

## Возможность использования «зелёного» бетона и отходов стекла для изготовления светопропускающих декоративных изделий

Танг Ван Лам<sup>1</sup> , Нгуен Санг<sup>2</sup> , Борис Игоревич Булгаков<sup>3</sup> , Надежда Алексеевна Лукьянова<sup>3\*</sup> 

<sup>1</sup> Ханойский горно-геологический университет (HUMG), 18 Фо Виен, Донг Нгак, Ханой, 100000, Вьетнам

<sup>2</sup> Университет Тхань Донг, 3 Ву Конг Дан, район Ту Минь, Хайфон, 180000, Вьетнам

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: galcevanadezda@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Объем промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов, образующихся ежегодно во Вьетнаме, постоянно увеличивается, в то время как потребность в строительных материалах становится все более актуальной. В данном исследовании оценивается возможность использования бесцементного «зеленого» бетона на основе золы-уноса тепловых электростанций, доменного шлака и отходов стекла для изготовления светопропускающих декоративных изделий. **Материалы и методы.** В работе применялись методы исследований, соответствующие действующим вьетнамским стандартам, а также специально разработанная экспериментальная установка для определения коэффициента светопропускания образцов декоративных «зеленых» бетонов. Для получения бесцементного вяжущего были использованы зола-уноса ТЭС «Фа Лай» и тонкомолотый доменный гранулированный шлак металлургического завода «Хоа Фат» в сочетании с активизатором, состоящим из смеси водных растворов NaOH и Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> в соотношении 1:1. В состав бетонных смесей также входили стекольные отходы разного цвета, измельченные до частиц размером 5,0–20,0 мм, декоративный мелкий заполнитель фракции 2,5–5,0 мм, суперпластифицирующая добавка под торговым названием MVN-SR производства компании «Silkroad Ханой». Для дисперсного армирования декоративных светопропускающих изделий с целью повышения их трещиностойкости и улучшения механических свойств использовались синтетические полипропиленовые волокна в виде отдельных филаментов и стальная сетчатая фибра. Кроме того, для придания декоративным изделиям требуемой цветовой гаммы и эстетических характеристик применялись различные пигментные порошки красного, желтого, синего и других цветов. **Результаты и обсуждения.** Были разработаны четыре состава с содержанием отходов стекла от 5 до 20% мас. с целью анализа их влияния на удобоукладываемость бетонной смеси, а также физико-механические свойства и способность декоративных изделий пропускать свет. Полученные результаты показали, что при увеличении содержания стекла удобоукладываемость бетонных смесей по расплыву конуса снизилась с 25 до 19 см, тогда как их средняя плотность увеличилась с 2068 до 2169 кг/м<sup>3</sup>. В возрасте твердения 28 суток прочность бетонных образцов на сжатие составила 38–46 МПа, прочность на растяжение при изгибе – не менее 4,9 МПа, износостойкость 0,3–0,51 г/см<sup>3</sup>, водопоглощение по массе от 7,3 до 8,5%, а коэффициент светопропускания повысился с 11,8 до 20,5%. **Заключение.** Полученные светопропускающие декоративные изделия подходят для внутренней и наружной отделки и одновременно обеспечивают требуемые эксплуатационные характеристики, а также создают внутри помещений эффект мягкого рассеивания света. Кроме того, использование крупнотоннажных промышленных отходов способствует снижению потребления природных ресурсов и выбросов углекислого газа, что подтверждает потенциал использования разработанного декоративно-отделочного материала для усиления архитектурной выразительности интерьеров жилых и общественных зданий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** «зеленый» светопропускающий бетон, стекольные отходы, декоративные изделия, коэффициент светопропускания

**ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ:** Содержание данной статьи является частью результатов научно-исследовательского проекта по инкубации научно-технологической продукции Ханойского горно-геологического университета (HUMG) на 2025 год «Разработка светопропускающих декоративных бетонных изделий с использованием стеклянных отходов и дисперсного армирования» (код проекта: DAUT.01.2005)

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Авторы выражают искреннюю благодарность лаборатории Ханойского горно-геологического университета, предоставленной для реализации данного проекта.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Лам Танг Ван, Нгуен Санг, Булгаков Б.И., Лукьянова Н.А. Возможность использования «зеленого» бетона и отходов стекла для изготовления светопропускающих декоративных изделий. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(3):379–392. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-379-392>. – EDN: UFUZGU.

# The potential of using «green» concrete and waste glass in the manufacture of light-transmitting decorative products

Tang Van Lam<sup>1</sup> , Nguyen Sang<sup>2</sup> , Boris I. Bulgakov<sup>3</sup> , Nadezhda A. Lukyanova<sup>3\*</sup> 

<sup>1</sup> Hanoi University of Mining and Geology (HUMG) (18, Pho Vien, Dong Ngac, Hanoi, 100000, Vietnam)

<sup>2</sup> Thanh Dong University, 3 Vu Cong Dan, Tu Minh District, Hai Phong, 180000, Vietnam

<sup>3</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26, Russian Federation

\* Corresponding author: e-mail: galcevanadezda@mail.ru

## ABSTRACT

**Introduction.** The volume of industrial, agricultural, and household waste generated annually in Vietnam has been steadily increasing, while the demand for building materials is growing. This study evaluates the feasibility of using cement-free "green" concrete based on thermal power plant fly ash, blast furnace slag, and glass waste to produce translucent decorative elements. **Materials and methods.** The study used research methods that comply with current Vietnamese standards, as well as a specially developed experimental setup to determine the light transmittance coefficient of decorative "green" concrete samples. Cement-free binders were produced using fly ash from the Pha Lai Thermal Power Plant and finely ground granulated blast furnace slag from the Hoa Phat Steel Plant, combined with an activator consisting of a 1:1 mixture of aqueous solutions of NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. The concrete mixtures also included glass waste of various colors, crushed to particles sized 5.0–20.0 mm, decorative fine aggregate with a fraction of 2.5–5.0 mm, and a superplasticizing admixture under the trade name MVN-SR manufactured by Silkroad Hanoi. Synthetic polypropylene fibers in the form of individual filaments and steel mesh fiber were used to provide dispersed reinforcement for decorative translucent products to improve their crack resistance and mechanical properties. Additionally, various pigment powders in red, yellow, blue, and other colors were used to impart the desired color range and aesthetic properties to the decorative products. **Results.** Four compositions with waste glass contents ranging from 5 to 20% by weight were developed to analyze their effect on the workability of concrete mixes, as well as the physical and mechanical properties and light transmittance of decorative products. The obtained results showed that with an increase in the glass content, the workability of concrete mixes according to the cone flow decreased from 25 to 19 cm, while their average density increased from 2068 to 2169 kg/m<sup>3</sup>. After curing for 28 days, the compressive strength of concrete samples was 38–46 MPa, tensile strength in bending was at least 4.9 MPa, wear resistance was 0.3–0.51 g/cm<sup>3</sup>, water absorption by weight was from 7.3 to 8.5%, and the light transmittance coefficient increased from 11.8 to 20.5%. **Conclusion.** The resulting light-transmitting decorative products are suitable for interior and exterior decoration, simultaneously providing the required performance characteristics and creating a soft light diffusion effect indoors. Furthermore, the use of high-volume industrial waste helps reduce natural resource consumption and carbon dioxide emissions, confirming the potential of this decorative finishing material to enhance the architectural expression of residential and public building interiors.

**KEYWORDS:** "green" light-transmitting concrete, waste glass, decorative products, light transmittance coefficient

**SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK THAT RESULTED IN THE PUBLICATION:** The content of this article is partially derived from the university-level scientific and technological product incubation project for 2025 at Hanoi University of Mining and Geology (HUMG), entitled "Development of Translucent Decorative Concrete Products Using Glass Waste and Dispersed Fiber Reinforcement" (Project Code: DAUT.01.2005).

**ACKNOWLEDGEMENTS:** The authors sincerely acknowledge the laboratory facilities of Hanoi University of Mining and Geology (HUMG), which supported the implementation of this research project.

## FOR CITATION:

Lam Tang Van, Nguyen Sang, Bulgakov B.I., Lukyanova N.A. The potential of using «green» concrete and waste glass in the manufacture of light-transmitting decorative products. *Nanotechnologies in construction*. 2026;18(3):379–392. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-379-392>. – EDN: UFUZGU.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы развитие «зеленых» строительных материалов и продвижение модели экономики замкнутого цикла стали важным направлением политики многих стран, включая Вьетнам, с целью

снижения выбросов парниковых газов, экономии природных ресурсов и ограничения загрязнения окружающей среды. Производство строительных материалов, особенно цемента и традиционного бетона, рассматривается как один из значительных источников выбросов CO<sub>2</sub>, при этом сопровождается

## ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

высоким потреблением невозобновляемых минеральных ресурсов [1]. В этих условиях исследования «зеленых» бетонов, использующих бесцементные вяжущие или пониженное содержание цемента в сочетании с использованием крупнотоннажных промышленных отходов, таких как зола-унос тепловых электростанций и металлургические шлаки, вызывают все возрастающий интерес со стороны научного сообщества и производственной практики [2, 3].

Параллельно с проблемой выбросов при производстве традиционных строительных материалов объем стекловых отходов, образующихся в результате строительной деятельности, реконструкции зданий и бытового потребления, постоянно увеличивается, особенно в крупных городах. Стекло является материалом, трудно поддающимся разложению, длительно сохраняющимся в природной среде и создающим значительную нагрузку на систему утилизации твердых отходов при отсутствии их эффективной переработки [4]. Вместе с тем благодаря химической стабильности, высокой прочности и хорошей светопропускной способности стекловых отходы обладают значительным потенциалом повторного использования в качестве функционального материала в строительных и декоративных изделиях, а не только как отход, подлежащий утилизации (рис. 1).

Для внутренней и наружной отделки зданий светопропускающие материалы, такие как художественное стекло, светопрозрачный камень и специальные композиционные материалы, становятся все более востребованными благодаря высокой эстетической ценности и способности создавать выразительные световые эффекты. Однако большинство таких изделий в настоящее время отличается высокой стоимостью, энергоемким производственным процессом и недостаточной экологической устойчивостью. В то же время исследования светопропускающего бетона или бетона с использованием стеклянного заполнителя в основном сосредоточены на архитектурных конструкциях или облицовочных панелях крупного формата, тогда как исследования, ориентированные на декоративные изделия среднего и малого размера, одновременно предъявляющие требования к их механическим характеристикам, светопропусканию и эстетическим показателям, уделено недостаточное внимание [5].

В частности, для светопропускающих декоративных изделий материал должен не только обеспечивать прочность и эксплуатационную стабильность, но и способствовать рациональному распределению света, формированию гармоничного визуального эффекта и соответствию пространству внутренней и наружной отделки. Сочетание «зеленого» бетона с отходами стекла для изготовления светопропускающих декоративных панно рассматривается как новое

направление, которое одновременно способствует эффективному использованию твердых отходов и расширяет область применения «зеленого» бетона, начиная с конструктивной сферой и заканчивая областью декоративной и архитектурно-художественной отделки [6, 7].

Исходя из изложенных предпосылок, данное исследование направлено на оценку возможности использования бесцементного «зеленого» бетона в сочетании с отходами стекла для изготовления светопропускающих декоративных изделий. В работе рассматриваются вопросы выбора материалов, принципы проектирования состава смеси, технология изготовления и основные характеристики продукции, включая светопропускную способность, механические свойства и потенциал применения



**Рис. 1.** Декоративные изделия, изготовленные с использованием стекловых отходов: а – декоративный светильник коробчатого типа; б – декоративная облицовочная панель

## ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

в области внутренней и наружной отделки. Ожидается, что полученные результаты внесут вклад в формирование научных основ с целью разработки долговечных и экологически безопасных декоративных материалов, а также обеспечат более эффективное использование стекольных отходов для производства современных строительных материалов, обладающих большой архитектурной выразительностью.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

## 2.1. Используемые материалы

а) Вяжущее вещество.

В состав вяжущего для получения светопропускающего декоративного бетонного изделия входила смесь золы-уноса ТЭС «Фа Лай» (Phả Lại), соответствующая требованиям вьетнамского стандарта TCVN 10302:2014 «Активная минеральная добавка – зола-унос для бетона, строительных растворов и цемента» (рис. 2), и тонкомолотого доменного



Рис. 2. Зола-унос ТЭС «Фа Лай»

гранулированного шлака металлургического завода «Хоа Фат» (Hòa Phát), соответствующего требованиям стандарта TCVN 11586:2016 «Молотый гранулированный доменный шлак для бетона и строительных растворов» (рис. 3) [8].

б) Заполнители.

В состав использованных заполнителей входили стекольные отходы разных цветов и размеров, полученные с полигонов твердых отходов, которые измельчали до частиц размером 5,0–20,0 мм, а также декоративный мелкий заполнитель фракции 2,5–5,0 мм.

В настоящем исследовании стеклянные частицы выполняли функцию крупного заполнителя и соответствовали требованиям стандарта TCVN 7570:2006 «Заполнители для бетона и строительных растворов. Технические требования» (рис. 4, 5).

Перед использованием измельченные стеклянные частицы промывались и сортировались по цвету и размеру (рис. 6). Их средняя насыпная плотность составляла порядка 2480 кг/м<sup>3</sup>.



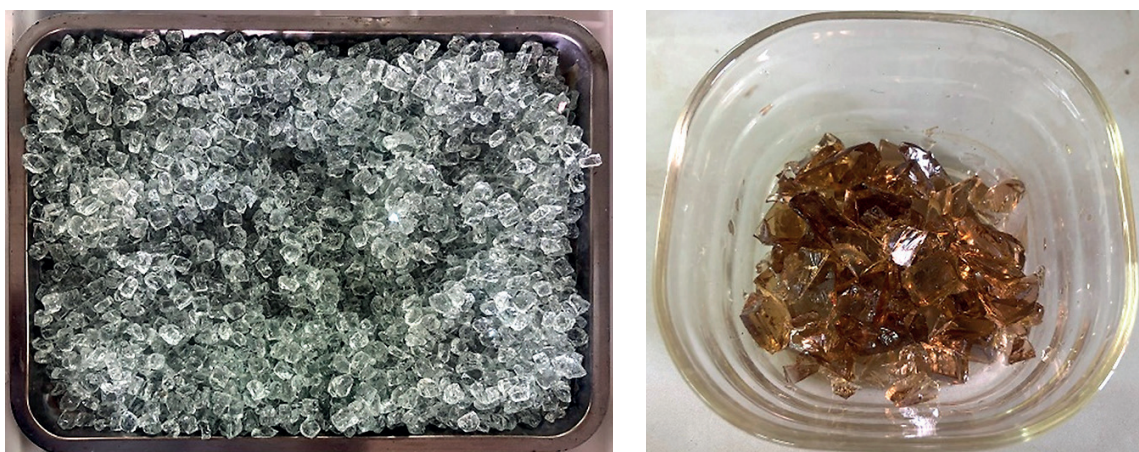
Рис. 3. Тонкомолотый доменный гранулированный шлак металлургического завода «Хоа Фат»



Рис. 4. Стекольные отходы на пункте сбора вторсырья



Рис. 5. Частицы стекольных отходов после дробления



**Рис. 6.** Стекланные частицы после обработки и сортировки

Декоративный мелкий наполнитель использовался с целью снижения усадки и усиления несущего каркаса изделия. Частицы декоративного мелкого наполнителя получали путем просеивания крупнозернистого желтого песка через сита с размером ячеек от 2,5 до 5,0 мм (рис. 7).

У декоративных бетонных изделий в виде тонких панелей после формования часто наблюдается растрескивание вследствие высокой текучести пластичной связующей суспензии. Поэтому применение мелкозернистого декоративного наполнителя является необходимым. Однако при повышенном содержании наполнителя ухудшаются реологические свойства смеси и ее способность к заполнению формы связующим составом в процессе формования [9].

в) Суперпластифицирующая добавка и активирующий раствор.

В исследовании использовалась суперпластифицирующая добавка под торговым названием MVN-SR производства компании по производству бетонных

добавок «Silkroad Ханой» (SILKROAD HANOI. JSC). Данная добавка относится к высокоэффективным водоредуцирующим добавкам третьего поколения на основе поликарбоксилатов. Плотность водного раствора добавки составляет 1,15 г/см<sup>3</sup> при температуре 25 ± 5 °С и соответствует требованиям стандарта TCVN 8826:2024 «Химические добавки для бетона» (рис. 8). В настоящем исследовании суперпластификатор применялся в количестве 1,5% от массы вяжущего для получения пластичной суспензии, обладающей способностью к текучести и самоуплотнению под действием собственного веса при формовании изделий.

Активирующий раствор, использованный в данном исследовании, представлял собой смесь 10 М раствора NaOH и раствора Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> с соотношением SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O = 2,75. Соотношение между 10 М раствором NaOH и раствором Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> составляло 50:50%.

Использованная смесь суперпластифицированной добавки и активирующего раствора изображена на рисунке 9.



**Рис. 7.** Декоративный мелкий наполнитель



**Рис. 8.** Суперпластифицирующая добавка MVN-SR

## ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ



**Рис. 9.** Смесь суперпластифицирующей добавки и активирующего раствора

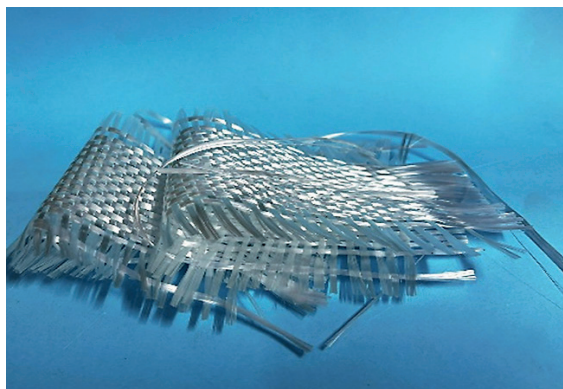
## г) Фибра.

Для дисперсного армирования декоративных светопропускающих изделий с целью повышения их трещиностойкости и улучшения механических свойств использовались синтетические полипропиленовые волокна в виде отдельных филаментов и стальная сетчатая фибра. Фибра равномерно распределялась в сырьевой композиции для снижения концентрации локальных напряжений [10] (рис. 10).

## д) Вода и пигменты.

Для приготовления бетонной смеси и последующего ухода за бетоном использовалась вода, соответствующая требованиям стандарта TCVN 4506:2012 «Вода для бетона и строительных растворов. Технические требования».

Кроме того, для придания декоративным изделиям требуемой цветовой гаммы и эстетических характеристик в исследовании применялись различные пигментные порошки красного, желтого, синего и других цветов, в зависимости от дизайнерских требований к изделиям (рис. 11).



**Рис. 10.** Фибра для предотвращения трещинообразования

## 2.2. Состав бетонной смеси и технология получения светопропускающих декоративных изделий

Состав бетонной смеси для получения «зеленого» бетона разрабатывался на основе применения золы-уноса и доменного шлака в качестве основного вяжущего, в сочетании с мелким и крупным заполнителем, водой и химическими добавками для получения высокопластичной смеси, соответствующей требованиям формования декоративных изделий. Содержание стеклянных частиц подбиралось, исходя из требований к эффекту светопропускания и эстетического вида изделий, а не только на основании физико-механических характеристик, как это принято при проектировании состава традиционного конструкционного бетона.

На основании предварительных лабораторных исследований были приняты следующие соотношения исходных материалов в 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси:



**Рис. 11.** Декоративный пигментный порошок

## ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

- вяжущее вещество – 1000 кг;
- содержание золы-уноса ТЭС и тонкомолотого гранулированного доменного шлака варьировалось от 0 до 1000 кг до достижения общей массы вяжущего в 1000 кг;
- мелкозернистый декоративный наполнитель – 500 кг;
- содержание стеклянных частиц варьировалось как 5, 10, 15 и 20% от массы вяжущего;
- содержание фибры принималось как 5 и 10% от массы вяжущего;
- дозировка суперпластифицирующей добавки составляла 1,5% от массы вяжущего;
- дозировка цветных пигментов составляла 1,0% от массы вяжущего;
- отношение активирующий раствор/вяжущее принималось равным 0,25;
- отношение вода затворения/вяжущее принималось равным 0,15.

Составы бетонных смесей для получения «зеленого» бетона представлены в таблице 1.

Технологический процесс изготовления светопротускающих декоративных бетонных изделий осуществлялся по следующим основным этапам:

1. Подготовка форм для изготовления изделий.
2. Подготовка сырьевых материалов.
3. Дозирование компонентов и приготовление бетонной смеси.
4. Разработка декоративного рисунка и размещение стеклянных частиц в формах.
5. Заливка бетонной смеси в формы и формование изделий.
6. Распалубка, уход за изделиями, нанесение защитного клевого покрытия и окончательная отделка их поверхности.

Зола-унос, доменный шлак, пигментный порошок и добавка предварительно перемешивались в сухом состоянии для обеспечения однородности смеси, после чего добавлялась вода и выполнялось перемешивание до достижения требуемой пластичности смеси. Стеклянные частицы размещались в форме в соответствии с разработанной композицией для создания светопротускающего эффекта и обеспече-

ния эстетической выразительности изделия. После приготовления бетонная смесь аккуратно заливалась в форму с целью минимизировать перекрытие поверхности стеклянных элементов и обеспечить тем самым требуемую светопропускную способность готового изделия [11, 12] (рис. 12, 13).

### 2.3. Методика испытаний

В настоящем исследовании физико-механические свойства образцов в виде тонких плит различных размеров и толщины (квадратных размером 200x200 мм и 300x300 мм, а также прямоугольных размером 200x300 мм и 300x400 мм с толщиной от 10 до 20 мм) из светопротускающих декоративных «зеленых» бетонов определялись в соответствии с требованиями стандарта TCVN 7744:2013 «Терраццо-плитка».

а) Определялись следующие нормированные в указанном стандарте показатели:

- определение расплыва конуса бетонных смесей проводилось с использованием стандартного усеченного конуса в соответствии с TCVN 12209 : 2018 [13] (рис. 14);
- средняя плотность светопротускающих «зеленых» бетонов определялась в соответствии с TCVN 3115:2022 [14];
- водопоглощение бетонов определялось в соответствии с TCVN 7744:2013 [15];
- износостойкость бетонов определялась в соответствии с TCVN 3113:2022 [16];
- прочность на сжатие в различные сроки твердения определялась на образцах-кубах размером 100×100×100 мм в соответствии с TCVN 3118:2022 [17];
- прочность на растяжение при изгибе в 28-суточном возрасте определялась на образцах-призмах размером 100×100×400 мм в соответствии с TCVN 3119:2022 [18].

б) Модель для определения коэффициента светопропускания экспериментального образца бетона.

Коэффициент светопропускания декоративных материалов используется для оценки способности

**Таблица 1.** Составы бетонных смесей

| Бетонная смесь | Содержание компонентов, кг |               |                    |   |       |                               |                      |                  |      | Итого |
|----------------|----------------------------|---------------|--------------------|---|-------|-------------------------------|----------------------|------------------|------|-------|
|                | Зола-унос ТЭС              | Доменный шлак | Стеклянные частицы | Мелкозернистый декоративный наполнитель | Фибра | Суперпластифицирующая добавка | Активирующий раствор | Цветные пигменты | Вода |       |
| ЗБ - 01        | 1000                       | 0             | 50                 | 500                                     | 100   | 15                            | 250                  | 10               | 150  | 2075  |
| ЗБ - 02        | 600                        | 400           | 100                | 500                                     | 100   | 15                            | 250                  | 10               | 150  | 2125  |
| ЗБ - 03        | 400                        | 600           | 150                | 500                                     | 50    | 15                            | 250                  | 10               | 150  | 2125  |
| ЗБ - 04        | 0                          | 1000          | 200                | 500                                     | 50    | 15                            | 250                  | 10               | 150  | 2175  |

## ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ



Рис. 12. Деревянные формы для формования изделия



Рис. 13. Подготовка форм и заливка бетонной смеси для формования изделий

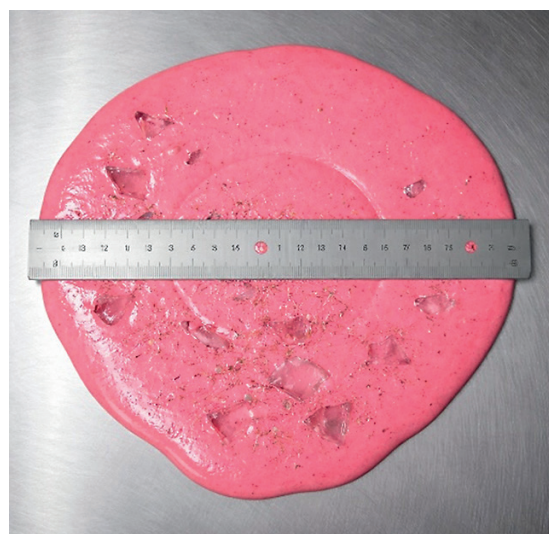


Рис. 14. Измерение расплыва конуса бетонных смесей

## ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

света проходить через материал под воздействием падающего источника света.

В данном исследовании коэффициент светопропускания определялся как отношение интенсивности света, прошедшего через образец материала (в люксах), к начальной интенсивности света, падающего на поверхность образца (в люксах).

Для светопропускающих бетонных материалов коэффициент светопропускания отражает эффективность светопропускания светопропускающих компонентов (таких как частицы стекла или прозрачные фазы), распределенных в бетонной матрице. Значение этого коэффициента зависит от структуры материала, соотношения и размера светопропускающих компонентов, а также толщины образца.

В работе интенсивность светопропускания разработанных декоративных «зеленых» бетонов определялась с помощью светоизмерителя (иллюминометра) Testo 540 (Германия) (рис. 15).

В данном исследовании экспериментальная установка, используемая для оценки светопропускания декоративных бетонных изделий, была разработана и изготовлена в лабораторных условиях. Она была выполнена в виде темного ящика, чтобы минимизировать влияние внешнего окружающего света на результаты измерений (рис. 16).

Коэффициент светопропускания бетонных образцов ( $\Psi$ ) определяется отношением интенсивности света ( $I$ , люкс), прошедшего через образец материала, к начальной интенсивности света ( $I_0$ , люкс), падающего на поверхность образца по формуле:

$$\Psi = I/I_0 \times 100\%,$$

где  $\Psi$  – коэффициент светопропускания, %;  $I$  – интенсивность света, прошедшего через исследуемый образец, люкс;  $I_0$  – начальная интенсивность света, падающего на поверхность образца, люкс.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные результаты, полученные в лабораторных условиях для бетонных смесей и полученные в результате их затвердевания образцов бесцементных светопропускающих декоративных бетонов, представлены в таблицах 2 и 3.

## 3.1. Влияние содержания золы-уноса, доменного шлака и стеклянных частиц на свойства бетонных смесей

С увеличением содержания доменного шлака и соответствующим снижением содержания золы-уноса в составе вяжущего цвет бетонных смесей постепенно изменялся от темно-серого к светло-серому и далее к белому. Это обусловлено цветовыми характеристиками сырьевых компонентов: зола-унос имеет темно-серый цвет, тогда как использованный доменный шлак отличался светлым, почти белым цветом. Кроме того, при увеличении содержания стеклянных частиц с 5 до 20% от массы вяжущего наблюдались существенные изменения свойств бетонных смесей: удобоукладываемость по расплыву конуса снижалась с 25 до 19 см, а поверхность об-



Рис. 15. Измеритель освещенности Testo 540 (Германия)

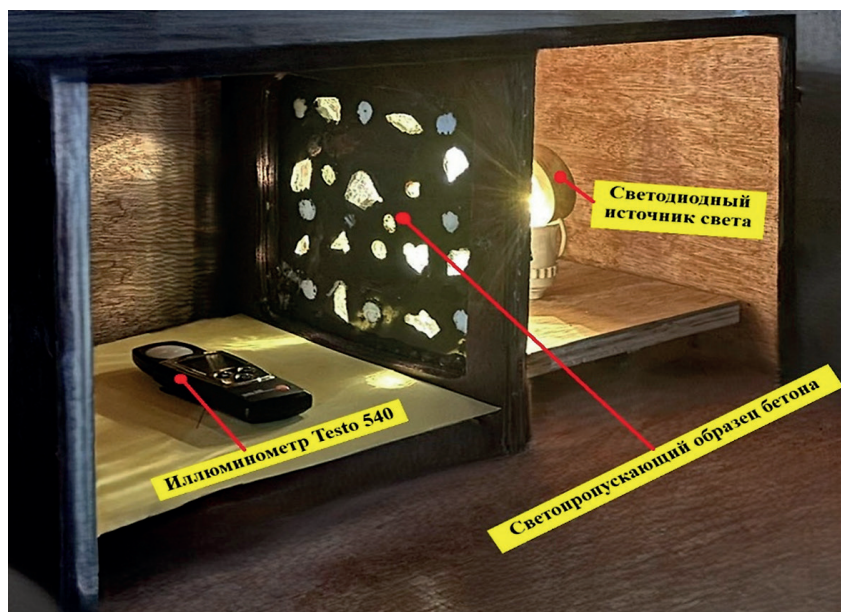


Рис. 16. Экспериментальная установка для определения коэффициента светопропускания образцов декоративных «зелёных» бетонов

**Таблица 2.** Показатели бетонных смесей

| Показатели                           | ЗБ - 01          |                        | ЗБ - 02          |                        | ЗБ - 03          |                        | ЗБ - 04          |                        |
|--------------------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|
|                                      | Среднее значение | Стандартное отклонение | Среднее значение | Стандартное отклонение | Среднее значение | Стандартное отклонение | Среднее значение | Стандартное отклонение |
| Диаметр расплыва конуса, см          | 25               | 2,1                    | 23               | 2,2                    | 20               | 1,5                    | 19               | 2,5                    |
| Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | 2068             | 7,5                    | 2117             | 6,3                    | 2119             | 8,2                    | 2169             | 8,0                    |
| Цвет                                 | Темно-серый      |                        | Светло-серый     |                        | Серо-белый       |                        | Белый            |                        |

**Таблица 3.** Физико-механические показатели образцов из светопроницающих «зелёных» бетонов в 28-суточном возрасте

| Показатели                              | ЗБ - 01                                |                        | ЗБ - 02                                 |                        | ЗБ - 03                                   |                        | ЗБ - 04                              |                        |
|---|--|------------------------|---|------------------------|---|------------------------|--------------------------------------|------------------------|
|   | Среднее значение                       | Стандартное отклонение | Среднее значение                        | Стандартное отклонение | Среднее значение                          | Стандартное отклонение | Среднее значение                     | Стандартное отклонение |
| Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>    | 2048                                   | 4,0                    | 2090                                    | 4,2                    | 2110                                      | 4,0                    | 2138                                 | 4,5                    |
| Водопоглощение, % мас.                  | 8,5                                    | 0,8                    | 8,1                                     | 1,0                    | 7,5                                       | 0,9                    | 7,3                                  | 0,8                    |
| Износостойкость, г/см <sup>2</sup>      | 0,51                                   | 0,25                   | 0,48                                    | 0,15                   | 0,36                                      | 0,2                    | 0,3                                  | 0,1                    |
| Прочность на сжатие, МПа                | 38                                     | 2,1                    | 41                                      | 2,2                    | 43  | 2,4                    | 46                                   | 2,4                    |
| Прочность на растяжение при изгибе, МПа | 4,9                                    | 0,66                   | 5,1                                     | 0,85                   | 5,3                                       | 0,9                    | 5,4                                  | 1,1                    |
| Коэффициент светопроницаемости, %       | 11,8                                   |                        | 15,7                                    |                        | 17,2                                      |                        | 20,5                                 |                        |
| Состояние поверхности                   | Гладкая поверхность темно-серого цвета |                        | Гладкая поверхность светло-серого цвета |                        | Шероховатая поверхность серо-белого цвета |                        | Шероховатая поверхность белого цвета |                        |

разцов становилась более шероховатой по сравнению с образцами, содержащими меньшее количество стеклянных частиц.

Полученные экспериментальные результаты показали, что бетонные смеси с повышенным содержанием стеклянных частиц обладают меньшей удобоукладываемостью, что снижает их способность к заполнению формы при формования изделий.

Кроме того, учитывая, что средняя насыпная плотность стеклянных частиц составляет порядка 2480 кг/м<sup>3</sup>, увеличение их содержания приводит к незначительному росту средней плотности бетонных смесей с 2068 до 2169 кг/м<sup>3</sup>.

### 3.2. Свойства светопроницающих декоративных изделий из «зеленого» бетона

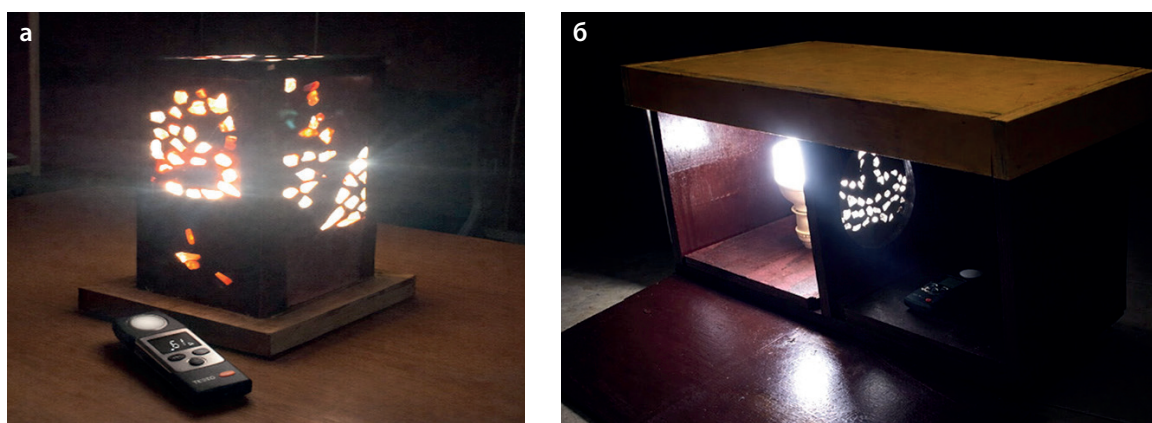
Экспериментальные результаты, представленные в таблице 3, показывают значительные изменения физико-механических свойств «зеленых» бетонов при увеличении содержания доменного шлака и стеклянных частиц в составе бетонных смесей. Стеклянные частицы выполняют двойную функцию: служат круп-

ным заполнителем и одновременно определяют светопроницающую способность изделия. При увеличении содержания стеклянных частиц прочности на сжатие и на растяжение при изгибе возрастали, соответственно, на 24% и на 8%, износостойкость ощутимо улучшалась с 0,51 до 0,3 г/см<sup>2</sup>, водопоглощение по массе снижалось с 8,5 до 7,3%, а коэффициент светопроницаемости увеличивался с 11,8 до 20,5% (рис. 17). Таким образом, стеклянный заполнитель играет ключевую роль, определяя как прочностные характеристики, так и светопроницающую способность образцов.

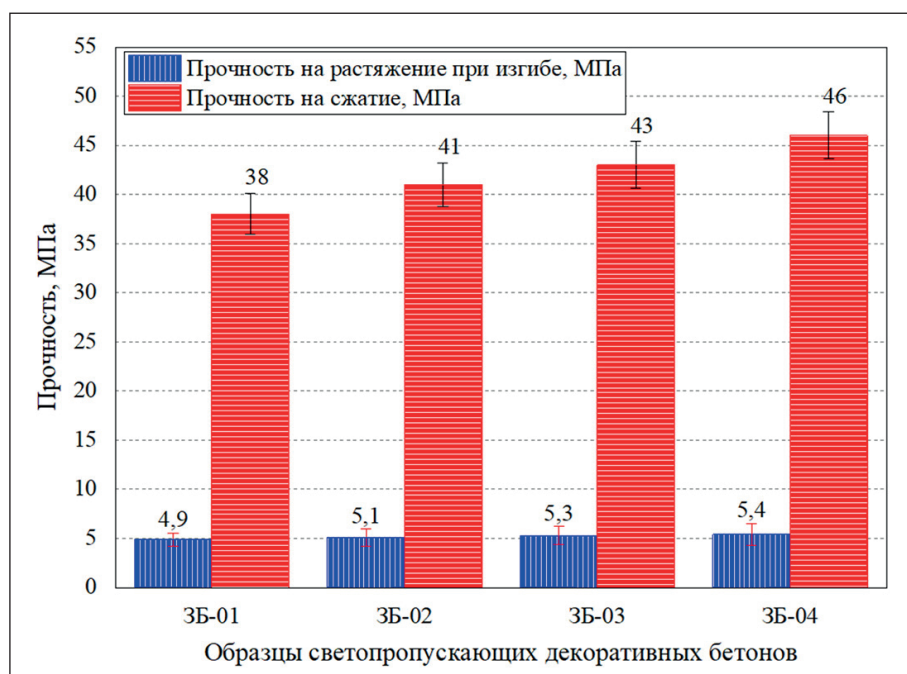
Кроме того, водопоглощение по массе в возрасте 28 суток твердения образцов из «зеленых» декоративных бетонов заметно, на 15,6% снижалось при увеличении содержания стеклянных частиц с 5 до 20% от массы вяжущего. Данную тенденцию можно объяснить низким водопоглощением стеклянных частиц [19].

Прочности на сжатие и на растяжение при изгибе образцов из полученных светопроницающих декоративных бетонов представлены на рисунке 18.

На рисунке 18 видно, что при увеличении прочности образцов на сжатие с 38 до 46 МПа прочность



**Рис. 17.** Измерение светопропускания полупрозрачных декоративных бетонных изделий: а – измерение светопропускания настольной лампы; б – измерение светопропускания тонкого листового изделия



**Рис. 18.** Прочности на сжатие и на растяжение при изгибе образцов из светопропускающих декоративных бетонов в возрасте 28 суток

при изгибе также возрастает – с 4,9 до 5,4 МПа. Соотношение между прочностью при изгибе и прочностью на сжатие колеблется в пределах от 1/8 до 1/9, что сопоставимо с соотношением указанных прочностных показателей у традиционных цементных бетонов.

Кроме того, экспериментальные исследования показали, что светопропускающие декоративные изделия, изготовленные из «зеленых» бетонов и измельченных стеклянных отходов, обладают способностью пропускать свет с одной поверхности на другую через стеклянные включения. Проходящий свет не концентрируется в виде интенсивных световых пучков, а мягко рассеивается, создавая гармоничный визуальный эффект, что делает такие изделия пригодными для внутренней и наружной декоративной отделки [20].

Светопропускающая способность декоративных изделий в основном зависит от содержания и размера стеклянных частиц, а также от цвета стекла и степени покрытия его частиц бесцементным вяжущим раствором. Образцы с использованием прозрачного или светлого стекла обеспечивают более выраженный светопропускающий эффект по сравнению с образцами, содержащими стекло темных оттенков. Одновременно контроль процесса укладки бетонной смеси в форму с целью предотвращения налипания ее растворной составляющей на поверхность стеклянных частиц является важным фактором для сохранения эффективности светопропускания изделия.

По сравнению с традиционными светопропускающими материалами, такими как художественное



**Рис. 19.** Некоторые изделия из светопропускающего бетона

стекло или светопроницаемый камень, декоративный «зеленый» бетон не обеспечивает полной прозрачности, а формирует эффект мягкого, рассеянного и глубинного освещения. Данная особенность делает такие изделия пригодными для декоративного оформления интерьеров и экстерьеров, предотвращая ослепляющий эффект и создавая комфортное визуальное восприятие света [21] (рис. 19).

В целом полученные результаты показывают, что оптимизация содержания доменного шлака и стеклянных отходов позволяет не только повысить механические характеристики, но и улучшить светопропускную способность материала, одновременно обеспечивая выполнение как технических, так и эстетических требований к светопропускающим декоративным бетонным изделиям.

### 3.3. Оценка потенциала применения декоративного «зеленого» бетона в строительстве

Результаты исследования показывают, что светопропускающие декоративные изделия из «зеленых» бетонов и стеклянных частиц обладают высоким потенциалом практического применения в строитель-

стве, особенно в области внутренней и наружной отделки. При прочности на сжатие до 46 МПа и коэффициенте светопропускания до 20,5% подобные изделия одновременно обеспечивают необходимые механические характеристики и выраженный эстетический световой эффект. Продукция может применяться в качестве декоративных облицовочных панелей, светопропускающих перегородок, настенных декоративных панелей, вывесок, а также акцентных архитектурных элементов в жилых домах, гостиницах, ресторанах, школах и общественных пространствах (рис. 20, 21). По сравнению с импортируемыми светопропускающими материалами данная продукция обладает ценовым преимуществом благодаря использованию доступных отечественных отходов, таких как зола-унос, доменный шлак и стеклобой.

Кроме того, использование боя стекла и крупнотоннажных промышленных отходов для изготовления декоративных изделий способствует сокращению потребления природных ресурсов и снижению выбросов  $\text{CO}_2$  по сравнению с импортируемыми светопропускающими материалами или традиционными декоративными материалами [22]. Это является важным преимуществом подобной продук-



**Рис. 20.** Картина «Весна в листве»



**Рис. 21.** Картина «Попутный ветер»

## ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

ции в условиях, когда в строительстве все большее предпочтение отдается экологичным и долговечным материалам.

- Потенциал применения светопропускающего декоративного «зеленого» бетона:
  - возможность изготовления конструкций, выполняющих одновременно ограждающую и несущую функции, благодаря высокой прочности материала;
  - возможность использования в качестве элемента естественного освещения здания, поскольку материал обладает хорошей светопрозрачностью;
  - возможность применения в интерьерной и экстерьерной отделке зданий в сочетании с традиционными материалами, что позволяет создавать уникальные архитектурные световые эффекты;
  - возможность изготовления декоративных разделительных перегородок.

Однако для расширения области применения декоративных изделий из бесцементных бетонов необходимо продолжить исследования по оптимизации технологии их изготовления, контролю качества поверхности, снижению тенденции к образованию трещин и оценке долговечности изделий в различных условиях эксплуатации, особенно во влажной при наружном применении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных экспериментальных результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. «Зеленый» бетон без использования цемента, изготовленный с использованием золы-уноса, доменного шлака и стеклянных частиц, может при-

меняться для производства светопропускающих декоративных изделий, обеспечивая стабильность формы, относительно однородную поверхность и механическую прочность, соответствующую эксплуатационным требованиям.

2. Стеклянные частицы в матрице «зеленого» бетона позволяют свету проходить через материал, создавая мягкий рассеянный световой эффект, подходящий для внутренней и наружной декоративной отделки.

3. Светопропускная способность в основном зависит от содержания, размера и цвета стеклянных частиц, а также от степени их перекрытия вяжущей матрицей. Прозрачное и светлое стекло обеспечивает более выраженный световой эффект по сравнению со стеклом темных оттенков.

4. Использование стеклобоя, золы-уноса и доменного шлака способствует снижению потребления природных ресурсов и выбросов CO<sub>2</sub>, что соответствует направлению развития производства экологичных строительных материалов и принципам создания экономики замкнутого цикла.

5. Светопропускающий «зеленый» бетон демонстрирует высокий потенциал применения в интерьерах и экстерьерах зданий различного назначения, а также хорошие перспективы развития, поскольку является экологически безопасным декоративным материалом.

Рекомендуется продолжить исследования по оценке долговечности, трещиностойкости и стабильности цвета декоративных изделий из бесцементных бетонов в различных условиях эксплуатации, особенно при наружном применении, что послужит основой для их промышленного производства и практического использования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Scrivener K.L., John, V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018;114:2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
2. Tang Van Lam, Vo Dinh Trong, Translucent concrete made from fly ash and glass waste. *Vietnam Journal of Science and Technology*. 2024;7:36–37.
3. Черникова Т.Ю. Прозрачный бетон: особенности материала и перспективы его применения. *Сборник научных трудов по результатам Международной научно-технической конференции молодых учёных БГТУ им. В.Г. Шухова*. Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. С. 1358–1361
4. Pacheco-Torga F., Jalali S. Reusing waste glass in construction materials. *Construction and Building Materials*. 2010;24(11):2149–2158. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.020>
5. Tang Van Lam, Pham Quang Dao, Tran Thi Kim Phung. *Potential for recycling waste glass in the production of “translucent green concrete” in Vietnam*; 2025. Available at: <https://www.tapchikientruc.com.vn/chuyen-muc/tiem-nang-tai-che-kinh-phe-thai-trong-san-xuat-be-tong-xanh-truyen-sang-tai-viet-nam.html> (accessed date 05.05.2026)
6. Tang Van Lam, Pham Quang Dao, Tran Thi Kim Phung, Lai Ngoc Hung. Utilization of waste glass in manufacturing environmentally friendly translucent decorative concrete products toward a sustainable future. *TNU Journal of Science and Technology*; 2025.

## ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

7. Novikova A.M., Eroпов L.A. Modern types of concrete for finishing and for structures. Collection: Days of Science of Students of the Institute of ASE-2021: *Collection of scientific papers based on the results of scientific and practical conference*. Vladimir: Publishing house of VISU; 2021.
8. Tang Van Lam, Bulgakov B.I. Feasibility of using ash and slag waste and rice husk ash in geopolymer concretes for the construction of structures in Vietnam. *BDU Journal of Science & Technology*. 2021;03, No. 01:26–40.
9. Liu H.Q., Chen X. Influence of Aggregate on Workability of Self-Compacting Concrete. *Advanced Materials Research*. 2012;482–484:1101–1104. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.1101>
10. Bentur A., Mindess S. *Fibre reinforced cementitious composites*. CRC Press; 2007.
11. Altomate A., Alatshan F., Jadan M., Mashiri F. Experiment study of light transmitting concrete. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 2016;7(3–4):133–139
12. Nguyen Duc Tuan, Huynh Phuong Nam, Nguyen Van Huong, Nguyen Minh Ha. Study on Mix Proportion Design of Mineral Aggregate Concrete and Environmentally Friendly Concrete for Application in Translucent Concrete Production. *Journal of Science and Technology – The University of Danang*, 2022;20:8.
13. TCVN 12209:2018. Self-compacting concrete – Specification and test method.
14. TCVN 3115:2022. Hardened concrete – Test method for density.
15. TCVN 7744:2013. Terrazzo tiles.
16. TCVN 3113:2022. Hardened concrete – Test method for water absorption
17. TCVN 3118:2022. Concrete – Method for determination of compressive strength.
18. TCVN 3119:2022. Hardened concrete – Test method for flexural tensile strength.
19. Duong Thanh Qui, Phan Van Quynh, Pham Huu Thien. Study on the Influence of Dispersed Fibers on the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. *Journal of Materials and Construction – Ministry of Construction*. 2025;15(01):28–33. <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2025.700>
20. Tang L.V., Thanh L.X., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Bazhenova S.I. Light-transmitting concrete using ash and slag, and glass waste. *Nanotechnologies in Construction*. 2025;17(4):475–484. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-4-475-484>
21. Du Tan. Waste glass powder as cement replacement in concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2014;12(11):468–477. <https://doi.org/10.3151/jact.12.468>
22. Nguyen M.H., Huynh P.N. *CO<sub>2</sub> Emission Reduction Efficiency of Light-Transmitting Concrete and Influencing Factors*, *Journal of Science and Technology – The University of Danang*, 2025;23(6A):42–47. [https://doi.org/10.31130/ud-jst.2025.23\(6A\).149](https://doi.org/10.31130/ud-jst.2025.23(6A).149)

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Лам Танг Ван** – кандидат технических наук, преподаватель-исследователь, Ханойский горно-геологический университет (HUMG), 18 Фо Виен, Донг Нгак, Ханой, 100000, Вьетнам, tangvanlam@humg.edu.vn, <https://orcid.org/0000-0002-4857-835X>

**Нгуен Санг** – кандидат технических наук, преподаватель-исследователь, Университет Тхань Донг, 3 Ву Конг Дан, район Ту Минь, Хайфон, 180000, Вьетнам, nguensang@thanhdong.edu.vn, <https://orcid.org/0009-0007-7828-7899>

**Булгаков Борис Игоревич** – кандидат технических наук, доцент кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26, Российская Федерация, BulgakovBI@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4737-8524>

**Лукьянова Надежда Алексеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26, Российская Федерация, GalcevaNA@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2014-6739>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Лам Танг Ван** – научное руководство; итоговые выводы.

**Нгуен Санг** – концепция исследования; написание исходного текста.

**Булгаков Б.И.** – научное руководство; итоговые выводы.

**Лукьянова Н.А.** – обработка материала.

## Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.04.2026; одобрена после рецензирования 06.06.2026; принята к публикации 10.06.2026.