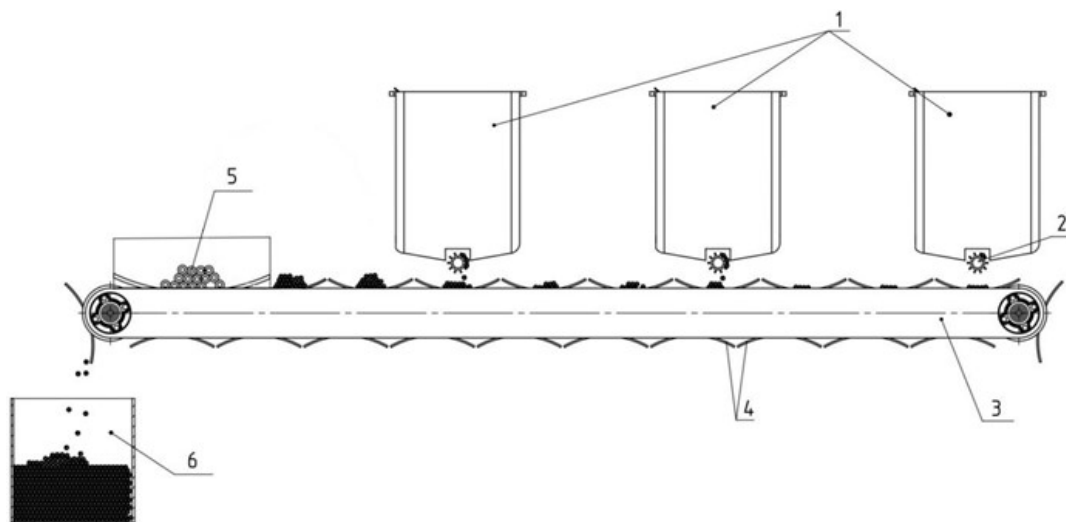
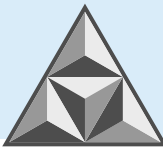


Рис. 2. Конвейерный нонмиксер [36]

Fig. 2. Conveyor nonmixer [36]



Существует альтернативный вариант конструкции нонмиксера – роторный модуль, который изображен на рис. 3. В этом модуле ингредиенты, подаваемые сверху с помощью дозаторов, собираются в одну упаковку в виде «слоеных» дисков (см. рис. 4).

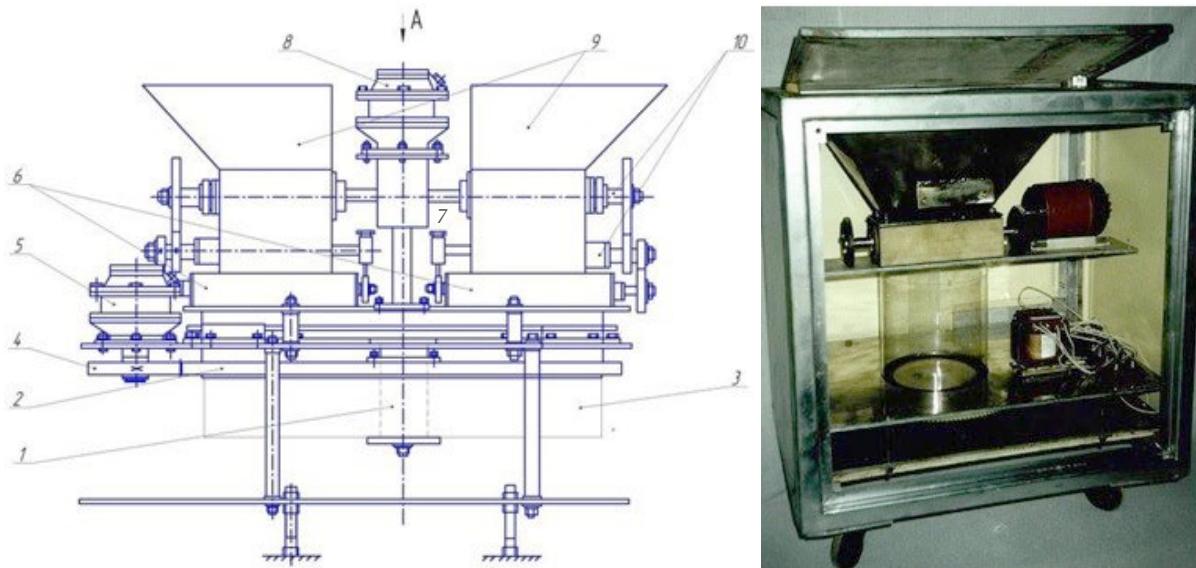


Рис. 3. Роторный двухпозиционный нонмиксинговый модуль

Fig. 3. Rotary two-position nonmixing module

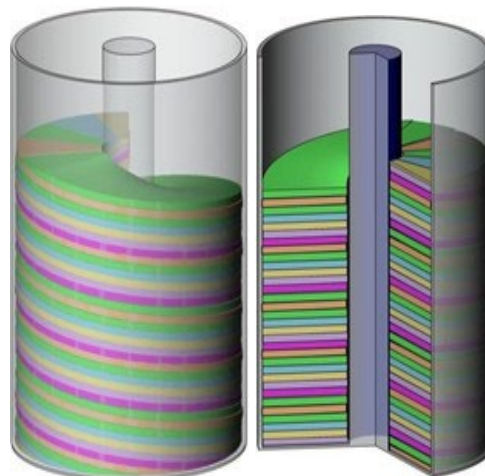


Рис. 4. Процесс синтеза компонентов в емкости роторного нонмиксера

Fig. 4. Scheme of mixture formation in a rotary nonmixer container

При этом в специальные отсеки 9 помещают сыпучие материалы, которые перемешиваются с помощью специальных устройств 10, предотвращающих слеживание. Материалы из отсеков 9 поступают в конусообразные роторные питатели 6, которые приводятся в движение с помощью привода 8. Питатели 6 с помощью специальных механизмов 7 отделяют небольшие порции материала от основной массы.

От электродвигателя 5 через шестерню 4 емкость 3 начинает вращаться вокруг своей оси. Вместе с емкостью 3 вращается основной вал 1 ротора. Питатели 6 подают материал под действием силы тяжести, и он равномерно распределяется по кругу внутри емкости.

В бироторном нонмиксере (см. рис. 5) более сложная кинематика разбивает каждый «слоеный» диск на секторы, и в каждом из них слои материала располагаются в различном порядке.

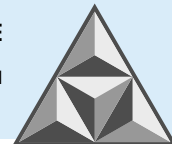


Рис. 5. Бироторный нонмиксер [38]

Fig. 5. Bi-rotor nonmixer [38]

Схема формирования однородной смеси показана на рис. 6.



Рис. 6. Схема процесса формирования однородной смеси с помощью бироторного нонмиксера

Fig. 6. Scheme of deterministic formation of mixture homogeneity on a bi-rotor nonmixer

Роторные и бироторные конструкции нонмиксеров предназначены для поддержания однородности смеси после ее упаковки и транспортировки [2, 37, 41].

Методология выбора и проектирования нонмиксеров (рис. 7) устанавливает взаимосвязи между ключевыми элементами системы – типом конструкции нонмиксера, типом производства (потребления) смеси, типом продукта и необходимыми характеристиками качества смесей.

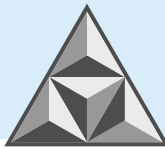


Рис. 7. Процесс определения и разработки концепции нонмиксеров

Fig. 7. Methodology for selecting and designing nonmixers

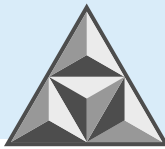
Существует множество возможных вариантов взаимодействия между элементами, включая корреляционные, но основная цель методологии – найти такую комбинацию, которая наилучшим образом соответствует требованиям, предъявляемым к производимым строительным смесям.

Предлагаемая технология систематического формирования однородности позволяет получать смеси высокого качества при значительном варьировании соотношения компонентов (от 1:20 и более) и для небольших объемов. Важно отметить, что нонмиксинг может реализоваться различными способами в зависимости от природы процесса; можно использовать растворы, конечные и промежуточные смеси, а также компоненты из естественных источников, такие как растения или минералы, а также применять не только гравитационные, но и магнитные и другие ориентирующие воздействия на потоки компонентов.

Существует множество технологических особенностей, методов и способов, которые также относят к технологическим решениям нонмиксинга.

Производство композиционного бетона

Строительные технологии не могут обойтись без новых строительных материалов, в частности, композиционных бетонов. Преимуществами последних являются широкие возможности в области строительства и решения различных архитектурных задач. За счет снижения плотности при сохранении механической прочности достигаются снижение массы, термостойкость и высокие тепловые характеристики строительных материалов. Высокий спрос на газо- и керамические блоки и плиты перекрытия подчеркивает актуальность производства композиционных бетонов.



Композиционные бетоны изготавливают посредством смешивания компонентов в выверенной пропорции. Необходимые физико-механические свойства достигаются за счет варьирования соотношений компонентов. В состав многокомпонентного бетона могут входить вяжущие вещества, расширяющие компоненты, наполнители и модификаторы различной природы. Модификаторы влияют на расширение смеси, ее реологические, кинетические и экзотермические свойства, тепловыделение и скорость отвердевания. Улучшение термических способностей при сохранении механической прочности достигается при замене 60% бетонной смеси композитом.

Рассмотрим возможность получения сухого бетона. Сухой строительный бетон – смесь цемента, песка и щебня, которые смешивают в определенной пропорции без добавления воды. Композитный бетон – это смесь обычного строительного бетона и добавок-модификаторов. При этом важно точно соблюдать пропорции компонентов в смеси, чтобы получить бетон с требуемыми свойствами. В настоящем исследовании в качестве ключевых компонентов выбран цемент и комплекс антиобледенительных добавок, а наполнителем служила смесь песка и щебня (или доломита).

Получали гетерогенные бетонные смеси с соотношением компонентов в композиции до 1:10. Для экспериментов использовали традиционные тарельчатые миксеры с рабочим объемом чаши 3 м³ и загрузкой 0.50-2.25 м³ бетонной композиции. Содержание компонентов в смеси, полученной стохастическим методом, показано на рис. 8.

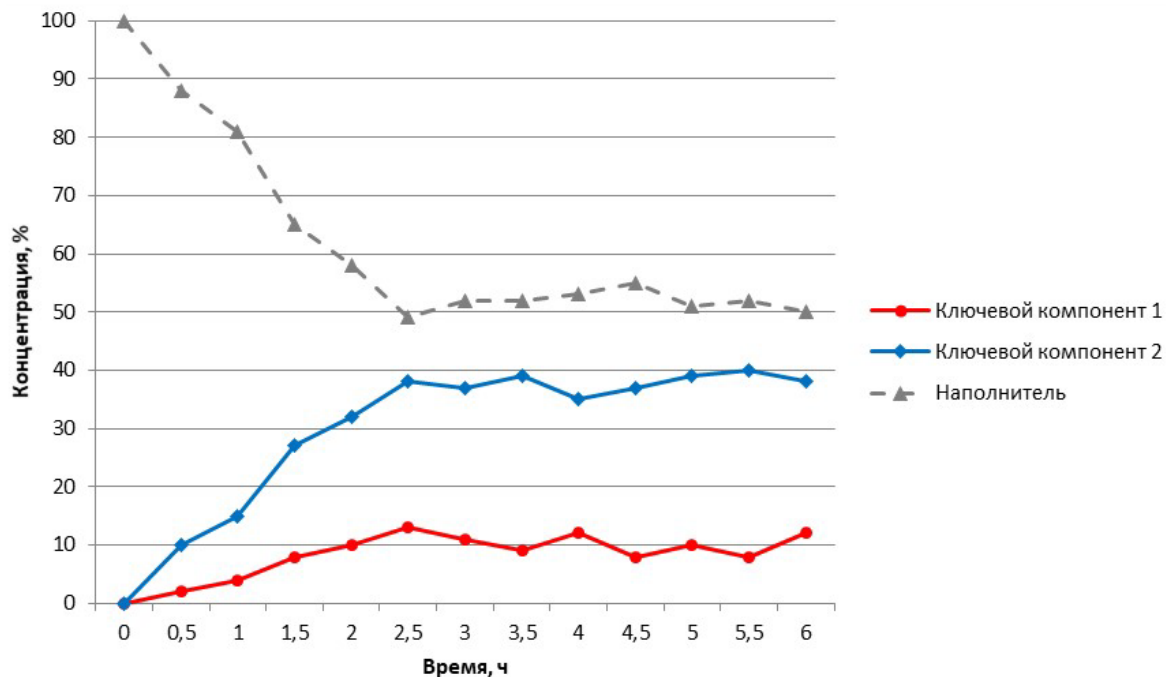


Рис. 8. Показатели качества композитных бетонов при традиционном формировании однородности

Fig. 8. Quality indicators of composite concrete with traditional formation of homogeneity

На рис. 9 представлены концентрации добавок и составляющих бетонной смеси, которые достигаются благодаря регулируемому процессу на линейном конвейере с горизонтальными барабанными дозаторами дискретного действия.

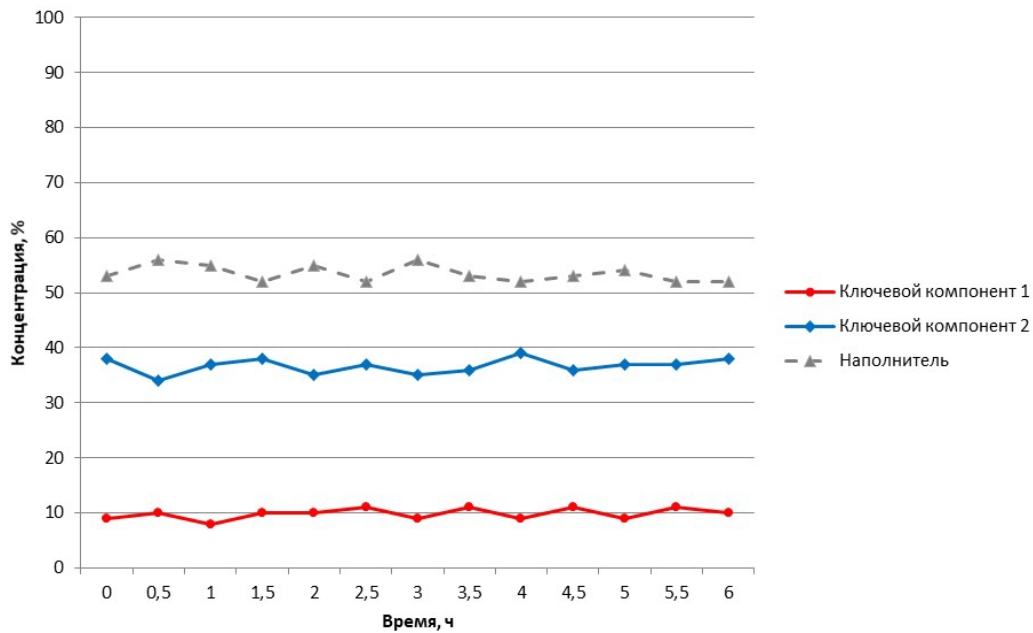
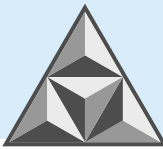


Рис 9. Характеристики композитных бетонов при контролируемом процессе достижения однородности
 Fig. 9. Quality indicators of composite concrete with controlled formation of homogeneity

Результаты исследования образцов, полученных с применением различных методов обеспечения однородности и отбора проб для анализа, представлены в табл. 2-4.

Таблица 2. Максимальные расхождения в содержании первого компонента (антиобледенительные добавки) в образцах.

Table 2. Maximum deviations for the 1st component (anti-icing additives) in samples

Традиционное смешивание		Детерминированное формирование однородности	
0-2 ч	10%	0-2 ч	2%
2-4 ч	3%	2-4 ч	2%
4-6 ч	4%	4-6 ч	2%

$$N_{y_{min}}^T = 1.5.$$

$$N_{y_{max}}^T = 5.0.$$

Таблица 3. Предельные отклонения концентрации второго компонента (цемент) в образцах

Table 3. Maximum deviations for the 2nd component (cement) in samples

Традиционное смешивание		Детерминированное формирование однородности	
0-2 ч	32%	0-2 ч	4%
2-4 ч	7%	2-4 ч	4%
4-6 ч	5%	4-6 ч	3%

$$N_{y_{min}}^T = 1.25.$$

$$N_{y_{max}}^T = 10.7.$$

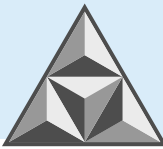
Таблица 4. Предельные расхождения в процентном содержании наполнителя (песчано-гравийная смесь) в образцах

Table 4. Maximum deviations for filler (sand-gravel mixture) in samples

Традиционное смешивание		Детерминированное формирование однородности	
0-2 ч	42%	0-2 ч	4%
2-4 ч	9%	2-4 ч	3%
4-6 ч	5%	4-6 ч	2%

$$N_{y_{min}}^T = 1.25.$$

$$N_{y_{max}}^T = 21.0.$$



Для композитных бетонов, когда качество с использованием двух ключевых компонентов и наполнителя улучшается в диапазоне 1.25-21.00 раз, была проведена проверка критерия оценки потребительских свойств готового строительного материала с доверительной вероятностью $p_{\xi} = 0.95$ и отклонением концентраций не более $\delta_{\xi} = 0.1-0.2$. При этом соотношение компонентов составляет до 1:10.

ВЫВОДЫ

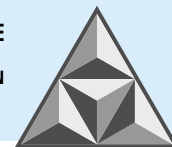
Технология, позволяющая создавать однородные смеси с заданными характеристиками, и оборудование, которое ее реализует, предоставляют возможность получать строительные композиты более высокого качества. Соотношение компонентов в таких смесях может быть от 1:20 и выше. При этом использование нонмиксеров исключает дополнительное пыление и нагрев.

Степень однородности смеси после детерминированного формирования повышается в 2.0-2.5 раз, а энергетические затраты снижаются втрое за счет исключения длительной операции смешивания компонентов. Производительность труда увеличивается в 2.0-2.5 раз благодаря сокращению технологической цепочки и трудоемкости процессов. Кроме того, комплексы могут быстро перенастраиваться, что исключает необходимость очистки емкостей, применяемых для выпуска строительных смесей.

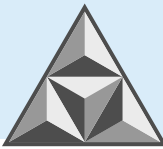
В дальнейшем необходимо разрабатывать новые конструкции технологических машин, что обеспечит более высокую эффективность использования смесей и строительных композитов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Александровский А.А., Кузнецов К.Н.** Исследование процесса смешения гетерогенных композиций. ЦНИИНТИ, 1973.
2. **Евсеев А.В.** Теория и оборудование детерминированного формирования однородности гетерогенных смесей: дисс. ... д-ра техн. наук. Тула, 2021. 297 с.
3. **Краснов И.Н., Филин В.М., Глобин А.Н., Ладугин Е.А.** Производство комбикормов в условиях личных подсобных и фермерских хозяйств: монография. ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. 228 с.
4. **Макаров Ю. И.** Процессы и аппараты химической техники: учеб. пособие. М.: МИХМ. 1977. С. 143-148.
5. **Vasin S.A., Evseev A.V., Malikov A.A.** Some aspects of the production of high-performance composite mixtures and materials // *Tsvetnye Metally*. 2022. № 6. P. 51-58.
6. **Васин С.А., Евсеев А.В., Юраскова И.А.** Некоторые аспекты производства модифицированных композитных материалов и изделий с их использованием // *Вестник Тульского государственного университета «Проблемы и перспективы развития автоматизации технологических процессов»*. 2023. С. 145-149.
7. **Бакин М.Н., Капранова А.Б., Верлока И.И.** Современные методы математического описания процесса смешивания сыпучих материалов // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 5 (5). С. 923-927.
8. **Юраскова И.А.** Повышение качества смесей и композитов, сформированных дискретными дозаторами конвейерного нонмиксера // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. № 5. С. 541-543. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-541-542.
9. **Капранова А.Б., Бакин М.Н., Верлока И.И., Зайцев А.И.** Способы описания движения твердых дисперсных сред в различных плоскостях для сечений смесительного барабана // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2015. Т. 21. № 2. С. 296-304.
10. **Kapranova A.B., Verloka I. I.** The study of the volume fraction of key component in the second phase of the portion mixing by means of the device of gravity type // *J. Chem. Eng. Process Technol.* № 8 (5). P. 59. DOI: 10.4172/2157-7048-C1-009.
11. **Макаров Ю. И.** Аппараты для смешения сыпучих материалов. М: Машиностроение. 1973. 215 с.
12. **Чувпило А.В.** Новое в теории и технике приготовления порошковых смесей. ВНИИЭМ. 1964. 72 с.



13. **Александровский А.А.** Исследование процесса смешения и разработка аппаратуры для приготовления композиций, содержащих твердую фазу: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Казань, 1976. 48 с.
14. **Кольман-Иванов Э.Э.** Машины-автоматы химических производств. М.: Машиностроение. 1972. 408 с.
15. **Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю.** Системный анализ процессов химической технологии. Процессы смешения и измельчения сыпучих материалов. М.: Наука. 1985.
16. **Баранцева Е.А.** Моделирование и оптимизация процессов смешивания сыпучих материалов: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Иваново, 2010. 34 с.
17. **Капранова А.Б.** Деаэрация сыпучих сред в совмещенных со смешением процессах: автореферат дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Иваново, 2009. 33 с.
18. **Кафаров В.В., Глебова М.Б.** Математическое моделирование основных процессов химических производств. М.: Высшая школа, 1991. 400 с.
19. **Wang S., Li C.H.** Application and Development of High-efficiency Abrasive Process // *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2012. № 47. P. 51-64.
20. **Васин С.А., Евсеев А.В., Маликов А.А., Юраскова И.А.** Приготовление смесей гетерогенных компонентов и сред при детерминированном формировании их однородности для создания новых композитных материалов // *Станкоинструмент*. 2023. № 3. С. 52-57. DOI: 10.22184/2499-9407.2023.32.3.52.57.
21. **Васин С.А., Евсеев А.В., Першин В.Ф., Юраскова И.А.** Управление качеством некоторых композитных и гетерогенных материалов модификацией нанокомпонентами // *Вестник РГУПС*. Машиностроение. 2023. № 2. С. 139-145. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_2_139.
22. **Юраскова И.А.** Повышение качества смесей и композитов, сформированных дискретными дозаторами конвейерного нонмиксера // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. № 5. С. 541-543. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-541-542.
23. **Yudaev I.V., Globin A.N., Plotnikova N.V.** Modeling of processes in a screw batcher // *Bulletin of the Lower Volga Agro-University Complex: science and higher professional education*. 2018. № 4 (52). P. 353-360. ISSN 2071-9485.
24. **Sivasubramanian P., Mayandi K., Arumugaprabu V., Rajini N., Rajesh S.** History of Composites and Polymers // *Polymer-Based Composites*. 2021. P. 1-21.
25. **Макаров Ю.И.** Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
26. **Фадин Ю.М., Шеметова О.М.** Применение пневматических смесителей в строительстве // *Механизация и автоматизация строительства*. 2020. С. 250-254.
27. **Тимонин А.С., Балдин Б.Г., Борщев В.Я., Гусев Ю.И.** Машины и аппараты химических производств: учеб. пособие для. Калуга: Издательство Н. Ф. Бочкаревой. 2008. 872 с.
28. **Юраскова И.А.** Классификация способов приготовления гетерогенных смесей и оборудование для их реализации // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 10. С. 482-485. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-482-485
29. **Ахмедпашаев А.У.** Технология изготовления порошковых фасонных фрез холодным прессованием // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2013. С. 46-52.
30. **Бакин М.Н., Верлока И.И., Капранова А.Б.** Об экспериментальных распределениях частиц сыпучих компонентов в разреженных потоках // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 23. № 10. С. 70-72.
31. **Лукаш А.Н., Евсеев А.В., Чувпило А.В.** Развитие технологий и оборудования для приготовления смесей сыпучих материалов // *Известия Тульского государственного университета. Машиностроение*. 2000. № 5. С. 218-224.
32. **Чувпило А.В.** Расчет, конструирование и исследование оборудования производства источников тока. М.: Энергия. 1968. 81 с.
33. **Чувпило А.В.** Время пребывания и эффект продольного смешения металлических и полупроводниковых порошков // *Тезисы докл. отрасл. науч. конф.* 1967. С. 33-35.
34. **Першин В. Ф., Воробьев А. М., Нечаев В. М.** Двухстадийное непрерывное дозирование при производстве и использовании углеродных наноматериалов // *Хим. и нефтегаз. машиностроение*. 2018. № 6. С.12-14.
35. **Evseev A.V., Yuraskova I.A., Chechuga A.O., Kasatkin G.V., Khachlaev T.S.** Mathematical model for optimizing the determination of the number of doses of components dispensed by discrete dispensers to obtain a minimum portion of a mixture with specified probabilistic characteristics on a conveyor nonmixer // *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2023)*. 2023. P. 83-92.

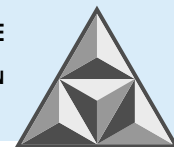


36. Патент № 2271243 Российская Федерация, МКИ 7 B01F23/60. Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации: опубл. 10.03.2006 / Лукаш Александр Николаевич.
37. Патент № 2483790 РФ Российская Федерация, МКИ 7 B01F3/18, B01F7/04. Способ получения смеси из сыпучих компонентов и устройство для его осуществления: опубл. 03.12.2019 / Евсеев Алексей Владимирович.
38. Патент № 2129911 Российская Федерация, МКИ 7 B01F23/60, Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации: опубл. 10.05.1999 / Лукаш Александр Николаевич.
39. Патент № 2542241 Российская Федерация, МКИ 7 B01 F3/18. Способ непрерывного приготовления многокомпонентных смесей сыпучих материалов: опубл. 14.10.2013 / Селиванов Юрий Тимофеевич.
40. Патент № 2804823 Российская Федерация, МКИ 7 B01 F3/18. Устройство для получения смеси из сыпучих компонентов: опубл. 06.10.2023 / Евсеев Алексей Владимирович.
41. Патент № 2708780 Российская Федерация, МПК В 65 G 53/46. Роторный питатель для сыпучего материала: опубл. 11.12.2019 / Евсеев Алексей Владимирович.
42. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023611457. Программа расчёта показателей качества смесей и композитов на основе диаграммы Парето: дата регистр. 19.01.2023 / Евсеев Алексей Владимирович.
43. **Бородулин Д.М.** Повышение эффективности процесса смешивания при получении комбинированных продуктов в смесительных агрегатах центробежного типа: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Кемерово, 2013. 39 с.
44. Патент № 2309841 Российская Федерация, МКИ 7 B01 F3/18. Способ приготовления сухой строительной смеси: опубл. 10.11.2007 / Трофимов Валерий Иванович.
45. Патент № 2363573 Российская Федерация, МКИ 7 B01 F3/18. Устройство для приготовления сухой строительной смеси: опубл. 10.08.2009 / Трофимов Валерий Иванович.
46. **Стренк Ф.** Перемешивание и аппараты с мешалками: под ред. И.А. Шупляка. Л., Химия, 1975. 384 с.
47. **Анциферов С.И.** Повышение эффективности процесса смешивания за счет совершенствования конструкции планетарного смесителя: дисс. ... канд. техн. наук. Белгород, 2017. 187 с.
48. **Khan Z.S., Bussel F.V., Schaber M., Seemann R., Scheel M., Michiel M.D.** High-speed measurement of axial grain transport in a rotating drum // *New Journal of Physics*. 2011. P. 124-129. DOI:10.1088/1367-2630/13/10/105005/
49. **Weinekötter R., Gericke H.** *Mixing of solids // Kluwer academic publishers*. 2000.
50. Официальный сайт компании «АЙРИХ». Каталог смесительного оборудования. URL: <https://www.eirich.ru/ru/tehnologija/smesitelnoe-oborudovanie/> (дата обращения: 18.10.2022).
51. Официальный сайт строительного портала StroyPlus.ru. Российский рынок алмазного инструмента. URL: <https://stroyplus.ru/tehnika-i-oborudovanie/30268/> (дата обращения: 10.02.2024).
52. Официальный сайт Федерального института промышленной собственности – ФИПС, (запрос: «Смесители сыпучих материалов»). URL: <https://fips.ru/iiss/> (дата обращения: 10.02.2024).
53. Официальный сайт Bühler. URL: <https://former.buhlergroup.com/europe/ru/9869.html> (дата обращения: 10.02.2024).
54. Официальный сайт Gericke. URL: <https://www.gerickegroup.com/contact/russia> (дата обращения: 10.02.2024).
55. Официальный сайт ООО «Шанхай» «SIECHI»/ Промышленное оборудование. Продукты и решения для порошковых материалов. URL: <http://siechiindustry.com/ru/products/powder.html> (дата обращения: 10.02.2024).
56. Официальный сайт Uelzener. URL: <https://www.uelzener-ums.de/kontakt/>(дата обращения: 10.02.2024).
57. **Бакин М.Н.** Совершенствование процесса смешивания сыпучих материалов в новом аппарате с подвижной лентой: дисс. ... канд. техн. наук. Ярославль, 2014. 179 с.

Поступила в редакцию 21.10.2024

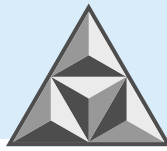
Одобрена после рецензирования 05.12.2024

Принята к опубликованию 12.12.2024

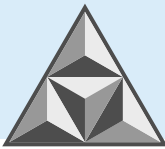


REFERENCES

1. **Aleksandrovsky, A.A. and Kuznetsov, K.N.** (1973), *Issledovanie protsessa smesheniya geterogennykh kompozitsiy* [Study of the process of mixing heterogeneous compositions], CNIINTI, Moscow, USSR (in Russian).
2. **Evseev, A.V.** (2021), "Theory and equipment of deterministic formation of heterogeneous mixtures", D. Sc. dissertation, Machines, units and processes (mechanical engineering), Tula State University, Tula, Russia (in Russian).
3. **Krasnov, I.N., Filin, V.M., Globin, A.N. and Ladygin, E.A.** (2014), *Proizvodstvo kombikormov v usloviyakh lichnykh podsobnykh i fermerskikh hozyajstv: monografiya* [Production of compound feeds in the conditions of personal subsidiary plots and farms]. Azov and Black sea Engineering Institute, Azov, Russia (in Russian).
4. **Makarov, Yu.I.** (1977), *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhniki* [Processes and apparatus of chemical technology], MIHM, Moscow, USSR (in Russian).
5. **Vasin, S.A., Evseev, A.V. and Malikov, A.A.** (2022), "Some aspects of the production of highly effective composite mixtures and materials", *Non-ferrous metals*, no. 6, pp. 51-58.
6. **Vasin, S.A., Evseev, A.V. and Yuraskova, I.A.** (2023), "Some aspects of the modified production of composite materials and products using them", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, pp. 145-149 (in Russian).
7. **Bakin, M.N., Kapranova, A.B. and Verloka, I.I.** (2014), "Modern methods of mathematical description of the process of moving bulk materials", *Fundamental Research*, vol. 5, no.5, pp. 923-927 (in Russian).
8. **Yuraskova, I.A.** (2023), "Improving the quality of mixtures and composites formed by unit dispensers of a conveyor nonmixer", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, no. 5, pp. 541-543 (in Russian).
9. **Kapranova, A.B., Bakin, M.N., Verloka, I.I. and Zaitsev, A.I.** (2015), "Methods for describing the movement of consolidated dispersed media in different planes for sections of drum mixtures", *Izvestiya Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, vol. 21, no. 2, pp. 296-304 (in Russian).
10. **Kapranova, A.B. and Verloka, I.I.** (2020), "Study of the volume fraction of the key component at the second stage of batch mixing using a gravity-type device", *J. Chem. English Process Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 52-57.
11. **Makarov Yu.I.** (1973), *Apparaty dlya smesheniya syuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Mashinostroenie, Moscow, USSR (in Russian).
12. **Chuvpilo, A.V.** (1964), *Novoe v teorii i tekhnike prigotovleniya poroshkovykh smesey* [New in the theory and technology of preparing powder mixtures], VNIIEM, Moscow, USSR (in Russian).
13. **Aleksandrovsky, A.A.** (1976), Research of the mixing process and development of equipment for the preparation of compositions containing a solid phase, Abstract Ph. D. dissertation, Kazan State University, Kazan, Russia (in Russian).
14. **Kolman-Ivanov, E.E.** (1972), *Mashiny-avtomaty himicheskikh proizvodstv* [Automatic machines for food production], Mashinostroenie, Moscow, USSR (in Russian).
15. **Kafarov V.V., Dorokhov I.N. and Arutyunov, S.Yu.** (1985), *Sistemniy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Protsessy smesheniya i izmel'cheniya syuchikh materialov* [System analysis of chemical technology processes. The process of mixing and grinding bulk materials], Nauka, Moscow, USSR (in Russian).
16. **Barantseva, E.A.** (2010), Modeling and optimization of lubricant supply processes. Abstract Ph. D. dissertation, Ivanovo State University, Ivanovo, Russia (in Russian).
17. **Kapranova, A.B.** (2009), Deaeration of granular media in processes combined with mixing. Abstract of D. Sc. Dissertation, Ivanovo State University, Ivanovo, Russia (in Russian).
18. **Kafarov, V.V. and Glebova, M.B.** (1991), *Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh protsessov khimicheskikh proizvodstv* [Mathematical modeling of the main processes of chemical production], Vysshaya shkola, Moscow, USSR (in Russian).
19. **Wang, S. and Lee, C.H.** (2012), "Application and development of a highly efficient abrasive process", *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 47, pp. 51-64.
20. **Vasin, S.A., Evseev, A.V., Malikov, A.A. and Yuraskova, I.A.** (2023), "Preparation of mixtures of heterogeneous components and agents with a deterministic approximation of their sources for the creation of new composite materials", *Stankoinstrument*, no. 3, pp. 52-57 (in Russian).



21. **Vasin, S.A., Evseev, A.V., Pershin, V.F. and Yuraskova, I.A.** (2023), "Quality control of some composite and heterogeneous materials by modification of nanocomponents", *Vestnik RGUPS. Mashinostroenie*, no. 2, pp. 139-145 (in Russian).
22. **Yuraskova, I.A.** (2023), "Improving the quality of mixtures and composites formed by unit dispensers of a conveyor nonmixer", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, no. 5, pp. 541-543 (in Russian).
23. **Yudaev, I.V., Globin, A.N. and Plotnikova, N.V.** (2018), "Modeling of processes in a screw feeder", *Bulletin of the Nizhnevolszhsy agricultural university complex: science and higher professional education*, vol. 4, no. 52, pp. 353-360. ISSN 2071-9485 (in Russian).
24. **Sivasubramanian, P., Mayandi, K., Arumugaprabu, V., Rajini, N., and Rajesh S.** (2021), "History of composites and polymers", *Polymer-based composites*, pp. 1-21.
25. **Makarov, Yu.I.** (1973), *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials]. Mashinostroenie, Moscow, USSR (in Russian).
26. **Fadin, Yu.M. and Shemetova, O.M.** (2020), "Application of pneumatic mixers in construction", *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya stroitel'stva*, pp. 250-254 (in Russian).
27. **Timonin, A.S., Baldin, B.G., Borshchev, V.Ya. and Gusev, Yu.I.** (2008), *Mashiny i apparaty khimicheskikh proizvodstv: ucheb. posobie* [Machines and apparatus for industrial production], Publishing house N.F. Bochkarev, Kaluga, Russia (in Russian).
28. **Yuraskova, I.A.** (2022), "Classification Methods for preparing heterogeneous mixtures and equipment for their implementation", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, no. 10, pp. 482-485 (in Russian).
29. **Akhmedpashaev, A.U.** (2013), "Technology for manufacturing powder shaped cutters by cold pressing", *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, pp. 46-52 (in Russian).
30. **Bakin, M.N., Verloka, I.I. and Kapranova, A.B.** (2015), "On experimental distributions of particles of bulk components in rarefied flows", *Izv. vuzov. Khim. i khim. tekhnologiya*, vol. 23, no. 10, pp. 70-72 (in Russian).
31. **Lukash, A.N., Evseev, A.V. and Chuvpilo, A.V.** (2000), "Development of technologies and equipment for the preparation of mixtures of bulk materials", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Mashinostroenie*, no. 5, pp. 218-224 (in Russian).
32. **Chuvpilo, A.V.** (1968), *Raschet, konstruirovaniye i issledovaniye oborudovaniya proizvodstva istochnikov toka* [Calculation, design and research of equipment for the production of current sources], Energiya, Moscow, USSR (in Russian).
33. **Chuvpilo, A.V.** (1967), "Residence time and the effect of longitudinal mixing of metal and semiconductor powders", *Abstracts of reports of an industry scientific conference*, pp. 33-35 (in Russian).
34. **Pershin, V.F., Vorobyov, A.M. and Nechaev, V.M.** (2018), "Two-stage continuous dosing in the production and use of carbon nanomaterials", *Khim. i neftegaz. mashinostroenie*, no. 6, pp. 12-14 (in Russian).
35. **Evseev, A.V., Yuraskova, I.A., Chechuga, A.O., Kasatkin, G.V., and Khachlaev, T.S.** (2023), "Mathematical model for optimizing the determination of the number of doses of components dispensed by discrete dispensers to obtain a minimum portion of a mixture with specified probabilistic characteristics on a conveyor nonmixer", *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering*, Sochi, Russia, May, 2023, pp. 83-92 (in Russian).
36. **Lukash, A.N., Evseev, A.V., Ovchinnikova, T.A., Vlasov, K.V. and Karpukhina, O.V.**, Tula State University (2006), *Sposob smesheniya sypuchikh komponentov i ustrojstvo dlya ego realizatsii* [Method of mixing bulk components and device for its implementation], Tula, RU, Pat. 2271243 (in Russian).
37. **Evseev, A.V.**, Tula State University (2019), *Sposob polucheniya smesi iz sypuchikh komponentov i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for producing a mixture of bulk components and a device for its implementation], Tula, RU, Pat. 2483790 (in Russian).
38. **Lukash, A.N., Klusov, I.A. and Evseev, A.V.**, Tula State University (1999), *Sposob smesheniya sypuchikh komponentov i ustrojstvo dlya ego realizatsii* [A method for mixing bulk components and a device for its implementation], Tula, RU, Pat. 2129911 (in Russian).
39. **Selivanov, Yu.T., Pershin, V.F. and Polyakov, B.E.**, Tula State University (2013) *Sposob nepreryvnogo prigotovleniya mnogokomponentnykh smesey sypuchikh materialov* [Method for continuous preparation of multicomponent mixtures of bulk materials], Tula, RU, Pat. 2542241 (in Russian).

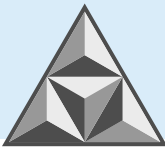


40. **Evseev, A.V., Vasin, S.A., Pershin, V.F., Kitanina, T.I. and Yuraskova, I.A.**, Tula State University (2023), *Ustrojstvo dlya polucheniya smesi iz sypuchikh komponentov* [Device for producing a mixture of bulk components], Tula, RU, Pat. 2804823.
41. **Evseev, A.V.**, Tula State University (2019) *Rotorniy pitatel' dlya sypuchego materiala* [Rotary feeder for bulk material], Tula, RU, Pat. 2708780.
42. **Evseev, A.V., Vasin, S.A., Blagoveshchensky, D.I., Kozlovsky, V.N., Kitanina, T.I. and Yuraskova, I.A.**, Tula State University (2023), *Programma raschyota pokazatelej kachestva smesey i kompozitov na osnove diagrammy Pareto* [Program for calculating quality indicators of mixtures and composites based on the Pareto diagram], Tula, RU, program 2023611457 (in Russian).
43. **Borodulin, D.M.** (2013), Increasing the efficiency of the mixing process when obtaining combined products in centrifugal mixing units, Abstract of D. Sc. Dissertation, Processes and apparatuses of the food industry, Kemerovo Technological Institute of Food Industry, Kemerovo, Russia (in Russian).
44. **Trofimov, V.I. and Lebedev, V.E.**, Tula State University (2007), *Sposob prigotovleniya suhoj stroitel'noj smesi* [Method for preparing dry building mixture], Tula, RU, Pat. 2309841 (in Russian).
45. **Trofimov, V.I., Smirnov, M.A., Lebedev, V.E., Chugreev, A.A. and Kalinin, I.S.**, Tula State University (2009), *Ustrojstvo dlya prigotovleniya suhoj stroitel'noj smesi* [Device for preparing dry construction mixture], Tula, RU, Pat. 2363573 (in Russian).
46. **Strenk, F.** (1975), *Peremeshivanie i apparaty s meshalkami* [Stirring and apparatus with mixers], transl. from Polish, ed. by I.A. Szczypliyak, Khimiya, Leningrad, USSR (in Russian).
47. **Antsiferov, S.I.** (2017), "Increasing the efficiency of the mixing process by improving the design of a planetary mixer", Ph.D. dissertation, Machines, units and processes (construction, housing, and utilities), Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia (in Russian).
48. **Khan, Z.S., Bussel, F.V., Schaber, M., Seemann, R., Scheel, M. and Michiel, M.D.** (2011), "High-speed measurement of axial grain transport in a rotating drum", *New Journal of Physics*, pp. 124-129 (in Russian).
49. **Weinekötter, R. and Gericke, H.** (2000), *Mixing of solids*, Kluwer academic publishers.
50. The official site Eirich (2024), "Mixing equipment catalogue", available at: URL: <https://www.eirich.ru/ru/tehnologija/smesitelnoe-oborudovanie/> (Accessed 18 Feb. 2024).
51. The official site StroyPlus.ru (2024), "Russian market of diamond tools", available at: <https://stroyplus.ru/tehnika-i-oborudovanie/30268/> (Accessed 10 Feb. 2024).
52. Official website of the Federal Institute of Industrial Property (2024), "(enquiry: 'Bulk material mixers')", available at: <https://fips.ru/iiss/> (Accessed 10 Feb. 2024).
53. The official site Bühler (2024), available at: <https://former.buhlergroup.com/europe/ru/9869.html> (Accessed 10 Feb. 2024).
54. The official site Gericke (2024), available at: <https://www.gerickegroup.com/contact/russia> (Accessed 10 Feb. 2024).
55. The official site Shanghai Ltd. Siechi (2024), "Industrial equipment. Products and solutions for powder materials", available at: <http://siechiindustry.com/ru/products/powder.html> (Accessed 10 Feb 2024).
56. The official site Uelzener (2024), available at: <https://www.uelzener-ums.de/kontakt> (Accessed 10 Feb. 2024).
57. **Bakin, M.N.** (2014), Improving the process of mixing bulk materials in a new apparatus with a moving belt, Ph. D. dissertation, Processes and apparatuses of chemical technologies, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia.

Received 21.10.2024

Approved 05.12.2024

Accepted 12.12.2024



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.168 : 666.9.013

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-75-89

Опытно-промышленная линия производства гранулированной асфальтобетонной смеси

Д.В. Герасимов^{1,*}, А.А. Игнатьев²

Денис Владимирович Герасимов*

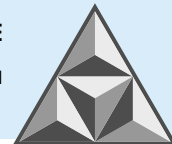
¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*geras930@mail.ru**

Игнатьев Алексей Александрович

²ФАУ «Российский дорожный научно-исследовательский институт», Москва, Российская Федерация

alexassis@ya.ru



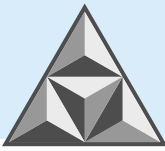
Описаны результаты расчета опытно-промышленной линии производства гранулированной асфальтобетонной смеси с включением в состав фосфогипса и вторичного полиэтилентерефталата. Предложен метод смешивания компонентов асфальтобетонной смеси – гранулирование окатыванием. Подобраны производственные узлы опытно-промышленной линии, даны рекомендации по минимально-допустимым эксплуатационным характеристикам оборудования. Разработан краткий технологический регламент производства продукции, определена энерго- и ресурсоемкость производства, что позволило рассчитать потребность в кадровых ресурсах, средствах механизации и определить стоимость целевого материала. Представленные данные являются исчерпывающими для составления технического задания на проектирование опытно-промышленной линии производства, определения ее стоимостных параметров, что дает возможность всесторонне охарактеризовать разработанный дорожный материал как с точки зрения уровня технико-эксплуатационных показателей, так и с экономических позиций. Расширены представления о способах производства асфальтобетонных смесей и сырьевой базе дорожного строительства.

Ключевые слова: гранулированная асфальтобетонная смесь, окатывание, фосфогипс, вторичный полиэтилентерефталат, асфальтобетонный завод

Для цитирования:

Герасимов Д.В., Игнатъев А.А. Опытно-промышленная линия производства гранулированной асфальтобетонной смеси // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 75-89.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-75-89



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-75-89

Pilot production line for granulated asphalt concrete mix production

D.V. Gerasimov^{1,*}, A.A. Ignatyev²

Denis Vladimirovich Gerasimov*

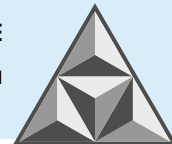
¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

*geras930@mail.ru**

Aleksey Aleksandrovich Ignatyev

²Russian Road Research Institute, Moscow, Russian Federation

alexassis@ya.ru



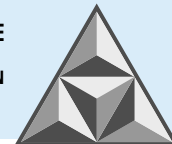
The paper presents the results of calculation of a pilot production line for granulated asphalt concrete mixture with inclusion of phosphogypsum and secondary polyethylene terephthalate. The authors propose a method of mixing asphalt mixture components by pelletising. The authors selected the production units of the pilot line, gave recommendations on the minimum permissible technical and operational characteristics of the equipment. The authors have developed a brief technological regulation of production, energy and resource intensity of production was determined. In addition, it allowed them to calculate the need for human resources, means of mechanisation and determine the cost characteristics of the target material. The presented data are quite complete for drawing up the terms of reference for designing a pilot production line and determining its cost parameters. This makes it possible to comprehensively characterise the developed road material both from the point of view of the level of technical and operational indicators and from the economic point of view. The paper expands the understanding of the methods of production of asphalt concrete mixtures and the raw material base of road construction.

Keywords: granulated asphalt concrete mix, pelletising, phosphogypsum, secondary polyethylene terephthalate, asphalt mixing plant

For citation:

Gerasimov D.V., Ignatyev A.A. Pilot production line for granulated asphalt concrete mix production // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 4. P. 75-89.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-75-89



ВВЕДЕНИЕ

Разработка любого материала для дорожного строительства является комплексной задачей [1]. Корреляционные зависимости состава и целевых свойств, полученные в ходе математического моделирования, а также обоснование физико-химических процессов структурообразования окажутся бесполезны, если отсутствует возможность промышленного производства. Опираясь на объемы разработок в лабораторных условиях, проблематично с высокой точностью определить стоимость дорожного материала. В условиях рыночной экономики превосходство технико-эксплуатационных его характеристик над аналогами может оказаться недостаточным, так как в цепи «цена – качество» первый фактор очень часто превалирует.

Одностадийный переход от лабораторной стадии производства материала к предсерийному прототипу и промышленному образцу порой неосуществим по ряду причин [2, 3], среди которых отметим:

- отсутствие возможности масштабирования (увеличения размеров узлов и агрегатов) ввиду существенного конструктивного различия лабораторного и производственного оборудования, что влечет за собой необходимость отладки процесса при ином аппаратурном исполнении;

- отсутствие данных о точных технико-эксплуатационных характеристиках производственных узлов и агрегатов промышленного типа требует крупномасштабных доработок дорогостоящего полногабаритного оборудования параллельно с ходом производственного процесса или полной его приостановкой на длительный срок.

Последствия финансовых и репутационных рисков в случае одностадийного перехода многократно возрастают. Как правило, требуется организовать опытно-промышленное производство [4]. Для опытно-промышленной линии обычно необходимо использование промышленных образцов оборудования, но с учетом минимизации габаритов и уровня производительности.

Основными задачами создания опытно-промышленной линии производства строительного дорожного материала являются [4]:

- отладка технологических процессов изготовления дорожного материала с преимущественно механизированной производственной цепочкой на промышленном оборудовании и допуском ручного вмешательства с целью снижения затрат на дорогостоящие узлы, несущественно влияющие на общую производительность и качество конечного продукта;

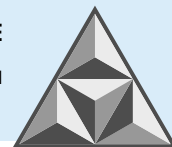
- получение достаточного количества материала для полноценной его апробации в полевых условиях в обстановке рыночной конкуренции;

- сбор и анализ данных об удельных затратах труда, энергетических, финансовых, материальных и прочих ресурсов на производство единицы продукции;

- обоснование совместимости узлов применяемого оборудования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В Ярославском государственном техническом университете с 2019 года ведется разработка нового композиционного материала для дорожного строительства – гранулированной асфальтобетонной смеси (ГАБС), в состав которой включены промышленные и бытовые отходы – фосфогипс и вторичный полиэтилентерефталат (рис. 1). Этот материал и технология



его получения защищены патентами Российской Федерации № 2701007 [5] и № 2762177 [6]. Отличительной особенностью материала, помимо использования в составе фосфогипса и вторичного полиэтилентерефталата, является предложенный в [5, 6] подход к смешиванию компонентов – гранулирование окатыванием. Применение дорожного материала оказывается возможным как в холодном (20°C), так и горячем состоянии (120°C) без изменения его компонентного состава (см. табл. 1).



Рис. 1. Гранулированная асфальтобетонная смесь
Fig. 1. Granulated asphalt concrete mixture

Таблица 1. Компонентный состав гранулированной асфальтобетонной смеси

Table 1. Component composition of granulated asphalt concrete mixture

Структурный элемент / наименование материала	Содержание от общей массы смеси, %
Крупный каменный заполнитель / щебень габбро-диабаз фр. 5-8 мм по ГОСТ 32703-2014	58.7
Мелкодисперсный заполнитель / фосфогипс типа Б по ТУ 2141-693-00209438-2015	31.3
Модифицированное вторичным полиэтилентерефталатом битумное вяжущее на основе БНД 60/90 по ГОСТ 22249-90 (10% ПЭТФ от общей массы вяжущего)	10.0

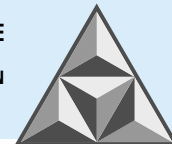
Смесь в холодном состоянии не проявляет склонности к сегрегации и слеживаемости, может храниться и транспортироваться в негерметичной таре, что в совокупности с прогнозируемой стоимостью является конкурентным преимуществом в сравнении с традиционными холодными асфальтобетонными смесями.

При условии успешного внедрения указанные особенности позволяют судить о возможности расширения сырьевой базы производства асфальтобетонных смесей, с попутным извлечением пользы за счет утилизации указанных отходов безвредным для окружающей среды способом, а также о расширении теоретических представлений о способах смешивания компонентов асфальтобетонных смесей.

Разработка гранулированной асфальтобетонной смеси – поэтапный процесс; теоретические и экспериментальные результаты, полученные в ходе исследований, представлены циклом публикаций [7-10]. Однако технологические аспекты требуют дополнительной углубленной проработки. Руководствуясь определенными на предыдущих этапах исследования технологическими параметрами процесса изготовления дорожного материала, сформулирована цель – разработка научно-обоснованного технологического решения производства гранулированной асфальтобетонной смеси (ГАБС) в опытно-промышленных условиях, на основе чего появляется возможность определить ее основные технико-экономические параметры.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать современный опыт производства асфальтобетонных смесей и возможные пути модернизации асфальтобетонных заводов;
- провести анализ рынка производственного оборудования для получения асфальтобетонных смесей и их компонентов, определить узлы и агрегаты



опытно-промышленной линии, представить рекомендации по минимально допустимым технико-эксплуатационным характеристикам аппаратов;

– разработать основы технологического регламента производства ГАБС, оценить энерго- и ресурсоемкость производства, потребность в средствах механизации для получения качественного дорожного материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НАУКОМЕТРИЧЕСКИХ БАЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ наукометрических баз показал высокую публикационную активность по результатам изысканий, описывающим особенности определения рациональных рецептурных и технологических параметров процесса получения материалов-аналогов, физико-химических процессов их структурообразования, но исключительно в лабораторных условиях. Однако в рамках настоящего исследования интерес представляют именно технологические аспекты – механизированная подготовка сырья для дорожного строительства (сушка, фракционирование, дозирование и т.д.), процессы смешивания компонентов асфальтобетонных смесей, автоматизация циклов, процессы фасовки и отгрузки готового продукта. Данные задачи, кроме проектирования и строительства дорог, являются предметом интереса и других научных специальностей, в частности, 2.6.13 «Процессы и аппараты химических технологий» и 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», то есть находятся «на стыке» как минимум трех специальностей.

Интерес научного сообщества к решению прикладных задач в области дорожного строительства на данный момент довольно слабый и в основном заключается не в поиске принципиально новых технологических решений, а в модернизации и оптимизации существующих технологий за счет следующих факторов:

– повышение качественных характеристик асфальтобетонных смесей и сырьевых материалов путем их модифицирования и получения полимерных битумных вяжущих (ПБВ), в том числе с включением полимерных бытовых отходов [11-13];

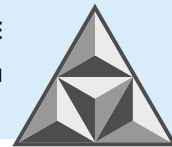
– снижение негативного влияния таких смесей на окружающую среду [14, 15];

– снижение производственных издержек и повышение качества продукции за счет автоматизации производственных процессов, внедрения Искусственного Интеллекта (AI) и Интернета Вещей (IoT) [16-18];

– регенерация асфальтобетонных смесей по горячей технологии на заводе [19, 20].

По результатам анализа публикаций можно заключить:

а) Отрасль производства асфальтобетонных смесей весьма консервативна, но поступательно эволюционирует. Качественный прорыв с существенным улучшением характеристик продукции, расширением сырьевой базы, снижением затрат и повышением экологичности производства за последние 10-20 лет не зафиксирован. Однако описанные целевые показатели неуклонно улучшаются. Для большинства базовых операций технологического цикла (хранение/погрузка/транспортировка, дробление, рассев и сушка минеральных материалов, дозирование, смешивание компонентов, фасовка/погрузка готовой продукции) используется традиционное оборудование, которое базируется на принципах, выработанных более 100 лет назад. В конструктивном исполнении преобладает модульная компоновка, включающая блоки подготовки крупного и мелкого минерального заполнителя с



системами сушки, обеспыливания и дозирования, блок подготовки органического вяжущего, асфальтосмесительную установку, блок хранения и фасовки готовой продукции. Большинство инновационных решений по изменению устройства узлов и агрегатов технологического цикла связано с производством модифицированных битумных вяжущих, поскольку практика введения полимерных модификаторов достаточно нова, а модификаторы отличаются разнообразием. Активность внедрения модификаторов на основе полимерных бытовых отходов интенсифицирует процесс развития установок и способов производства ПБВ. Использование подобного сырья, нетипичного для отрасли, влечет за собой необходимость разработки узлов и установок, основанных на новых принципах.

б) Наибольшим потенциалом обладают разработки в сфере автоматизации и внедрения информационных технологий (AI, IoT и т.д.). Именно они в краткосрочной перспективе способны привести к революции в производстве асфальтобетонных смесей. Однако данное направление разработок может привести к усложнению и росту стоимости работ при внедрении нового материала в производство на начальных стадиях.

Возможность производства ГАБС на стандартно укомплектованном асфальтобетонном заводе исключена. Поскольку по грубым подсчетам, около 25% узлов необходимо заменить (блок асфальтосмесительной установки), примерно 45% – модернизировать (блок подготовки модифицированного вяжущего, блок подготовки мелкого минерального заполнителя – фосфогипса и блок фасовки готовой продукции) и около 15% процентов – необходимо перереконструировать.

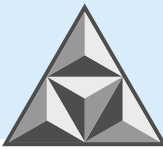
В ходе проектирования опытно-промышленной линии производства ГАБС важно руководствоваться следующими принципами:

- приоритет использования для производства асфальтобетонных смесей типовых узлов и агрегатов отечественного производства;
- приоритет использования максимально возможной доли механизированных и автоматизированных технологических операций;
- возможность внедрения в технологический процесс ручных операций допускается, но не в ущерб производительности и качеству конечной продукции;
- подбор узлов и агрегатов необходимо вести на основе принципов совместимости и рационального соотношения «цена – габариты – производительность» как для отдельного узла и агрегата, так и для линии производства дорожно-строительных материалов (ДСМ).

Опытно-промышленную линию необходимо поделить на пять блоков:

- три блока подготовки сырьевых компонентов – крупного и мелкого минерального заполнителя, а также модифицированного битумного вяжущего;
- блок гранулирования материала;
- блок фасовки ГАБС.

Определены конкретные марки узлов и агрегатов опытно-промышленной линии. Основным является блок гранулирования материала. В качестве приоритетной выбрана тарельчатая конструкция гранулятора «Т-150М» производства «Дзержинсктехномаш». В результате договоренностей с производителем установлена возможность его доукомплектации термоизолированной рубашкой с технологическими отверстиями для введения основных компонентов материала. Подогрев тарели предусмотрен газовой горелкой «КП-25Б». Расчетная часовая производительность блока – 1 т продукции при четырех циклах грануляции по 250 кг.



На рис. 2 представлен блок подготовки крупного каменного заполнителя.

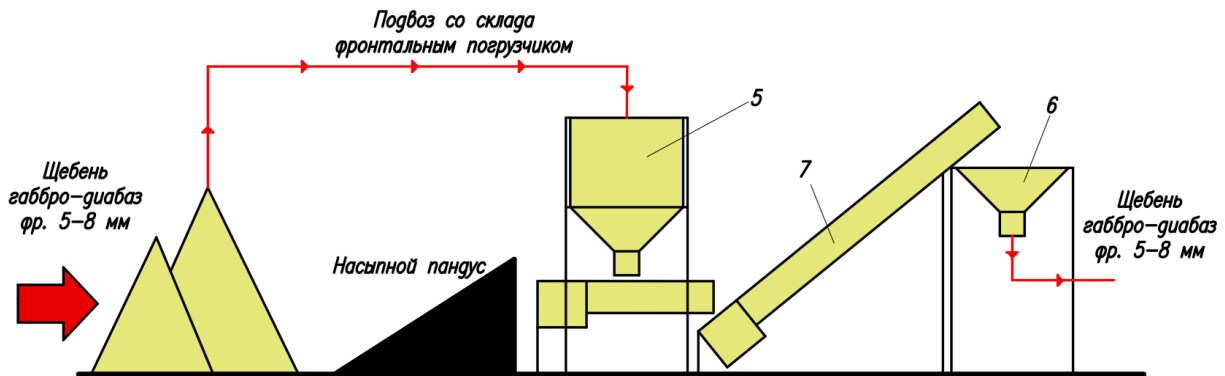


Рис. 2. Блок подготовки крупного каменного заполнителя

Fig. 2. Coarse aggregate preparation unit

Отметим отдельно, что цифры на рис. 2-5 представлены не по порядку, а в соответствии с нумерацией, данной на общей технологической схеме.

Щебень складировать на складе дорожно-строительных материалов производственного комплекса площадью 147.6 м² для обеспечения бесперебойной работы опытно-промышленной линии на протяжении 21 рабочей смены.

Щебень один раз в смену (8 ч) грузят фронтальным погрузчиком по насыпному пандусу ($h = 1.5$ м) в бункер хранения инертных материалов с ленточным питателем БП-ЛП (поз. 5). Затем при открытии шиберной заслонки и включении вибропобудителя он попадает на питатель ЛК-С-Ж-Ш-500-6000-219-НФ-NMRV075 (поз. 7), установленный под углом 30°, и поднимается на высоту 4.0 м в весовой бункер-дозатор (поз. 6) до заполнения его одной порцией щебня, необходимой для грануляции ($m = 149.6$ кг).

На рис. 3 представлен блок подготовки мелкого минерального заполнителя.

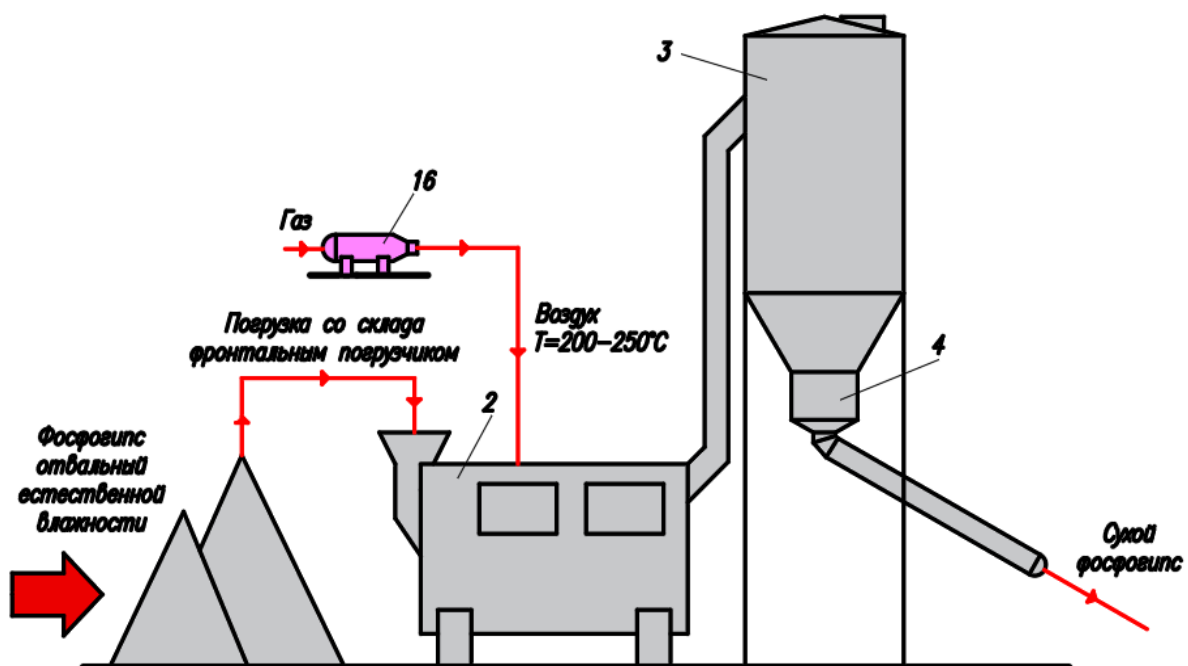
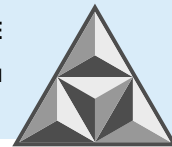


Рис. 3. Блок подготовки мелкого минерального заполнителя

Fig. 3. Fine mineral aggregate preparation unit



Фосфогипс необходимо складировать под тентом на складе производственного комплекса площадью 91.4 м² для обеспечения бесперебойной работы опытно-промышленной линии на протяжении 21 рабочей смены.

Фосфогипс один раз в две смены грузится фронтальным погрузчиком в центрифугальную мельницу-сушилку ЦМС-10 (поз. 2). В нее через горелку КП-25Б (поз. 16) нагнетается газовая среда с температурой (225 ± 25)°С. При рекристаллизации (в полуводный тип Б), а также при снижении влажности (с 25.0-40.0 до 2.5%) или помоле частиц (до размера ≤ 0.016 мм) фосфогипс горячей струей газа переносится на высоту 5.5 м в силос СЦ-8 (поз. 3) и там оседает. Избыточное давление стравливается через фильтр-пылеуловитель силоса. Для одного цикла грануляции фосфогипс взвешивается 4-6 порциями (от 16.3 до 24.5 кг) на бункерных весах «НИВА-6» (поз. 4), заполняемых при открытии шиберной заслонки силоса и включении аэрационного вибропобудителя.

На рис. 4 представлен блок подготовки модифицированного вяжущего.

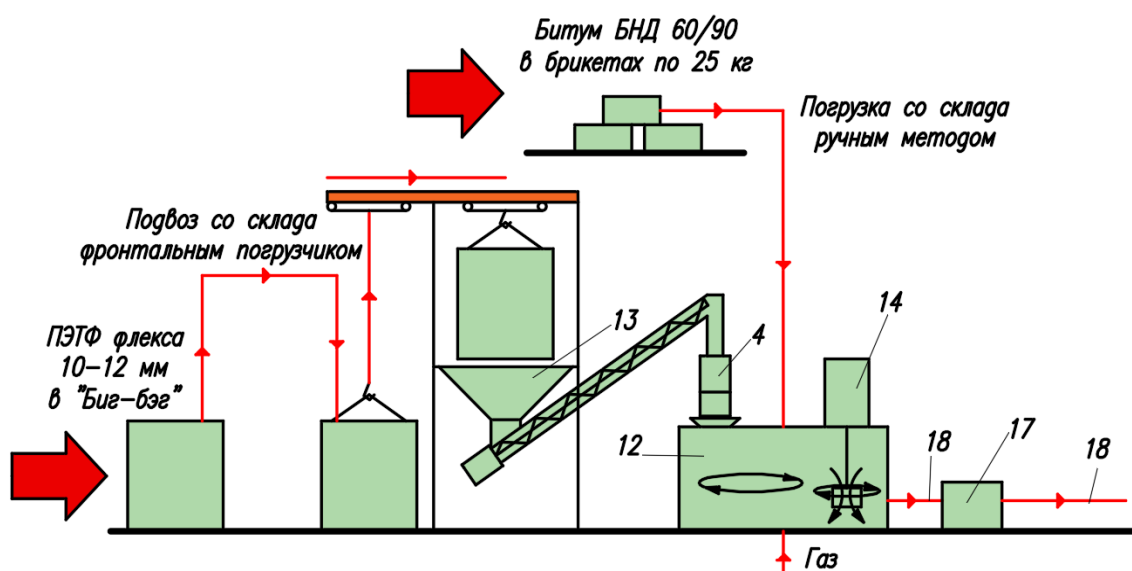
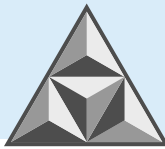


Рис. 4. Блок подготовки модифицированного вяжущего

Fig. 4. Modified binder preparation unit

Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) в виде фракции 10-12 мм (измельченная ПЭТФ-тара) и битум БНД 60/90 в брикетах по 25 кг складировается в мешках «Биг-Бэг» и паллетах на складе производственного комплекса ДСМ площадью соответственно 4.2 и 16.3 м² для обеспечения бесперебойной работы опытно-промышленной линии на протяжении 21 рабочей смены.

«Биг-Бэг», наполненный ПЭТФ-флексой, один раз за шесть смен перемещается погрузчиком к станции растаривания РББ-1 (поз. 13), поднимается лебедкой на роликовом подвесе и растаривается в бункер хранения. Для каждого цикла грануляции (при условии поддержания объема модифицированного вяжущего в битумоварке от 140 до 180 л) ПЭТФ-флекса подается шнековым питателем в бункерные весы «НИВА-6», взвешивается одной порцией ($m = 2.8$ кг) и подается в газовую битумоварку ПК-200 (поз. 12). Совместно с ПЭТФ-флексой ручным методом вносится брикет битума ($m = 25.0$ кг); температура в битумоварке $T_6 = (240 \pm 5)$ °С. Гомогенизация смеси и диспергирование ПЭТФ обеспечивается лопастной мешалкой «УБМ «Битум»» (поз. 14) с частотой вращения вала 1 Гц. По подогреваемому рукаву (поз. 18) модифицированное вяжущее поступает к насосу ДС-215Э (поз. 17) и дозируется 5-7 порциями (от 3.6 до 5.0 кг) в гранулятор.



Процесс грануляции начинается со ввода щебня одной порцией и его термообработки при температуре газовой струи $T_{z.c} = (200 \pm 10)^\circ\text{C}$. Термообработка щебня длится в течение 5-7 мин или до достижения температуры щебня 160°C и влажности 0.5%. Далее производится ввод 5-7 доз модифицированного вяжущего и 4-6 доз фосфогипса при температуре газовой струи $T_{z.c} = (160 \pm 10)^\circ\text{C}$. Температура смеси поддерживается на уровне $T_c = (155 \pm 5)^\circ\text{C}$. Частота вращения гранулятора составляет 0.26 Гц, угол наклона оси к горизонту – 55° ; каждый цикл наката слоя оболочки гранулы занимает от 45 до 60 с.

На рис. 5 представлен блок фасовки гранулированной асфальтобетонной смеси.

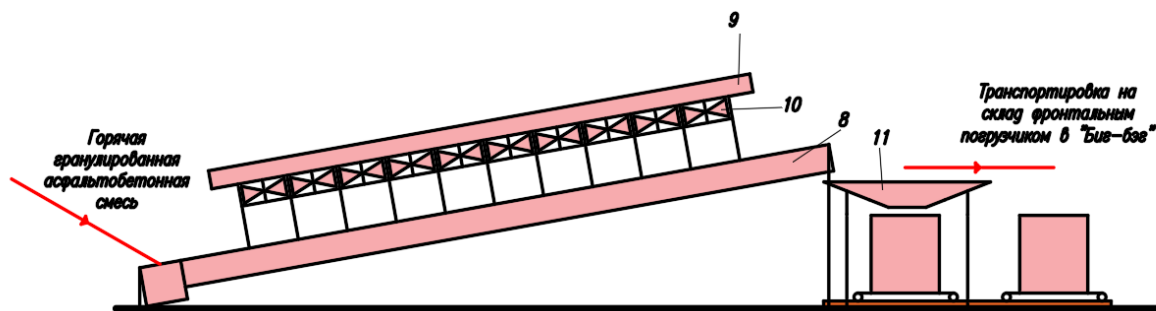


Рис. 5. Блок фасовки гранулированной асфальтобетонной смеси

Fig. 5. Granulated asphalt concrete mix packing unit

Гранулятор выравняется в положение оси 0° к горизонту. Смесь выгружается в течение 1 мин на конвейер ЛК-С-П-Ш-500-10000-NMRV075 (поз. 8), установленный под углом 18° для подъема на высоту 3.1 м идвигающийся со скоростью $2 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$.

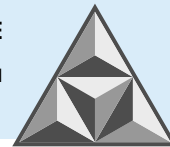
Начиная со второго метра, через каждый 1.0 м на конвейере установлены перелопачивающие брусья с постепенно уменьшающимся просветом между ребром бруса и полотном конвейера (от 70 до 30 мм). Скорость движения ленты конвейера спустя 1 мин с момента начала выгрузки на нее смеси замедляется до $0.55 \text{ м} \cdot \text{мин}^{-1}$. На крытой раме (поз. 9) через 1 м установлены вентиляторы «Элком ВО 06-300» (10 шт.); при этом на пяти первых вентиляторах установлены дождевальные форсунки. Воздействие дождевальных установок и вентиляторов позволяет снизить температуру ГАБС со 155 ± 5 до 50°C .

Смесь падает с отметки 3.1 м в установленную на 0.6 м ниже горловину станции затаривания «Биг-Бэг СЗ-500» серии «СтройПак» (11) с решеткой из арматуры ($d = 8 \text{ мм}$) с шагом 50 мм для разрушения слипшихся гранул. ГАБС дозируется в «Биг-Бэг» по 1000 кг и транспортируется на склад готовой продукции площадью 178.2 м^2 .

Потребность в кадровых ресурсах составляет 4 чел.: директор/бухгалтер, главный инженер-технолог/научный руководитель предприятия, инженер-технолог и оператор-механизатор. Фонд оплаты труда (ФОТ) и отчисления в Социальные фонды рассчитаны исходя из средней заработной платы на производстве по Саратовской области, оцениваемой в 50 тыс. руб.

В качестве необходимого средства механизации определен легкий фронтальный погрузчик на базе МТЗ 82.1 с грузоподъемностью рамы $\geq 1000 \text{ кг}$ и быстросъемным креплением класса В+. Минимальная высота выгрузки составляет 3.5 м.

Ввиду использования газового оборудования рассчитано пиковое потребление газа – $62 \text{ н.м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$. Приоритетным вариантом является природный магистральный газ (метан), с врезкой в газопровод высокого давления ($P = 0.6 \text{ МПа}$, $D = 325 \text{ мм}$), установкой газорегуляторного пункта ГРПШ-НР100/В-У1-ЭК с тремя линиями редуцирования НР100/В и седлом клапана $d = 30 \text{ мм}$. При необходимости может быть организовано независимое снабжение газом (сжиженная пропан-бутановая смесь); при этом одной емкости объемом 50 м^3 достаточно для обеспечения производства на протяжении 21 рабочей смены.



Энергопотребление электрооборудования рассчитано для трех режимов: пиковое – 42.50 кВт·ч⁻¹; среднее – 29.11 кВт·ч⁻¹ (с учетом коэффициента использования); минимальное аварийное – 25.30 кВт·ч⁻¹ (с учетом необходимости завершения технологических операций без риска повреждения оборудования).

Определение стоимостных характеристик материала является связующим звеном между научным поиском и практическим внедрением результатов разработки. Современное представление о подходах к определению стоимости новых материалов в научных публикациях зачастую ограничивается примитивным суммированием цены затраченных сырьевых компонентов на единицу дорожной продукции (в лабораторных условиях). Однако подобная оценка не является релевантной и даже не выражает в полной мере понятия «себестоимость».

Изучение характеристик дорожного строительного материала путем проработки технологии производства в условиях, отличных от лабораторных, позволяет определить себестоимость и спрогнозировать цену.

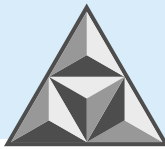
Несомненно, результаты исследования представляют собой эксперимент, моделирующий процесс производства дорожного материала на промышленном оборудовании. Подобная логика дает возможность обнаружить недостатки технологии еще в лабораторных условиях и позволяет создать более жизнеспособный и полезный продукт. Полученные данные являются важными для последующего проектирования и организации промышленного производства ГАБС в реальных условиях, что является основной целью дальнейших исследований в данном направлении.

ВЫВОДЫ

Представленные результаты представляют собой научно-обоснованное техническое и технологическое решение производства гранулированной асфальтобетонной смеси в опытно-промышленных условиях. Разработан комплекс мер, направленных на обеспечение эффективного функционирования опытно-промышленной линии, описан краткий технологический регламент производства, определено функциональное назначение производственного оборудования и его состав, а также согласованы инженерные решения и планировка узлов.

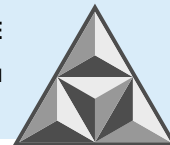
Данные о составе узлов опытно-промышленной линии производства гранулированной асфальтобетонной смеси, потребности в сырье, кадровых и энергоресурсах позволили оценить ее себестоимость на IV квартал 2024 года (5.24 тыс. руб. за 1 т). С учетом рентабельности строительной отрасли (20%) [21] и налога на добавленную стоимость (НДС = 20%), расчетная цена 1 т ГАБС составляет 7.55 тыс. руб. Указанная себестоимость, цена и технико-эксплуатационные характеристики ГАБС (при уплотнении в горячем состоянии при 120°C) сопоставимы с показателями для современных горячих асфальтобетонных смесей.

Согласно анализу рыночных предложений, цена холодных асфальтобетонных смесей варьируется от 14 до 60 тыс. руб. за 1 т; при этом технико-эксплуатационные характеристики холодных асфальтобетонных смесей значительно уступают горячим. Целесообразным представляется применение разработанной ГАБС в холодном состоянии, так как цена ее при $t_{упл} = 20^\circ\text{C}$ в 2-8 раз меньше, при повышенном (в 2.0-2.5 раз) уровне эксплуатационных показателей по сравнению с холодными аналогами. Настоящую разработку предлагается использовать при ремонте покрытий мелкими картами или укладке небольших покрытий на участках с низкой интенсивностью движения.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Королев Е.В.** Перспективы развития строительного материаловедения // *Academia. Архитектура и строительство*. 2020. № 3. С. 143-159. DOI: 10.22337/2077-9038-2020-3-143-159.
2. **Mohsin U.K.** Problems of technology transfer from CSIR laboratories to industry and policy issues in India and Korea // *Социология науки и технологий*. 2012. № 3 (2). P. 51-74.
3. **Morone J., Ivins R.** Problems and Opportunities in Technology Transfer from the National Laboratories to Industry // *Research Management*. 1982. № 25 (3). P. 35-44. DOI: 10.1080/00345334.1982.11756731.
4. **Ширяева Ю.С., Оранова М.В.** Современный взгляд на опытное производство и механизм управления им на промышленном предприятии // *Вестник ННГУ*. 2007. № 6. С. 197-200.
5. Патент № 2701007 Российская Федерация, МПК7 С 04 В 26/26, С 08 L 95/00, С 04 В 18/04, В 09 В 3/00, С 04 В 111/20, С 04 В 111/27. Способ получения асфальтовяжущего на основе фосфогипса: опубл. 24.09.2019 / **Голиков И.В., Готовцев В.М., Игнатъев А.А., Герасимов Д.В.**
6. Патент № 2762177 Российская Федерация, МПК7 С 04 В 26/26, С 08 L 95/00, В 09 В 3/00. Способ получения гранулированной асфальтобетонной смеси на основе дисперсных промышленных и бытовых отходов: опубл. 16.12.2021 / **Герасимов Д.В., Готовцев В.М., Игнатъев А.А.**
7. **Ignatiev A.A., Gerasimov D.V., Golikov I.V., Gotovtsev V.M.** Dispersed-filled composites with a structured nanoscale // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. № 365, p. 032064. DOI: 10.1088/1757-899X/365/3/032064.
8. **Герасимов Д.В., Игнатъев А.А., Готовцев В.М.** Фосфогипс как компонент дисперсно-упрочненного композита на примере гранулированной асфальтобетонной смеси // *Вестник Евразийской науки*. 2020. № 5. С. 35.
9. **Gerasimov D.V., Lebedev A.E., Ignatyev A.A., Murashov A.A.** Research of the petroleum road bitumen modification process with secondary polyethylene terephthalate // *E3S Web of Conferences*. 2023. № 457. P. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202345701013.
10. **Герасимов Д.В.** Прогнозирование гранулометрического состава гранулированной асфальтобетонной смеси // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 65-71. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-817-9-65-71.
11. **Belyaev P.S., Frolov V.A., Makeev P.V., Shachkov I.V. et al.** Equipment design automation at asphalt-concrete production modernization // *Journal of Physics: Conf. Ser. – IOP Publishing*. 2019. № 1260 (3). P. 032004. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032004.
12. **Rudenko A.I., Pidlisna E.A., Terekh M., Nishchik A.P.** Innovative equipment for oil-refining and asphalt-concrete enterprises // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 3. P. 63-70.
13. **Kovács R., Czímerová A., Fonód A., Mandula J.** The Use of Waste Low-Density Polyethylene for the Modification of Asphalt Mixture // *Buildings*. 2024. № 14 (10). P. 3109. DOI: 10.3390/buildings14103109.
14. **Schönauer P., Gruber M.R., Hofko B.** Case study of a batch asphalt mix plant: Energy consumption and emission allocation based on primary data // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. № 21. P. e03669. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03669.
15. **Dos Santos M.B., Candido J., de Souza Baule S., de Oliveira Yu.M.M. et al.** Greenhouse gas emissions and energy consumption in asphalt plants // *Revista Eletrônica Em Gestão Educação e Tecnologia Ambiental*. 2020. № 24. DOI: 10.5902/2236117062662.
16. **Bražiūnas J., Sivilevičius H.** The bitumen batching system's modernization and its effective analysis at the asphalt mixing plant // *Transport*. 2010. № 25 (3). P. 325-335. DOI: 10.5902/2236117062662.
17. **Wang J., Hu Zh., Fu J., Yang F.** Research on Energy Consumption Monitoring and Evaluation Technology for Asphalt Mixing Plants Based on the Internet of Things // *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences*. 2024. № 512 (11). P. 02007. DOI: 10.1051/e3sconf/202451202007.
18. **Uaissova M., Zharlykassov B.** Application of AI Techniques for Asphalt Concrete Mix Production Optimization // *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. 2024. № 57 (2). P. 353. DOI: 10.18280/jesa.570205.
19. **Deef-Allah E., Abdelrahman M.** Interactions between RAP and virgin asphalt binders in field, plant, and lab mixes // *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2022. № 13 (1). P. 231-249. DOI: 10.30574/wjarr.2022.13.1.0744.
20. **Yu X., Li Y.** Optimal percentage of reclaimed asphalt pavement in central plant hot recycling mixture // *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2010. № 25. P. 659-662. DOI: 10.1007/s11595-010-0065-4.



21. **Кондукторов А.С.** О влиянии субподряда на формирование цены объектов, производство (строительство) которых финансируется государством // *Вестник экономической безопасности*. 2020. № 4. С. 40-43. DOI: 10.24411/2414-3995-2020-10227.

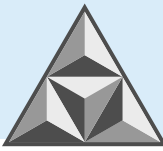
Поступила в редакцию 28.10.2024

Одобрена после рецензирования 26.11.2024

Принята к опубликованию 12.12.2024

REFERENCES

- Korolev, E.V.** (2020), "Prospects for the development of building materials science", *Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]*, vol. 3, pp. 143-159. DOI: 10.22337/2077-9038-2020-3-143-159 (in Russian).
- Mohsin, U.K.** (2012), "Problems of technology transfer from CSIR laboratories to industry and policy issues in India and Korea", *Sotsiologiya nauki i tekhnologii [Sociology of science and technology]*, vol. 3, no. 2, pp. 51-74.
- Morone, J. and Ivins, R.** (1982), "Problems and Opportunities in Technology Transfer from the National Laboratories to Industry", *Research Management*, vol. 25, no. 3, pp. 35-44. DOI: 10.1080/00345334.1982.11756731.
- Shiryayeva, Yu. S. and Oranova, M.V.** (2007), "Modern view of pilot production and its management mechanism at an industrial enterprise", *Vestnik NNGU [Bulletin of NNSU]*, vol. 6, pp. 197-200 (in Russian).
- Golikov, I.V., Gotovtsev, V.M., Ignatiev, A.A. and Gerasimov, D.V.** (2019), A method for producing an asphalt binder based on phosphogypsum, RUS, Patent RF № 2701007.
- Gerasimov, D.V., Gotovtsev, V.M. and Ignatiev, A.A.** (2021), A method for producing a granular asphalt concrete mixture based on dispersed industrial and household waste, RUS, Patent RF № 2762177.
- Ignatiev, A.A., Gerasimov, D.V., Golikov, I.V. and Gotovtsev, V.M.** (2018), "Dispersed-filled composites with a structured nanoscale", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 365, p. 032064. DOI: 10.1088/1757-899X/365/3/032064.
- Gerasimov, D.V., Ignatiev, A.A. and Gotovtsev, V.M.** (2020), "Phosphogypsum as a component of a dispersed-reinforced composite on the example of a granular asphalt concrete mixture", *Vestnik Evrazijskoj nauki [Bulletin of Eurasian Science]*, vol. 5, p. 35 (in Russian).
- Gerasimov, D.V., Lebedev, A.E., Ignatyev, A.A. and Murashov, A.A.** (2023), "Research of the petroleum road bitumen modification process with secondary polyethylene terephthalate", *E3S Web of Conferences*, vol. 457, p. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/202345701013.
- Gerasimov, D.V.** (2023), "Prediction of the granulometric composition of a granular asphalt concrete mixture", *Stroitel'nye materialy [Construction materials]*, no. 9, pp. 65-71. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-817-9-65-71 (in Russian).
- Belyaev, P.S., Frolov, V.A., Makeev, P.V., Shachkov, I.V., Trapeznikov, E.V. and Belyaev, V.P.** (2019), "Equipment desing automation at asphalt-concrete production modernization", *Journal of Physics: Conf. Ser. – IOP Publishing*, vol. 1260, no. 3, p. 032004. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032004.
- Rudenko, A.I., Pidlisna, E.A., Terekh, M. and Nishchik, A.P.** (2018), "Innovative equipment for oil-refining and asphalt-concrete enterprises", *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, vol. 3, pp. 63-70. (in Russian).
- Kovács, R., Czímerová, A., Fonód, A. and Mandula, J.** (2024), "The Use of Waste Low-Density Polyethylene for the Modification of Asphalt Mixture", *Buildings*, vol. 14, no. 10, p. 3109. DOI: 10.3390/buildings14103109.
- Schönauer, P., Gruber, M.R. and Hofko, B.** (2024), "Case study of a batch asphalt mix plant: Energy consumption and emission allocation based on primary data", *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, p. e03669. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03669.
- Dos Santos, M.B., Candido, J., de Souza, Baule S., de Oliveira, Yu.M.M. and Thives, L.P.** (2020), "Greenhouse gas emissions and energy consumption in asphalt plants", *Revista Eletrônica Em Gestão Educação e Tecnologia Ambiental*, vol. 24. DOI: 10.5902/2236117062662.
- Bražiūnas, J. and Sivilevičius, H.** (2010), "The bitumen batching system's modernization and its effective analysis at the asphalt mixing plant", *Transport*, vol. 25, no. 3, pp. 325-335. DOI: 10.5902/2236117062662.
- Wang, J., Hu, Zh., Fu, J. and Yang, F.** (2024), "Research on Energy Consumption Monitoring and Evaluation Technology for Asphalt Mixing Plants Based on the Internet of Things", *E3S Web of Conf. – EDP Sciences*, vol. 512, no. 11, p. 02007. DOI: 10.1051/e3sconf/202451202007.

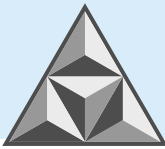


18. **Uaissova, M. and Zharlykassov, B.** (2024), "Application of AI Techniques for Asphalt Concrete Mix Production Optimization", *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 57, no. 2, p. 353. DOI: 10.18280/jesa.570205.
19. **Deef-Allah, E. and Abdelrahman, M.** (2022), "Interactions between RAP and virgin asphalt binders in field, plant, and lab mixes", *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 13, no. 1, pp. 231-249. DOI: 10.30574/wjarr.2022.13.1.0744.
20. **Yu, X. and Li, Y.** (2010), "Optimal percentage of reclaimed asphalt pavement in central plant hot recycling mixture", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed*, vol. 25, pp. 659-662. DOI: 10.1007/s11595-010-0065-4.
21. **Konduktorov, A.S.** (2020), "On the impact of subcontracting on the pricing of facilities whose production (construction) is financed by the state", *Vestnik ekonomicheskoy bezopasnosti [Bulletin of Economic Security]*, no. 4, pp. 40-43. DOI: 10.24411/2414-3995-2020-10227 (in Russian).

Received 28.10.2024

Approved 26.11.2024

Accepted 12.12.2024



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 727.1.054.3

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-90-101

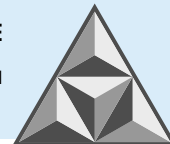
Опыт зарубежных исследований в области акустических архитектурных решений в школах для детей с аутизмом

О.Н. Чеберева, Е.Ю. Стрельникова

Ольга Николаевна Чеберева, Елена Юрьевна Стрельникова*

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород,
Российская Федерация

*chebereva@mail.ru; lena.str.2011@yandex.ru**



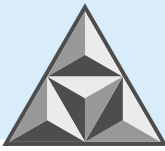
Обучение детей с аутизмом в общеобразовательной школе – новый для России процесс. Его реализация требует от всех вовлеченных специалистов особых знаний и умений, а от архитекторов и проектировщиков – отдельного внимания на любой стадии создания школьного здания: от проекта – до объекта. После грамотных планировочных решений важнейшим элементом является акустический комфорт, создаваемый в учебном и логопедическом кабинетах, а также других помещениях инклюзивного предназначения. Учащиеся с особыми образовательными потребностями, в том числе – аутизмом, имеют высокий уровень чувствительности к шумам с сильными тональными, импульсивными или прерывистыми характеристиками. Корректная контролируемая акустическая среда необходима для сохранения нормотипичного поведения учащихся с аутизмом в школьном пространстве. Показано, что планировочное зонирование следует выполнять согласно исходящим из помещений или попадающим внутрь звуковым колебаниям. Также следует избегать искусственного создания тихой обстановки для учебного процесса. Это обеспечит максимальную интеграцию учащихся в социальные взаимодействия путем суммирования навыков общения в акустически неизменной среде – как внутри школы, так и за ее пределами.

Ключевые слова: архитектура для аутистов, аутизм, инклюзия, акустика в школе, звукоизоляция классов

Для цитирования:

Чеберева О.Н., Стрельникова Е.Ю. Опыт зарубежных исследований в области акустических архитектурных решений в школах для детей с аутизмом // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 90-101. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-90-101



SCIENTIFIC ARTICLE

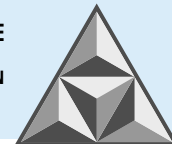
DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-90-101

Case study on acoustic architectural practices in schools for children with autism

O.N. Chebereva, E.Yu. Strelnikova

Olga Nikolaevna Chebereva, Elena Yurievna Strelnikova*

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation
*chebereva@mail.ru; lena.str.2011@yandex.ru**



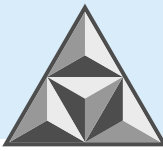
Nowadays, teaching children with autism in secondary schools is a new practice for Russia. Its implementation requires special knowledge and skills from all involved specialists. It also requires special architectural and design practices at all construction stages: from the project to the object itself. After competent planning decisions, the most important element is acoustic comfort in speech therapy and other rooms for inclusive purposes. Students with special educational needs, including autism, have a high level of sensitivity to noise with strong tonal, impulsive, or intermittent characteristics. A correct controlled acoustic environment is necessary to preserve the normotypic behavior of students with autism in the schools. Indeed, we should consider their needs when performing functional zoning and avoid artificial formation of a quiet environment for the learning process. Hence, generalising communication skills in an acoustically unchanged environment will ensure maximum students' integration into social interactions both inside and outside the school.

Keywords: architecture for autistics, autism, inclusion, acoustics in school, sound insulation of classrooms

For citation:

Chebereva O.N., Strelnikova E.Yu. Case study on acoustic architectural practices in schools for children with autism // *Smart Composites in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 4. P. 90-101.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-90-101



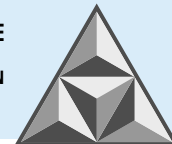
ВВЕДЕНИЕ

Организация качественной архитектурно-планировочной инклюзивной среды образовательного учреждения для учащихся с аутизмом заключается в подборе и сочетании требующихся специализированных кабинетов, классов и пространств [1, 2]. Аутизм, или расстройство аутистического спектра (РАС) – термин, используемый для описания группы расстройств развития центральной нервной системы [3]. В полном названии аутизма есть слово «спектр». Данное понятие определяет многогранность и подчеркивает уникальность каждого индивида, отличается неповторимым сочетанием, глубиной, системностью, наличием и проявлением каждого отдельного признака заболевания. Люди с РАС обладают специфической сенсорной чувствительностью, что влечет за собой ошибки в обработке внешней информации и, как результат, поведение и реакции, отличающиеся от тех, что демонстрирует основное большинство на аналогичные раздражители. Сенсорные стимулы, передаваемые через зрение, осязание, обоняние и вкус, оказывают большое влияние на человека с РАС. Нестандартная для большинства чувствительность может проявляться в гипо- или гиперформе, таких как отказ от выполнения каких-либо действий, побег, агрессия, самостимулирующее деструктивное поведение, нервные срывы, затыкание ушей и т.д. [4, 5].

По наблюдениям специалистов-дефектологов, медиков и родителей детей с РАС, а также с подтверждением многочисленных исследований, максимальным сенсорным раздражителем являются звуковые волны [6, 7]. Институт исследований аутизма в Калифорнии в США еще в 1964-1994 гг. проводил обследование 17 000 детей с РАС в разных странах, и в 40% случаев родители идентифицировали звук как определяющий фактор поведения их детей [8]. М. Каниято провел исследования о влиянии сенсорных составляющих на поведение людей с аутизмом. Он сообщил [8], что в ходе изучения подтвердилось преобладающее воздействие акустики на создание комфортных условий, при этом прямо пропорционально степени тяжести аутизма. М. Каниято также исследовал влияние термогигрометрических и визуальных факторов и доказал, что они вызывали гораздо меньше тревоги и деструктивного поведения [7]. Необходимо отметить, что у людей с аутизмом порог терпимости к сенсорной информации является довольно низким. Звуки, которые обычно игнорируются или легко переносятся, не оказывая воздействия на нейротипичного человека, могут вызвать сильный стресс у представителей изучаемой категории. Поэтому важное значение при проектировании пространств для людей с РАС имеет акустическая составляющая помещения. В настоящей работе предметом исследования является акустическая организация архитекторами помещений образовательного назначения для детей с аутизмом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Регулярные и разнообразные колебания звука в помещении заставляют постоянно работать над идентификацией его составляющих и определением источника. Данная непрерывная работа, часто неосознаваемая, вызывает у нейротипичного индивида напряженность, усталость, снижение концентрации. Для детей с РАС описанная модель имеет более сильные последствия. Если говорить о громких внезапных или пронзительных звуках, которые всегда присутствуют в образовательных учреждениях, Н.И. Шерер отмечает, что таковые чаще всего воспринимаются как вызывающие беспокойство, заставляют людей с аутизмом закрывать уши, кричать, провоцируют стресс, раздражение, страх и тревогу [6]. На этом основании специалисты предполагают, что при регулярном отрицательном опыте взаимодействия с аудиальной стимуляцией у детей с РАС появляется навык избегать



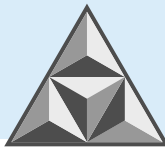
получения слуховой информации, минимизировать ее негативное воздействие на себя [9]. Рассматривая данную модель в разрезе школьного образования, можно полагать, что неверные акустические параметры помещений могут привести к снижению темпов и качества обучения, получаемого в результате восприятия новой информации на слух [10].

К главным источникам шума в школьном пространстве относят:

- шумы из классов и коридоров;
- звуки как результат дорожного движения;
- звуки от работающих систем вентиляции, кухонь, технических помещений; флуоресцентное освещение.

М. Мостафа, профессор дизайна на факультете архитектуры Американского университета в Каире и выдающийся мировой исследователь в области дизайна пространств для лиц с аутизмом, считает акустическую составляющую организации обучения определяющей и наиболее важной. Акустика занимает первое место в Autism Aspectss Index – списке основных принципов проектирования качественной среды для людей с РАС, разработанном этим ученым [11]. Эмпирические исследования подтвердили: за счет снижения уровня шума и эха в обучающих пространствах повышается концентрация внимания и улучшается самостимулирующее поведение детей с РАС. При этом чрезвычайно важно, чтобы акустическую среду можно было корректировать и удерживать в требуемых границах, сводя к минимуму фоновый шум, эхо, реверберацию в помещениях, используемых людьми с РАС. М. Мостафа рекомендует на стадии проектирования зоны с низким и высоким уровнем шума (физкультурный зал, бассейн, актовый зал, кабинеты психомоторной стимуляции) разделять атриумами или внутренними садиками.

М. Мостафа в исследовании акустического влияния на поведение и образование детей проводила эксперимент по улучшению звукоизоляционных свойств логопедического кабинета. В нем на полу, стенах и потолке были смонтированы доступные по стоимости звукоизоляционные материалы, требующие минимального объема и сложности работ и работающие на уменьшение проникновения эха, внешнего шума. Шумомер фиксировал, что средний уровень фонового шума снижался с 65.5 до 52.5 дБ, а коэффициент отражения – с 96 до 57% [12]. Определяющими факторами успешности и результативности эксперимента стали положительные изменения в поведении и овладении знаниями и разговорной речью у учащихся с РАС. Дальнейшие исследования в этом направлении ставили задачу постепенно изменять звукоизоляционные характеристики помещения, не снижая достижений в обучении и интеграции. Постепенно в кабинете убирали акустические плитки и фиксировали при этом, что ученики продолжали поддерживать высокий уровень успеваемости и в частично звуконепроницаемом логопедическом кабинете, что усилило эхо и позволило проникать внешнему шуму в большей степени [12]. Эксперименты М. Мостафы подтвердили, что акустическая модификация помещений – часть общей цели при построении инклюзивного образования, направленной на всестороннее улучшение и развитие навыков ребенка в рамках междисциплинарного подхода. Авторы [12] рекомендуют проектировать несколько кабинетов логопеда с различным уровнем звукоизоляции – от максимально до минимально изолированных. Это позволит плавно адаптировать ребенка к учебе в помещениях школы с реальной акустической средой (колебания звукового поля, эхо различное время реверберации, неконтролируемое появление резких звуков и т.п.). Постоянное обучение детей с РАС в классах/помещениях с идеальными акустическими характеристиками («greenhouse» effect, как называет его М. Mostafa) не является для них полезным. Большую часть жизни они пребывают в обстановке с разнообразными параметрами звукового поля, а задача школьной инклюзии – адаптировать детей к ситуациям, максимально приближенным к обыденности,



и предотвратить деструктивные реакции на происходящее. Для этого М. Мостафа рекомендует предусматривать варьируемую звукоизоляцию или несколько разных помещений с градацией акустического контроля – от максимально до минимально изолированных [11].

К практическим рекомендациям М. Мостафы следует отнести: качественную шумоизоляцию наружных стен/окон; использование двойных или тройных стеклопакетов, плотных штор. Внутренние стены и потолки должны обладать хорошими показателями звукоизоляции на частотах 125-4000 Гц. Также должно быть предусмотрено уменьшение количества и размера оконных проемов в кабинетах, требующих особого контроля акустических характеристик [13]

Другим всемирно известным исследователем связей архитектуры и поведения людей с аутизмом является доктор философии, преподаватель Центра аутизма Государственного университета Болла (США) доктор архитектуры Ш.М. Канакри. Ее исследования связаны с изучением воздействия акустической составляющей на обучение и поведение высокофункциональных аутистов в школе. Многочисленные эксперименты, проведенные Ш.М. Канакри, подтвердили, что решающее значение на полное отсутствие или минимальное проявление у таких обучающихся деструктивного поведения имеют акустические характеристики помещений. Часть исследований проводилась в помещениях с близкими акустическими характеристиками, но в процессе обучения уровень шума варьировался в зависимости от планировочного расположения конкретного класса – в шумной или тихой зоне здания (близость к игровым площадкам, многофункциональным комнатам, помещениям с системами кондиционирования воздуха). Выводы делались на основе взаимосвязей показателей уровня шума и проявляющегося поведения, фиксируемого с использованием программного обеспечения Noldus Observer XT [14]. В итоге подтвердилась предполагаемая значительная корреляция между уровнем шума, возникающим в ходе урока, и негативными поведенческими проявлениями (моргание, опасное поведение, стереотипия¹, закрывание ушей и т.п.) (см. рис. 1); при этом характеристика помещения «шумное» усугубляла результаты (резко усиливала негативные проявления).

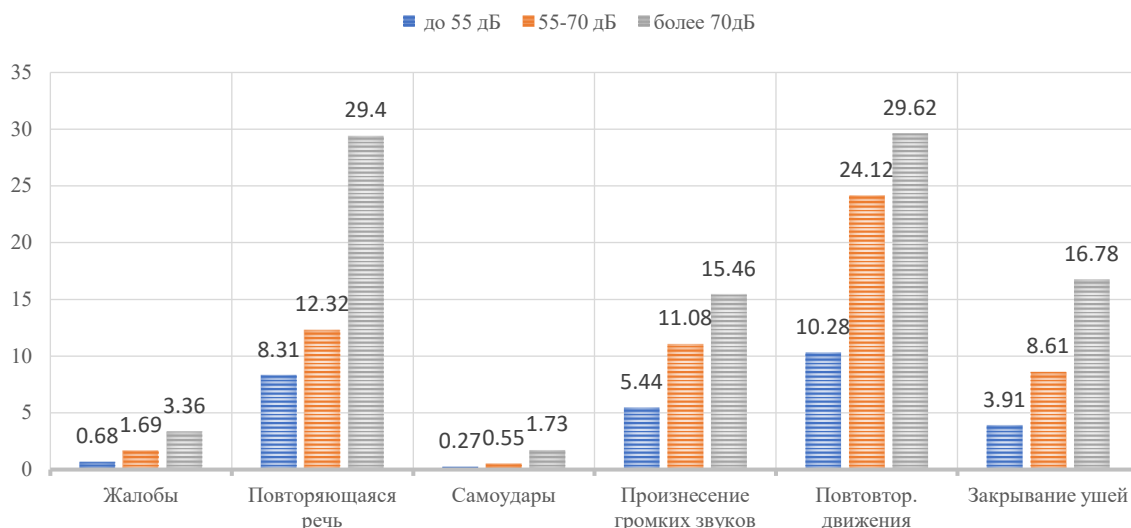
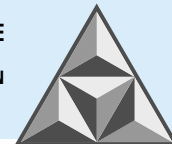


Рис. 1. Взаимосвязь типов поведенческих реакций детей с РАС и шумовых характеристик помещения [15]

Fig. 1. The relationship between the types of children with ASD behavioral reactions and the noise characteristics of the room [15]

¹Стереотипия – бесцельное устойчивое повторение звуков, фраз, движений, игр, интересов [3]



Приведенная систематизация исследований различных ученых доказывает, что акустическая составляющая пространства оказывает сильное влияние на состояние и поведенческие реакции людей с РАС. Возникновение отклоняющегося от нормы поведения, как уже отмечалось ранее, прямо пропорционально усилению шума, что влечет за собой нарушение образовательного процесса и снижение качества обучения.

Рассмотрим рекомендации специалистов по улучшению акустических характеристик школьных пространств. Для этого сравним базовые параметры (верхний предел уровня шума в помещении, время реверберации и отношение «сигнал-шум»), характеризующие акустическое поле пространств (табл. 1) [16-19].

Табл. 1. Значения акустических характеристик помещений школ (по зарубежным источникам)

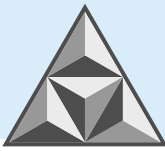
Table 1. Values of acoustic characteristics of the school premises (according to foreign sources)

Нормативный документ \ Параметр	Верхний предел уровня шума в помещении, дБ	Время реверберации	Отношение сигнал-шум
Acoustical Performance Criteria, 2002 г. [16]	35	0.6-0.7	15
Acoustical Performance Criteria, 2010 [17].	35	0.6 с	-
Position Statement and Guidelines for Acoustics in Educational Settings [18]	30	0.4	15
Building Bulletin 93 [19]	35	0.6 с (класс, в т.ч. для детей с особыми потребностями) ≤ 0.4 для центральных частот октавного диапазона от 125 Гц до 4 кГц – для учащихся с особыми потребностями в слухе или общении)	> 20 дБ в диапазоне частот от 125 Гц до 750 Гц > 15 дБ в диапазоне частот от 750 Гц до 4000 Гц

Следует отметить, что часть параметров приведена конкретно для потребностей детей с отклонениями в развитии. Следует говорить о разнице значений в достаточно широком диапазоне: 16.7% для верхнего предела уровня шума в помещении, 50% – время реверберации.

На основании этих показателей зарубежные исследователи проводили эксперименты, направленные на изучение существующих и создание требуемых акустических параметров. Так, группа Ф. Беттарелло [20] исследовала помещения Многофункционального дневного центра «Progetto autismo FVG Foundation» (Италия) для людей с РАС. В здании общей площадью 2700 м² находится Центр дневного пребывания для взрослых и подростков с жилыми ячейками, художественная мастерская, тренажерный зал, конференц-зал, музыкальная комната, столовая, кухня, зоны отдыха и приема гостей и родителей. В планировочной организации применены принципы зонирования помещений в соответствии с их сенсорным воздействием (в данном случае – звуковым). Например, кабинеты индивидуальной терапии, требующие особого акустического контроля, расположены отдельно от других частей здания. Наиболее шумные помещения (тренажерный зал, «мягкие» комнаты² и комнаты для занятий спортом, музыкальные и художественные залы) расположены так, чтобы не мешать терапевтическим

²«Мягкая» комната (soft room) – помещение в центрах для людей с РАС, предназначенное для пребывания в моменты деструктивного поведения. Пол и стены в них покрыты толстыми мягкими материалами для предотвращения травмирования.



кабинетам и жилым помещениям [20]. Авторский коллектив для исследования выбрал четыре терапевтических кабинета ($S = 6, 10, 12, 21 \text{ м}^2$), «мягкую» комнату ($S = 12 \text{ м}^2$), ателье художественной мастерской ($S = 76 \text{ м}^2$) и спальню квартиры ($S = 16 \text{ м}^2$). Особо жестко акустические требования, связанные с четкостью и определенностью речи, должны соблюдаться в терапевтических кабинетах (для примера рассмотрим результаты только по данным помещениям). Для изучения внутреннего звукового поля проведены измерения импульсной характеристики с использованием четырех положений приемников и двух положений источника шума. Результаты позволяют анализировать акустическое поле с точки зрения распределения звука в помещении, времени реверберации и четкости. Во время измерений столы, стулья, мебель и другие предметы в помещениях не убирались, двери и окна были закрыты, а электрооборудование отключено; приемники установили на расстоянии 1.6 м от пола. Исследования показали, что некоторые помещения не соответствовали нормативным требованиям и требовалось улучшение их акустических характеристик.

Для примера можно рассмотреть такой параметр, как время реверберации. При нормативном показателе 0.40-0.70 с (табл. 1) в терапевтических кабинетах было зафиксировано значение в диапазоне 0.66-0.88 с. Достичь рекомендованных значений, учитывая функциональное назначение помещения, можно путем установки звукопоглощающей мебели, введения ковров или штор, а эффект от звукопоглощающих элементов усилить за счет монтажа специальных панелей в верхней части стен. В исследовании Ф. Беттарелло и др. [20] на примере одного терапевтического кабинета предлагают два варианта расположения акустических панелей: по периметру между боковыми стенами и потолком (рис. 2, а); частично по углам и на потолке (рис. 2, б).

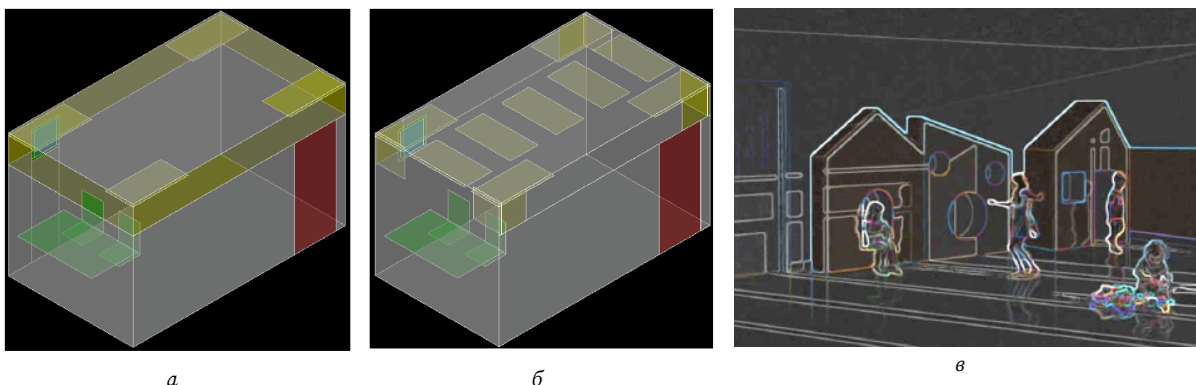


Рис. 2. Варианты *a, b* расположения акустических панелей (желтый) в терапевтическом кабинете [20];

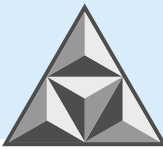
в – акустические домики в инклюзивных классах [13]

Fig. 2. Options *a, b* for the location of acoustic panels (yellow) in the therapeutic room [20];

c – acoustic houses in inclusive classrooms [13]

Авторы свидетельствуют, что равномерное нанесение звукопоглощающего материала устраняет эффекты фокусировки в углах и улучшает дальность действия датчиков и восприятие отдельных людей. Неравномерное пространственное распределение акустических элементов создаст визуальные разрывы, которые впоследствии необходимо будет объединять для организации визуальной непрерывности и простоты восприятия окружающего пространства. По этой причине для скрытия звукопоглощающих панелей потребуется акустически нейтральная маскирующая поверхность [20].

Ф. Беттарелло также исследовал и улучшал акустические составляющие музыкального зала «Progetto autismo FVG Foundation». Дискомфорт в помещении, ощущаемый не только людьми с РАС, но и нормотипичными представителями, был связан с большим временем реверберации. Дальнейшая работа велась при взаимодействии архитекторов, педагогов и



самих людей с РАС. Требовалось установить звукопоглощающий потолок и панели на стенах. Пользователи пространства РАС определили цвета для потолочных панелей (серый и светло-голубой) и расположили их в шахматном порядке. Для стеновых панелей они решили использовать изображения своих собственных картин, что позволило персонализировать помещение музыкального зала [13].

В этом же многофункциональном дневном центре для людей с РАС была улучшена акустическая составляющая инклюзивных классов. В них предусмотрели места для сенсорной разгрузки. Их выполнили из звукопоглощающих панелей, что обеспечило создание небольшого уединенного пространства для отдыха учащихся. Здесь фоновый шум снижается благодаря звукопоглощающей способности конструкции, и в то же время поверхность искусственных домов способствует падению реверберации внутри самого класса (рис. 2 в)

Таким образом, нами показано, что усовершенствование акустической составляющей образовательных пространств дает возможность значительно улучшить процесс обучения за счет более четкого общения, концентрации внимания и снижения стресса, и это в итоге приведет к улучшению самочувствия и академической успеваемости учащихся с РАС.

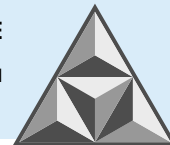
ВЫВОДЫ

Выполненная систематизация и анализ информации зарубежных исследователей в области архитектуры и дизайна, связанной с потребностями людей с РАС, подтверждают, что акустическая составляющая является весомой для качественной организации образовательного инклюзивного пространства. Учитывая схожесть с сенсорной составляющей аутизма таких заболеваний, как синдром дефицита внимания и гиперактивности, аналогичные решения могут быть полезны также для учащихся с иными особенностями здоровья.

В качестве примеров улучшения звукового поля в помещениях для учащихся с особыми образовательными потребностями, кроме стандартного метода (монтаж акустических панелей), рекомендуется персонализировать пространство, используя на панелях рисунки самих учащихся, а также создавать из звукопоглощающих панелей отдельные конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Стрельникова Е.Ю.** Специфика организации образовательной среды для учащихся с ментальными нарушениями // *Реабилитация жилого пространства горожанина: мат. XIX межд. науч.-практ. конф. им. В. Татлина, Пенза, 17 февраля 2023 года.* Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. 2023. С. 411-413.
2. **Чеберева О.Н., Стрельникова Е.Ю.** Архитектурно-планировочные решения ресурсных зон в общеобразовательных учреждениях // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2023: Сб. докл. IV Национал. научн. конф., Москва, 15 декабря 2023 года.* М.: Московский государственный строительный университет (Национальный исследовательский университет). 2024. С. 327-332.
3. Как проявляются симптомы расстройств аутистического спектра у детей раннего возраста. Пособие для родителей, семьи и друзей. М.: Фонд «Выход». 2019. 36 с.
4. **Морозова Е.** Сенсорная гиперчувствительность и гипочувствительность: как они проявляются при аутизме // *Аутизм – это.* URL: <https://autismjournal.help/articles/sensornaya-giperchuvstvitelnost-i-gipochuvstvitelnost-kak-oni-proyavlyayutsya-pri-autizme> (дата обращения: 11.05.2024).
5. **Doković S., Gligorović M., Ostojić-Zeljковић S.** Auditory perception in people with autism spectrum disorders // *Specijalna edukacija i rehabilitacija.* 2021. № 2 (1). P. 31-49. DOI:10.5937/specedreh21-34559.



6. **Nichole E.S., Troy Q. B., Bahmei B., Iarocci G., Arzanpour S., Birmingham E.** Family Experiences of Decreased Sound Tolerance in ASD // *Journal of autism and developmental disorders*. 2022. № 52 (9). DOI: 10.1007/s10803-021-05282-4.
7. **Caniato M.** Recent Advances on Indoor Comfort for Autistic Individuals // *Architecture and Autism. Sensory Perception and Independent Living. Proceedings of the International Workshop*. Trieste. 2022. P. 23-26.
8. **Rimland B., Edelson S.M.** Brief report: A pilot study of auditory integration training in autism // *Journal of autism and developmental disorders*. 1995. № 25 (1). P. 61-70.
9. **Caldas F., Masiero, B., Wang, L.M.** How Classroom Acoustic Conditions May Impact Autistic Students: A Review // *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. 2023. DOI: 10.3397/IN_2022_0438
10. **Marco E., Hinkley L., Hill S.** Sensory Processing in Autism: A Review of Neurophysiologic Findings // *Pediatr. Res.* 2011. № 69. P. 48-54. <https://doi.org/10.1203/PDR.0b013e3182130c54>.
11. **Mostafa M.** Architecture for autism: Autism ASPECTSS™ in School Design // *Int. J. Arch. Res. Archnet-IJAR*. 2014. № 8 (1). P. 143-158. DOI: 10.26687
12. **Mostafa M.** Let them be heard appropriate acoustics for autism special needs school design Arch Cairo // *ARCHCairo 2006*. 2006.
13. **Bettarello F., Caniato M., Pernigotto G., Gasparella A.** Indoor acoustic comfort for ASD people: from independent living to educational environments // *INTER-NOISE and NOISE-CON congress and conference proceedings*. 2023. № 265. P. 4852-4859. DOI: 10.3397/IN_2022_0699.
14. **Kanakri S.M.** Spaces Matters: Classroom Acoustics and Repetitive Behaviors in Preschool Children with Autism // *Amer. J Pediatr.* 2017. № 3 (6). P. 89-94. DOI: 10.11648/j.ajp.20170306.15.
15. **Kanakri S.M., Shepley M., Tassinari L.G., Varni J.W., Fawaz H.M.** An observational study of classroom acoustical design and repetitive behaviors in children with autism // *Environment and Behavior*. 2017. № 49 (8). P. 847-873.
16. ANSI 2002. American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools. American National Standards Institute, New York. 2002.
17. ANSI 2010. American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools. American National Standards Institute, New York. 2010.
18. Position Statement and Guidelines for Acoustics in Educational Settings // American Speech-Language-Hearing Association (ASHA). 2005.
19. Building Bulletin 93. BB93: Acoustic Design of Schools – Performance Standards. United Kingdom Department for Education. London. 2015.
20. **Bettarello F., Caniato M., Scavuzzo G., Gasparella A.** Indoor Acoustic Requirements for Autism Friendly Spaces // *Appl. Sci.* 2021. № 11 (9). DOI: 10.3390/app11093942.

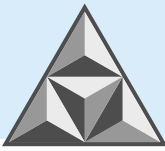
Поступила в редакцию 05.07.2024

Одобрена после рецензирования 10.10.2024

Принята к опубликованию 10.12.2024

REFERENCES

1. **Strelnikova, E.Yu.** (2023), “The specifics of the organization of the educational environment for students with mental disabilities”, *Reabilitatsiya zhilogo prostranstva gorozhanina: mat. XIX mezhd. nauch.-prakt. konf. im. V. Tatlina* [Rehabilitation of the living space of the city dweller: mat. XIX Inter. Sci. Pract. Conf. named after V. Tatlin], Penza, 17 February 2023, pp. 411-413.
2. **Chebereva, O.N. and Strelnikova, E.Yu.** (2024), “Architectural and planning solutions of resource zones in educational institutions”, *Aktual'nye problemy stroitelnoj otrasli i obrazovaniya - 2023: Sb. dokl. IV Natsional. nauch. konf.* [Actual problems of construction industry and education - 2023: Collection of reports IV National Scientific Conference], Moscow State Construction University (National Research University), Moscow, Russia, 15 December 2023, pp. 327-332.
3. “How the symptoms of autism spectrum disorders appear in young children. A benefit for parents, family and friends” (2019), Fond Vychod, Moscow, Russia.



4. **Morozova, E.** (2024), "Sensory hypersensitivity and hyposensitivity: how do they manifest in autism", *Autizm – eto*, available at: <https://autismjournal.help/articles/sensornaya-giperchuvstvitelnost-i-gipochuvstvitelnost-kak-oni-proyavlyayutsya-pri-autizme> (Accessed 11 May 2024).
5. **Doković, S., Gligorović, M. and Ostojić-Zeljковиć, S.** (2021), "Auditory perception in people with autism spectrum disorders", *Specijalna edukacija i rehabilitacija*, vol. 2, no.1, pp. 31-49.
6. **Nichole, E.S., Troy, Q.B., Bahmei, B., Iarocci, G., Arzanpour, S. and Birmingham, E.** (2022), "Family experiences of decreased sound tolerance in ASD", *Journal of autism and developmental disorders*, vol. 52, no. 9.
7. **Caniato, M.** (2022), "Recent advances on indoor comfort for autistic individuals", *Architecture and autism. Sensory perception and independent living. Proceedings of the International workshop*, Trieste, Italy, pp. 23-26.
8. **Rimland, B. and Edelson, S.M.** (1995), "Brief report: A pilot study of auditory integration training in autism", *Journal of autism and developmental disorders*, vol. 25, no. 1, pp. 61-70.
9. **Caldas, F., Masiero B. and Wang, L.M.** (2023), "How classroom acoustic Conditions may impact autistic students: A review", *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and conference proceedings*, Chiba, Japan.
10. **Marco, E., Hinkley, L. and Hill, S.** (2011), "Sensory processing in Autism: A review of neurophysiologic findings", *Pediatr. Res.*, vol. 69, pp. 48-54, available at: <https://doi.org/10.1203/PDR.0b013e3182130c54> (Accessed 11 May 2024).
11. **Mostafa, M.** (2014), "Architecture for autism: Autism ASPECTSS™ in school design", *Int. J. Arch. Res. Archnet-IJAR*, vol. 8, no. 1, pp. 143-158.
12. **Mostafa, M.** (2006), "Let them be heard appropriate acoustics for autism special needs school design Arch Cairo", *ARCHCairo2006*, Cairo, Egypt.
13. **Bettarello, F., Caniato, M., Pernigotto, G. and Gasparella, A.** (2023), "Indoor acoustic comfort for ASD people: from independent living to educational environments", *INTER-NOISE and NOISE-CON congress and conference proceedings*, no. 265. pp. 4852-4859, Chiba, Japan.
14. **Kanakri, S.M.** (2017), "Spaces matters: Classroom acoustics and repetitive behaviors in preschool children with autism", *Amer. J. Pediatr.*, vol. 3, no. 6, pp. 89-94.
15. **Kanakri, S.M., Shepley, M., Tassinary, L.G., Varni, J.W. and Fawaz, H.M.** (2017), "An observational study of classroom acoustical design and repetitive behaviors in children with autism", *Environment and Behavior*, vol. 49, no. 8, pp. 847-873.
16. ANSI (2002), American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools. American National Standards Institute, New York, US.
17. ANSI (2010), American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools. American National Standards Institute, New York, US.
18. Position Statement and Guidelines for Acoustics in Educational Settings. American Speech-Language-Hearing Association (ASHA) (2005), New York, US.
19. Building Bulletin 93. BB93: Acoustic Design of Schools - Performance Standards (2015), United Kingdom Department for Education, London, UK.
20. **Bettarello, F., Caniato, M., Scavuzzo, G. and Gasparella, A.** (2021), "Indoor acoustic requirements for autism-friendly spaces", *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 9.

Received 05.07.2024

Approved 10.10.2024

Accepted 10.12.2024



К ЮБИЛЕЮ ВЛАДИМИРА ПАВЛОВИЧА СЕЛЯЕВА



Владимир Павлович Селяев, профессор, действительный член Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), заслуженный деятель науки Российской Федерации, родился 21 ноября 1944 года в п. Барашево Зубово-Полянского района Мордовской АССР (ныне Теньгушевский район Республики Мордовия).

Вся трудовая деятельность Владимира Павловича Селяева связана с Мордовским государственным университетом им. Н.П. Огарева, после окончания которого в 1967 году с красным дипломом он прошел путь от кандидата (1973 г.) и доктора технических наук (1985 г.) до член-корреспондента (1994 г.) и действительного члена Российской академии архитектуры и строительных наук (2010 г.). Он возглавлял строительный факультет (1976-1978, 1981-1989 гг.), был проректором по учебной (1989-1992 гг.) и научной работе (1992-1997 гг.), а с 1986 года по настоящее время руководит кафедрой строительных конструкций в данном университете.

Академик РААСН, профессор В.П. Селяев – автор 750 научных и учебно-методических работ, в том числе – более двадцати научных монографий, почти двухсот авторских свидетельств и патентов на изобретения РФ. Под его научным руководством защищено свыше 30 докторских и кандидатских диссертаций.

Под руководством академика РААСН В.П. Селяева создана и активно развивается научная школа, занимающаяся оценкой и прогнозированием долговечности строительных материалов, изделий и конструкций. Основные научные достижения Владимира Павловича и его учеников связаны, в первую очередь, с обоснованием теории химического сопротивления строительных материалов и конструкций, работающих при совместном действии силовых факторов и жидких агрессивных сред. Разнообразие его научных интересов растет с каждым годом – к традиционным областям добавились исследования, связанные с разработкой подходов к наномодификации строительных композитов и выявлением критериев, позволяющих оценить процесс разрушения бетонов. Им обоснован механизм дискретно-непрерывного (квантового) характера разрушения фрактальных структур композиционных материалов, что позволило объяснить физическую сущность повышения (до 200 МПа) прочности цементных композитов. К инновационным разработкам следует отнести следующие: способ синтеза аморфного мелкозернистого микрокремнезема из опал-кристобалитовых биопород; проектные решения ограждения конструкций с применением панелей VIP, теплопроводность которых варьируется в пределах $0.002-0.020 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$.

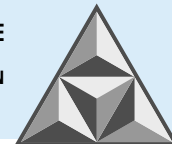
Владимир Павлович Селяев и сегодня – активный ученый, который постоянно выступает с научными докладами на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, является бессменным руководителем Всероссийской научно-технической конференции «Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций», проводимой в



Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева. Он является также членом диссертационных советов в Казанском государственном архитектурно-строительном университете и Пензенском государственном университете архитектуры и строительства.

Научная, организационная и педагогическая деятельность академика РААСН В.П. Селяева неоднократно отмечена федеральными и республиканскими наградами – знаками ЦК ВЛКСМ (1983 г.) и «Ударник одиннадцатой пятилетки» (1986 г.), золотой медалью ВДНХ СССР (1986 г.), орденом Трудового Красного Знамени (1986 г.), орденом Русской Православной Церкви святого благоверного князя Даниила Московского III степени (2006 г.), орденом Союза строителей РФ «За заслуги в строительстве» (2014 г.), орденом Славы III степени (2019 г.), медалью за заслуги «В ознаменование 1000-летия единения мордовского народа с народами Российского государства» (2012 г.), почетными грамотами Правительства Республики Мордовия (2000 и 2014 гг.), грамотой РААСН (2007 г.). Он является лауреатом премии Комсомола Мордовии в области производства (1983 г.), Государственной премии Республики Мордовия (1999 и 2006 гг.) и премии Главы Республики Мордовия (2005, 2014 гг.), имеет благодарности Главы Республики Мордовия (1997, 2006 и 2010 гг.), Почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Мордовия». В 2024 г. В.П. Селяев отмечен Почетным знаком Главы Республики Мордовия «За личный вклад в развитие Республики Мордовия».

Редакционный совет журнала «Умные композиты в строительстве Smart Composite in Construction», ректорат, преподаватели и сотрудники Ярославского государственного технического университета поздравляют Владимира Павловича Селяева с 80-летним юбилеем и желают ему крепкого здоровья, неиссякаемой энергии и долгих творческих лет, талантливых воспитанников и новых значимых успехов в науке и подготовке инженерных кадров для строительной индустрии России!



ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция строго придерживается норм и правил международной публикационной этики.

Правовую основу обеспечения публикационной этики составляют международные стандарты: положения II Всемирной конференции по вопросам соблюдения добросовестности научных исследований, положения Комитета по этике научных публикаций (The Committee on Publication Ethics – COPE) и нормы раздела «Авторское право» Гражданского кодекса РФ.

Представление статьи в журнал подразумевает следующее:

- работа не была опубликована в другом журнале;
- работа не находится на рассмотрении в другом журнале;
- все соавторы согласны с публикацией статьи;
- получено согласие (в явной или неявной форме) организации, на базе которой проведено исследование.

При представлении рукописи в журнал авторы должны убедиться, что все цитирования оформлены корректно, указаны заимствованные источники в подписях к рисункам и надписям к таблицам. Если таковые не приведены, предполагается, что рисунки и таблицы представляют собой плод авторской деятельности. Редакция осуществляет проверку статей на антиплагиат и отклоняет или возвращает авторам рукописи, если оригинальность текстов по результатам такой проверки не достигает 70-75 %.

Авторские права

Авторы, направляющие свои работы в журнал, соглашаются со следующим:

1. Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации.
2. Авторы сохраняют за собой право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся неэксклюзивного распространения версии работы в опубликованном в журнале виде (например, размещение в институтском хранилище, публикация в книге), со ссылкой на оригинальную публикацию в данном журнале.

Приватность

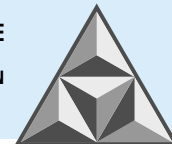
Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте данного журнала, используются исключительно для достижения целей, совпадающих с миссией журнала; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

Правила оформления статей для журнала «Умные композиты в строительстве» / «Smart Composite in Construction»

В журнале «Умные композиты в строительстве / Smart Composite in Construction» печатаются работы преподавателей и сотрудников высших учебных заведений РФ, РАН, РААСН и других исследовательских организаций, работающих в сфере промышленного и гражданского строительства и архитектуры, в том числе – зарубежных.

Рубрики журнала

- Строительные конструкции, здания и сооружения (технические)
- Строительные материалы и изделия (технические)
- Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические)



– Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки; архитектура)

Статьи, направляемые в журнал, должны удовлетворять следующим требованиям:

Статья должна соответствовать профилю и рубрикам журнала, обладать актуальностью, новизной, иметь прикладное значение (и/или теоретическое обоснование). Вопрос об опубликовании или отклонении статьи решает редакционная коллегия журнала, и ее решение является окончательным.

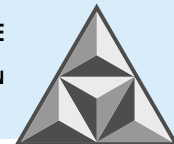
Статьи должны представлять сжатое, конкретное изложение результатов, без повторения одних и тех же данных в тексте, рисунках и таблицах.

Все представленные статьи должны быть набраны 12 кеглем, шрифт *Times New Roman*, интервал – 1.1. Поля: верхнее и нижнее – 3 см, левое и правое – 2.5 см. Абзацный отступ – 0.75 см. Объем статьи – 7-15 страниц, включая аннотацию и список литературы на русском и английском языках; число таблиц – не более 3, рисунков – не более 5-6, для обзорной статьи – не более 8, в том числе помеченных буквами *a, б* (курсив) и т.д. Рисунки, как и таблицы, подписи и заголовки к ним, а также примечания, размещаются по тексту статьи. В раздел «Обзорные статьи» принимаются материалы объемом от 20 до 30-35 страниц.

При оформлении статьи рекомендуется избегать употребления любых сокращений, кроме общепринятых. Первое упоминание сокращенного термина обязательно следует после его представления в полном виде. Рукописные вставки не допускаются. Кавычки оформляются «елочкой». Текст набирается без нумерации страниц.

Структура статьи

Первая страница рукописи оформляется шрифтом с размером 12 пт. На первой строке указывается тип статьи с выравниванием слева без абзацных отступов (Научная статья, Обзорная статья). На следующей строке проставляется индекс по универсальной десятичной классификации (УДК). После УДК пропускается одна строка и дается по центру **наименование работы** (полужирное начертание). Пропускается одна строка и приводятся **И.О. Фамилия** (полужирное начертание) каждого автора. После фамилии каждого автора надстрочным символом указывается сноска на аффилиацию в виде цифры. Если все авторы представляют одну и ту же организацию, цифровое обозначение аффилиации не указывается. Пропускается одна строка, начиная с первого надстрочного номера аффилиации, приводится полное Имя, Отчество, Фамилия автора (или авторов, если таковых, представляющих данную организацию, несколько), затем, на следующей строке – наименование организации (места работы), города, страны и электронный адрес (курсив) каждого автора из данной организации. Пропускается одна строка и приводится полное **Имя, Отчество, Фамилия** автора (или авторов) другой организации, а на следующей строке – наименование другой организации (места работы), города, страны и электронный адрес (курсив). Пропускается строка, размещается аннотация со слов «**Аннотация.**» (**Abstract.**) (**с точкой**). Текст аннотации должен включать 150-250 слов, выполненных курсивным нежирным начертанием, и завершается точкой. После аннотации и пропуска одной строки набирается «**Ключевые слова:**» (**Keywords:**) (**с двоеточием**) и приводится 6-10 словосочетаний с курсивным начертанием, без точки в конце. Через строку указывается автор, ответственный за переписку, и его электронная почта (курсивом). Все вышеописанные пункты следом приводятся на английском языке.



Благодарности организациям, научным руководителям и другим лицам, оказавшим помощь при написании статьи, приводятся после слова «**Благодарности:**». На английском языке слова благодарности приводятся после слова '**Acknowledgments:**'

Сведения о грантах и финансировании исследования при подготовке и публикации статьи могут быть приведены после слова «**Финансирование:**» (на английском языке – после слов '**Funding:**' или '**Financial Support:**').

На первой странице рукописи (если статья представлена на английском языке) все вышеописанные пункты приводятся только на английском языке.

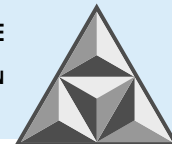
Основной текст научной статьи рекомендуется излагать согласно структуре IMRAD, содержащей следующие заголовки: Введение, Экспериментальная часть, Результаты и их обсуждение, Выводы, Список источников. Каждый заголовок приводится прописными буквами высотой 12 пт и выделяется одной пустой строкой перед ним и после него.

Рисунки оформляются внутри текста, перенос строк подписей на другую страницу не допускается. Подписи к рисункам приводятся сразу под графическим изображением. Подпись рисунка составляется из сокращения «**Рис.**» (или '**Fig.**' для статьи на английском языке или для перевода подписи), порядкового номера и отделенного точкой названия рисунка, при этом текст, кроме самого названия, выделяется полужирным начертанием. Следом в статье на русском языке приводится подпись рисунка на английском языке. Если рисунок состоит из нескольких частей, помеченных отдельными буквами, перенос любой части рисунка и примечания в виде буквы на другую страницу не рекомендуется. Рекомендуется уменьшение шрифта для подписи до 10 пт (допускается до 8 пт). Рисунки располагаются только после их упоминания (или перекрестной ссылки) в тексте статьи. Ссылка на каждый рисунок по тексту статьи приводится в обязательном порядке и приводится в скобках с сокращением «рис.» ('Fig.'), после которого указывается номер, например: (рис. 1) – при представлении работы на русском языке, (Fig. 1) – при представлении работы на английском языке.

Формулы рекомендуется оформлять внутри таблицы, состоящей из двух столбцов. В первом столбце приводится сама формула, оформленная редактором формул или в виде изображения. Во втором столбце шириной 1 см приводится порядковый номер формулы, заключенный в скобки при создании перекрестных ссылок в тексте. Если необходимость давать перекрестные ссылки отсутствует, второй столбец не создают. После формулы ставится запятая, когда приводится расшифровка символов формулы, или точка; порядковый номер формулы после запятой или точки располагается на этой же строке, с выравниванием по правому краю.

Для статейных таблиц приводится обозначение «**Таблица**» (или '**Table**' для статьи на английском языке), порядковый номер (без обозначения знака номера), а после точки дается наименование таблицы. Текст, кроме самого наименования таблицы выделяется полужирным начертанием. Следом в статье на русском языке приводится название таблицы на английском языке. Рекомендуется уменьшение шрифта в таблице до 10 пт (допускается до 8 пт). Таблицы располагаются только после их упоминания (или перекрестной ссылки) в тексте статьи. Упоминание приведенной таблицы по тексту статьи является обязательным и приводится в скобках, в которых дают обозначение, например: (табл. 1) – при представлении работы на русском языке, (Table 1) – при представлении работы на английском языке.

Статья заканчивается разделом «Список источников» (в статье на английском языке – разделом 'References'), шрифт Times New Roman, кегль 10 пт. Оптимальное количество цитированных источников от 15 до 20 (но не менее 10), при этом в список рекомендуется включить не менее 3 работ, представляющих журналы из ядра РИНЦ или входящих в базы



данных WoS/Scopus. В обзорных работах принимается не менее 40-50 ссылок на литературные источники. Под списком литературных источников приводятся надписи курсивом, каждая – с новой строки: «Поступила в редакцию», «Одобрена после рецензирования», «Принята к опубликованию».

Формат

Редакция принимает тексты, сохраненные в форматах .doc. или .docx. Материалы, не соответствующие указанным требованиям и представленные в других форматах, не рассматриваются.

Оформление литературных ссылок

Все затекстовые библиографические ссылки в статье на русском языке составляют по ГОСТ Р 7.0.5 и ГОСТ Р 7.0.100, в статье на английском языке – согласно международному стилю оформления Harvard.

Дополнительно в статье на русском языке приводят перечень затекстовых библиографических ссылок на латинице ('References'), согласно международному стилю оформления Harvard.

Издания, которые не переводятся, необходимо указать транслитерацией в соответствии с общепринятыми международными правилами, в конце каждого такого источника должна стоять пометка (in Russian) (см. <http://www.cas.org/expertise/cascontent/caplus/corejournals.html>).

Для журнальной статьи должны быть указаны фамилии и инициалы всех авторов, название статьи, сокращенное название журнала (если допускается, например: *Изв. вузов. Химия и хим. технология*) год, номер тома, номер или выпуск, диапазон страниц и DOI (при их наличии, в случае если цитируемая статья напечатана на русском языке).

Примеры оформления литературных источников (статьи, монографии, патенты на изобретение, интернет-данные) на русском и английском языках

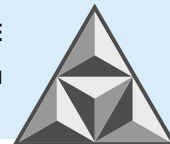
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Трейбакс Е.А.** Использование уникальных свойств клееных деревянных панелей CLT в строительстве общественных зданий // *Инновации в науке*. 2017. № 10 (71). С. 68-69.
2. **Ammari M.S., Belhadj B., Bederina M., Ferhat A., Quéneudec M.** Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers // *Construction and building materials*. 2020. Vol. 233, no. 8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.117374
3. **Титунин А.А., Зайцева К.В.** Проектирование и производство строительных материалов из древесины. Комплексный подход. Кострома: Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2009. 185 с.
4. **Яргина З.Н.** Эстетика города. М.: Стройиздат, 1991. 365 с.
5. В России будет обеспечено широкое внедрение многоэтажного деревянного домостроения // *Минстрой России*: [сайт]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/press/v-rossii-budet-obespecheno-shirokoe-vnedrenie-mnogoetazhnogo-derevyannogo-domostroeniya/> (дата обращения 10.10.2023).
6. Citation guides / Mendeley [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mendeley.com/guides/citation-guides/> (дата обращения: 05.04.2022).
7. Патент № 2667367 Российская Федерация, МПК В28С 5/00 (2006.01), В28С 9/02 (2006.01). Способ получения бетонной смеси с утилизацией ранее полученных остатков этой смеси: опубл. 19.09.2018 / Коган Артем Сергеевич.

Поступила в редакцию

Одобрена после рецензирования

Принята к опубликованию



REFERENCES

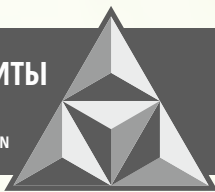
1. **Treybaks, E.A.** (2017) Utilization of unique properties of glued wood CLT panels in the construction of public buildings, *Innovatsii v nauke*, 10(71), pp. 68-69 (in Russian).
2. **Ammari, M.S., Belhadj, B., Bederina, M., Ferhat, A. & Quéneudec, M.** (2020) Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers, *Construction and Building Materials*, 233(8). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117374.
3. **Titunin, A.A. & Zaitseva, K.V.** (2009) *Design and production of construction materials of wood. Complex approach.* Kostroma: Izd-vo Kostrom. gos. tekhnol. un-ta (in Russian).
4. **Yargina, Z.N.** (1991) *Aesthetics of the city.* Moscow: Stroyizdat (in Russian).
5. Ministry of Construction of Russia. (2022) *Russia will ensure widespread introduction of multi-storey wooden house building* [online]. Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/press/v-rossii-budet-obespecheno-shirokoe-vnedrenie-mnogoetazhnogo-derevyannogo-domostroeniya> (accessed 10.10.2023) (in Russian).
6. Citation Guides / Mendeley [online]. Available at: <https://www.mendeley.com/guides/citation-guides/> (accessed 05.04.2022).
7. **Ferrari, G., Surico, F., Brocchi, A., Banfi, E., Maltese, C. & Squinzi, M.** (2019) Method for recycling concrete, IT, Patent EP 2,468,695 A1.

Received

Approved after reviewing

Accepted

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



ТОМ 5, ВЫПУСК 4, 2024 | VOL. 5, ISS. 4, 2024

