НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 691.421
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.529-544

Использование натурального пуццолана в качестве улучшения портландцемента для производства бетона с экологическими свойствами («зеленый» бетон)

Мустафа Али Вассуф, Джамал Юнес Омран, Али Хейрбек
Университета Тишрин; г. Латакия, Сирия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительная отрасль считается одной из основных причин ухудшения состояния окружающей среды из-за использования традиционных строительных материалов, таких как цемент. В результате возникает острая необходимость в разработке устойчивых альтернатив производству экологически чистого бетона с применением натуральных необработанных материалов. Признавая важность цемента для урбанизации человечества, следует отметить, что его широкое использование, несомненно, способствует глобальному потеплению, которое угрожает окружающей среде во всем мире из-за выбросов углекислого газа, когда ископаемое топливо применяется для расплавления продуктов, которые используются при его производстве, и представляют собой смесь глины, воды и извести для получения основного связующего материала, т.е. клинкера.

Материалы и методы. Цель исследования — изучение возможности замены портландцемента натуральным пуццоланом в соответствии с соотношениями замены в диапазоне от 10 до 50 %, а также изучение влияния этой замены на физические свойства, наиболее важными из которых являются теплопроводность и механические свойства, представленные сопротивлением простому давлению, с учетом следующих факторов: использование переработанного гравия в качестве альтернативы натуральному гравию.

Результаты. Результаты показали, что при увеличении процентного содержания замены цемента пуццоланом повышается термостойкость бетона, так как замена цемента равной массой пуццолана приводит к снижению теплопроводности на 5 %. Кроме того, переработанные заполнители обладают большей термостойкостью по сравнению с натуральными заполнителями, даже если 50 % цемента заменено молотым пуццоланом. Отмечается увеличение стойкости более чем на 24 %, а снижение стойкости полученного бетона к простому давлению допустимо, если замена на пуццолан составляет менее 50 %.

Выводы. Простые значения прочности при сжатии кубических образцов превышают минимальные пределы международных спецификаций на цементные блоки, что позволяет изготавливать цементные блоки с использованием вторичных заполнителей с возможностью замены цемента молотым пуццоланом в соответствии с различными коэффициентами замещения до 50 %.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологически чистые материалы, натуральный пуццолан, переработанная галька, теплопроводность, прочность при сжатии, обрабатываемость бетона, термическое сопротивление

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Вассуф М.А., Омран Д.Ю., Хейрбек А.* Использование натурального пуццолана в качестве улучшения портландцемента для производства бетона с экологическими свойствами («зеленый» бетон) // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 529–544. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.529-544

Автор, ответственный за переписку: Мустафа Али Вассуф, moustafa.wassouf@tishreen.edu.sy.

Using natural pozzolana as an improvement of Portland cement to manufacture concrete with environmental properties (Green Concrete)

Moustafa Ali Wassouf, Jamal Younes Omran, Ali Kheirbek
Tishreen University; Latakia, Syria

ABSTRACT

Introduction. The construction industry is considered as one of the major causes of environmental degradation due to the use of traditional building materials such as cement. As a result, there is an urgent need to develop sustainable alternatives to produce eco-friendly concrete using natural unprocessed materials. While acknowledging the importance of cement in the urbanization of mankind, it should be noted that its widespread use undoubtedly contributes to global warming which threatens the environment worldwide due to carbon dioxide emissions when fossil fuels are used to melt the products used in its manufacture, which are a mixture of clay, water and lime to produce the main binding material i.e. clinker.

Materials and methods. The aim of the study is to investigate the possibility of replacing Portland cement with natural pozzolana according to replacement ratios ranging from 10 to 50 %, and to study the effect of this replacement on physical

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 4, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 4, 2025

© М.А. Вассуф, Д.Ю. Омран, А. Хейрбек, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

properties, the most important of which are thermal conductivity and mechanical properties represented by the resistance to simple pressure, taking into account the following factors: the use of recycled gravel as an alternative to natural gravel.
Results. The results showed that increasing the percentage of cement replacement with pozzolana increases the thermal resistance of concrete, since replacing cement with an equal mass of pozzolana results in a 5 % reduction in thermal conductivity. In addition, recycled aggregates have higher thermal resistance compared to natural aggregates even when 50 % of cement is replaced by ground pozzolan. An increase in resistance of more than 24 % is observed, and a decrease in the simple pressure resistance of the resulting concrete is acceptable if the replacement with pozzolana is less than 50 %.
Conclusions. The simple compressive strength values of cubic specimens exceed the minimum limits of international specifications for cement blocks, which allows the manufacture of cement blocks using secondary aggregates with the possibility of replacing cement with ground pozzolana according to different replacement ratios up to 50 %.

KEYWORDS: sustainable materials, natural pozzolana, recycled pebbles, thermal conductivity, resistance to simple pressure, workability of concrete, thermal resistance

FOR CITATION: Wassouf M.A., Omran Ja.Yo., Kheirbek A. Using natural pozzolana as an improvement of Portland cement to manufacture concrete with environmental properties (Green Concrete). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):529-544. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.529-544 (rus.).

Corresponding author: Moustafa Ali Wassouf, moustafa.wassouf@tishreen.edu.sy.

ВВЕДЕНИЕ

Бетон, изготовленный из портландцемента, используется во всем мире как строительный материал более 150 лет. Однако цементный раствор и бетон имеют значительные недостатки, такие как низкая прочность при изгибе, медленная скорость отверждения, большое трещинообразование при высыхании и низкая химическая стойкость. Для преодоления этих недостатков применяются разнообразные добавки [1].

Портландцемент изготавливают путем измельчения клинкера с гипсом. Клинкер получают путем кальцинирования и сжигания группы сырьевых материалов — это известняк, оксид железа, суглинок и песок. Таким образом, процесс производства клинкера — более топливозатратный, отличается большим выбросом углерода, что оказывает воздействие на окружающую среду. Чем меньше цементная промышленность сможет использовать клинкер, тем она будет более экологичной, заменив его экологически чистым сырьем.

Пуццолановые материалы представляют собой широкую категорию кремнистых и глиноземистых материалов (материалов, содержащих кремнезем и оксид алюминия), которые не являются цементирующими материалами, но при реакции с гидроксидом кальция в присутствии воды могут образовывать соединения с цементирующими свойствами. Пуццолан — один из встречающихся в природе видов вулканического туфа. Некоторые из пуццоланов промышленные, например летучая зола, образующаяся при сжигании угля на электростанциях [2].

Настоящее исследование посвящено изучению замены портландцемента молотым пуццоланом в соответствии с различными коэффициентами в пределах 10, 30 и 50 %. Отмечаются физические свойства (теплопроводность) и механические (стойкость к простому давлению) производимого бетона с целью уменьшения воздействия на окружающую среду и снижения экономических затрат.

Экологичные строительные материалы

Экологичные строительные материалы используются в строительных проектах и уменьшают его воздействие на окружающую среду, а также помогают улучшить качество жизни людей, живущих на объекте или в здании, способствуют расширению применения энергии и природных ресурсов и сокращению выбросов углекислого газа [3]. Этим материалам в последние годы уделяется большое внимание, поскольку их часто добывают из возобновляемых ресурсов. Экологичные строительные материалы помогают застройщикам и подрядным компаниям реализовывать высококачественные проекты, которые достигают целей устойчивого развития и сохраняют окружающую среду за счет сокращения выбросов углекислого газа, помимо экономии затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание в долгосрочной перспективе. Материалы играют решающую роль на протяжении всего срока службы любого изделия [4]. Однако его производство сопряжено с множеством проблем, поскольку традиционные производственные процессы ответственны за увеличение выбросов углекислого газа, что приводит к растущей обеспокоенности по поводу глобального потепления [5].

Многие исследования доказали, что традиционные строительные материалы, используемые в строительных элементах, таких как крыши и стены, служат основной причиной повышенных тепловых нагрузок (отопление и кондиционирование воздуха) из-за их низкой термической устойчивости к атмосферным воздействиям [6]. В табл. 1 представлено сравнение традиционных и экологически чистых строительных материалов.

Натуральный пуццолан

Пуццоланы представляют собой широкий класс кремнистых и глиноземистых материалов, которые обладают небольшой цементирующей ценностью или не имеют ее, но в мелкодисперсной форме и в присутствии воды химически реагируют с гидроксидом кальция ($Ca(OH)_2$). При нормальных условиях и при комнатной температуре образовывают соединения с цементирующими свойствами.

Они бывают двух типов:

1. Натуральный, возобновляемый пуццолан, полученный из вулканического пепла.

Табл. 1. Сравнение экологически чистых и традиционных строительных материалов [3, 7]

Table 1. Comparison of environmentally friendly and traditional building materials [3, 7]

Традиционные строительные материалы Traditional Building Materials	Экологичные строительные материалы Green Building Materials	Строительные материалы, характеристики и производство Building materials, characteristics and production
Глина, гипс, гранит Clay, gypsum, granite	Хвосты, летучая зола, отходы промышленности, сельскохозяйственные отходы Tailings, fly ash, waste industrial, agricultural waste	Композиция Composition
Цемент, глиняный кирпич, деревянная доска Cement, clay brick, wood board	Алюминиевый сплав, «зеленый» бетон, углеродное волокно, зеленое вакуумное стекло Aluminum alloy, green concrete, carbon fibre, green vacuum glass	Материал Material
Единственная функция, низкая температура воспламенения, легко поддается формованию Single function, low ignition point, easy to mold	Теплоизоляция, влагостойкость, огнестойкость Thermal insulation, moisture resistance, fire retardant	Представление Performance
Подвержен образованию большого количества утечек Prone to a large number of leaks	Работа с низким энергопотреблением, экологически чистое производство Low power consumption operation‹ clean production	Производство Production

2. Промышленный пуццолан, изготовленный из:

• заводских отходов, таких как угольная зола (летучая зола), образующаяся в результате сжигания угля на электростанциях;

• железного шлака, образующегося из отходов металлургического завода (шлак доменной печи).

Природные пуццоланы можно разделить на две категории материалов: вулканического происхождения и осадочного происхождения [8], поскольку в Сирии нет дополнительных связующих искусственного происхождения. Однако страна богата природными ресурсами, здесь много природных пуццолановых рудников, объем которых оценивается примерно в 1 млрд т. По данным Генеральной корпорации геологии и минеральных ресурсов, ежегодное производство цемента в Сирии составляет около 6 млн т. На рис. 1 показаны натуральные зерна с участка Телль-Шихан. В будущем ожидается значительное увеличение этого количества в связи с этапом восстановления, а поскольку Сирия является страной с низким уровнем дохода, предпринимается много попыток найти более экономичные методы. Один из таких методов — использование натуральных добавок для снижения себестоимости производства цемента. Сирийские заводы в настоящее время добавляют большое количество натурального пуццолана (~25 %) в первую цементную смесь для производства цемента с добавками CEM II.

Рис. 1. Изображение натуральных зерен пуццолана с месторождения Телль-Шихан [9]

Fig. 1. Image of natural pozzolana grains from the Tell Shihan deposit [9]

Природный пуццолан встречается в Сирии на участке Телль-Шихан, расположенном примерно в 70 км к юго-востоку от Дамаска и в 15 км к северо-западу от провинции Ас-Сувайда, покрытым Харрат аль-Шам, представляющим собой вулканическое поле площадью около 45 000 км^2, охватывающим часть Иордании и Королевства Саудовская Аравия. Таким образом, природный пуццолан, обнаруженный на стоянке Телль-Шихан, имеет вулканическое происхождение. Основные оксиды, образующие натуральный пуццолан: SiO_2 — 44,9 %, Al_2O_3 — 16,5 %, Fe_2O_3 — 8,9 %, CaO — 9,6 %, MgO — 8,4 %, оксиды щелочных металлов — 4,4 %. Минеральный анализ природного пуццолана проведен с применением технологии дифракции рентгеновских лучей [9, 10]. На рис. 2 показаны результаты анализа природного пуццолана, на рис. 3 — с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) представлены зерна натурального пуццолана, демонстрирующие их везикулярную структуру.

Из рис. 2 видно, что пуццолан содержит оксиды железа (Fe_2O_3 — 16,5 %), диоксид кремния (SiO_2 — 44,9 %) и оксиды алюминия (Al_2O_3 — 17,5 %). Общее содержание этих оксидов составляет более 70 %, и поэтому оно соответствует требованиям ASTM C618.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 4, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 4, 2025

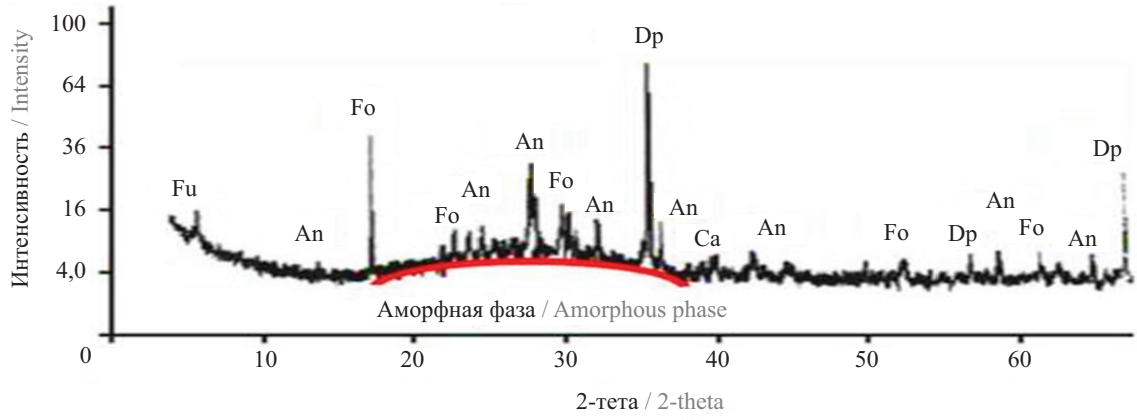


Рис. 2. Рентгеновский анализ натурального пуццолана с указанием минералов [9]

Fig. 2. X-ray analysis of natural pozzolana showing minerals [9]

В табл. 2 показано, как измельченный пуццолан можно использовать в бетоне.

Применение натурального пуццолана снижает выбросы углекислого газа, связанные с производством портландцемента, поскольку замена 50 % портландцемента натуральным пуццоланом означает сокращение выбросов парниковых газов при производстве цемента вдвое [11]. Предыдущие исследования продемонстрировали важность использования натурального пуццолана в качестве заменителя кремнистого песка при производстве легкого цементного раствора с сопротивлением простому давлению в диапазоне 170–400 кг/см^2 и меньшей плотностью 1920 кг/м^3. Результаты показали, что применение натурального пуццолана обладает рядом преимуществ, наиболее важным из которых является снижение плотности раствора и последующее получение легкого раствора, который можно использовать в конструкционных элементах, когда его сопротивление простому давлению превышает 170 кг/см^2 [12].

Мусорные отходы

Строительные отходы определяются как неопасные твердые отходы, образующиеся в результате сноса, строительства, реконструкции и сноса сооружений и зданий. К полученным материалам относятся: бетон, блоки, дерево, стекло, железо, алюминий и другие материалы. Принцип переработки основан на сокращении использования новых ресурсов при строительстве зданий, которые проектировались таким образом, чтобы в конце своего срока службы они были источником и ресурсом для других зданий.

Деятельность по строительству, сносу и реконструкции приводит к образованию большого количества отходов, которые вредны для окружающей среды и могут оказать существенное влияние на глобальное потепление, если не управлять ими должным образом [13]. По оценкам, около 35 % отходов строительства и сноса попадает на свалки без какой-либо переработки [14]. Поэтому необходимы новые решения, технологии и методы управления ущер-

Табл. 2. Использование измельченного пуццолана в бетоне согласно требованиям к химическому составу стандарта ASTM C618

Table 2. Use of pulverized pozzolana in concrete according to ASTM C618 chemical composition requirements

Химический состав Chemical composition	Класс / Class		
	N	F	C
$(SiO_2)(Al_2O_3)(Fe_2O_3)$, min, %	Сырые или кальцинированные натуральные пуццоланы Raw or calcined natural pozzolans	Летучая зола. Этот класс летучей золы обладает пуццолановыми свойствами Fly ash. This class of fly ash has pozzolanic properties	Летучая зола, помимо пуццолановых свойств, также обладает некоторыми цементирующими свойствами Fly ash, besides pozzolanic properties, also has some cementitious properties
	70	50	50

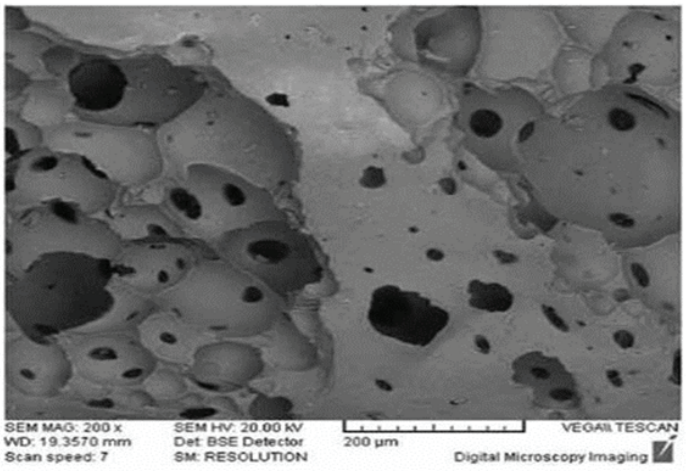


Рис. 3. Изображение зерен натурального пуццолана в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), показывающее их везикулярную структуру [9]

Fig. 3. Scanning electron microscope (SEM) image of natural pozzolana grains showing their vesicular structure [9]

бом от отходов. Европейская комиссия предложила к 2020 г. перерабатывать не менее 70 % отходов строительства и сноса. Однако в некоторых государствах-членах ЕС уровень переработки уже превысил 70 %, и это достигнуто за счет передовой практики управления отходами, в основном применяющей принципы переработки в строительном секторе [15].

Основным преимуществом использования бутовых материалов является сохранение ресурсов и энергии, которого можно достичь за счет сокращения производства новых материалов (Агентство по охране окружающей среды США). На рис. 4 приведены некоторые образцы строительного мусора и отходов сноса, а также другие материалы. Большой процент из них можно переработать и использовать, но это непростая задача. Их можно подвергнуть обработке (дробление, молотьба, измельчение, сглаживание, фильтрация), чтобы они затем были пригодны для повторного использования в строительных работах, таких как, например, дороги (фундаментные слои, обратная засыпка, слои осадки). Применение щебня зданий и сооружений, состоящего из конструкционных бетонных компонентов и цементных блоков, представляет собой альтернативный материал для производства мягкого окатанного гравия, используемого при приготовлении бетонных смесей, поскольку считается, что это важный элемент достижения устойчивого развития за счет сохранения природных ресурсов, так как молотые цементные блоки могут использоваться в качестве мягких материалов для производства бетонных смесей с применением менее важных конструктивных элементов в зависимости от требуемой устойчивости к давлению в размере, не превышающем 65 % [16].

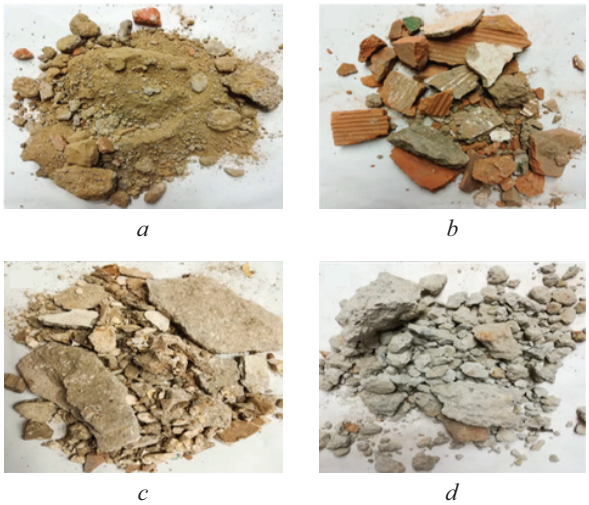


Рис. 4. Некоторые образцы отходов строительства и сноса зданий [17]

Fig. 4. Some specimens of construction and demolition waste [17]

Наиболее актуальна проблема утилизации строительных отходов для районов недавних боевых действий [18]. Применение отходов промышленности в качестве заполнителей в бетон позволяют решить проблему утилизации этих отходов и одновременно снизить объемы добычи природных каменных материалов, и, как следствие, уменьшить нагрузку на окружающую среду [19, 20].

Цель исследования — изучение замены портландцемента молотым пуццоланом в соответствии с различными коэффициентами замены в пределах 10, 30 и 50 % и его влиянием на физико-механические свойства бетона.

Задачи исследования:

1. Исследование свойств полученного свежего бетона по показателям теплопроводности и устойчивости к простому давлению и сравнение этих результатов с традиционным бетоном.

2. Изучение характера взаимосвязи между переработанными заполнителями и натуральным пуццоланом, используемым для улучшения портландцемента.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 4, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 4, 2025

В России пуццолан также широко применяется в строительстве, особенно при возведении зданий и сооружений в условиях высоких нагрузок, например в мостостроении, тоннелях, гидротехнических сооружениях и т.д. Пуццолан позволяет улучшить качество бетона, увеличить его срок службы и снизить затраты на строительство. Таким образом, использование пуццоланов является актуальным и для Сирии, и для России, и применяется в различных областях строительства для улучшения качества и надежности строительных материалов.

Использование этих альтернативных материалов не только помогает снизить выбросы углерода, но также способствует сохранению невозобновляемых ресурсов. Переход к более устойчивым практикам может иметь положительное влияние на строительную индустрию в России путем стимулирования экологически чистых методов и снижения затрат. В целом внедрение устойчивых практик в строительную индустрию в России может привести к более экологически чистому и экономически выгодному будущему.

Использование экологически чистых материалов имеет решающее значение для снижения воздействия строительства на окружающую среду и продвижения более устойчивого будущего. Однако доступность и стоимость этих материалов часто является проблемой. Поэтому основное внимание уделяется материалам из местных источников, таких как пуццолан и бутовый гравий, которые можно применять в строительных элементах, что способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду и сокращению затрат на строительство без изменения характеристик строительных элементов. Следует отметить важность использования натурального пуццолана и вторичного гравия при производстве экологически чистого бетона, чтобы снизить зависимость от цемента. Заменяя половину цемента натуральным пуццоланом и используя вторичный гравий, строительные проекты в России могут стать более экологически устойчивыми.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследованиях принята экспериментальная методика изучения природного пуццолана, щебня и образцов бетона, изготовленных из вторичного сырья, а также аналитическая и математическая методика исследования изменения механических и физических показателей при темпах замены портландцемента молотым пуццоланом и натурального гравия переработанным гравием.

Для этого образцы бетонов всех смесей подвергались физико-механическим испытаниям на образцах кубической формы с размерами (10 × 10 × 10 см). Испытание на теплопроводность проводилось путем прямого воздействия тепла на образцы бетона. Спроектирована тепловая камера, изолированная термоплитками, размерами 10 × 10 см и высотой 20 см. Она оснащена источником тепла снизу и пустым верхом для испытуемого образца. Форма камеры и источника тепла позволяет нагревать образец только с одной стороны, чтобы измерить передачу тепла с этой стороны на другую через определенный период времени. Затем выполнено простое испытание на устойчивость к сжатию кубических образцов в возрасте 28 сут.

Из одного из зданий, пострадавших в результате землетрясения 6 февраля в Латакии, было вывезено достаточное количество щебня для разборки, чтобы обработать его в лаборатории, прежде чем охарактеризовать и использовать в процессе изготовления лабораторных образцов.

В табл. 3 приведены результаты измерения видимого и твердого объемного веса, а также процентного содержания пропитки натуральной гальки и переработанной гальки, используемой при изготовлении битумных кубических моделей.

Табл. 3. Результаты определения видимой и твердой объемной массы различных камней

Table 3. Results of visible and solid volume weight of different stones

Впитывание, % Absorption, %	Твердая объемная масса, кг/л Solid volumetric mass, kg/l	Виртуальная объемная масса, кг/л Virtual volumetric mass, kg/l	Образец Specimen
9	2,280	1,274	Переработанный гравий Recycled gravel
3,3	2,74	1,439	Натуральный гравий Natural gravel
–	2,55	1,338	Мелкий песок Fine sand
–	2,68	1,570	Крупный песок Coarse sand

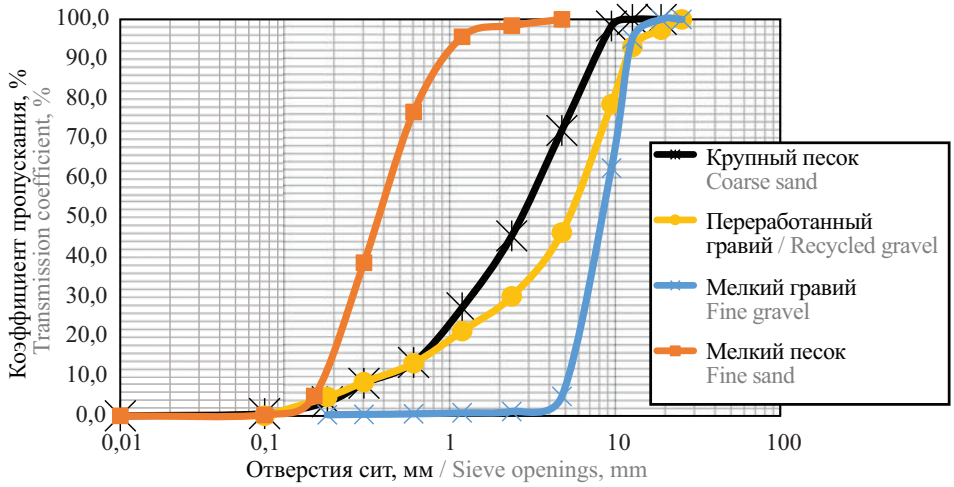


Рис. 5. Кривая градиента зернистости для тестируемой гальки

Fig. 5. Grain gradient curve for the tested pebbles

Эквивалентные значения песка для двух типов используемого песка составили 85 % для мелкого кремнистого песка, добытого в Набеке, и 68 % для крупного известнякового песка. При заливке бетона применялся обычный портландцемент марки 1 и марки 32,5 производства Тартуского завода.

Состав бетонных смесей

Для приготовления лабораторных моделей сырого бетона смесь необходимо было проектировать на основе результатов градации зерен натуральных и переработанных заполнителей. Применен французский метод расчета (Дре-Горисс). Ниже показаны этапы составления этих смесей и конечные пропорции, полученные для различных смесей.

Утверждено 8 бетонных смесей, разделенных на две группы с разными коэффициентами замены каждого из заполнителей (природного и вторсырья), кроме замены цемента молотым пуццоланом в следующих массовых соотношениях 10, 30, 50 %. Под вторичным заполнителем подразумевается смесь компонентов из щебня, приготовленная в следующем весовом соотношении: 60 % бетона, 10 % плитки, 20 % блоков, 10 % керамики. На рис. 5 представлены кривые градации зерен гравия, используемого в бетонных смесях.

В каждой группе смесей фиксировали соотношение воды и цемента (В/Ц) для предотвращения взаимного влияния параметров, влияющих на свойства получаемого бетона. Было принято соотношение В/Ц = 0,6, а также коэффициент качества гравия (Г) = 0,35, который связан с максимальным диаметром гравия. Г = 0,35 — хороший показатель, объем воздуха 10 л/м^3.

Состав некоторых из этих смесей:

- смесь (NC) состоит из 100 % портландцемента и природного гравия;
- смесь (GCP 50 %) состоит из 50 % портландцемента, 50 % пуццолана и природного гравия;
- смесь (NCR) состоит из 100 % портландцемента и 100 % переработанных заполнителей;
- смесь (GCRP 50 %) состоит из 50 % портландцемента, 50 % пуццолана и 100 % переработанного гравия.

В табл. 4, 5 приведены результаты проектирования бетонных смесей.

Табл. 4. Результаты разработки смесей для первой группы для 1 м^3

Table 4. Mixture development results for the first group for 1 m^3

Компоненты смеси, кг/м^3 Mixture components, kg/m^3	Смеси первой группы Mixtures of the first group			
	NC	$GCP_{10\,\%}$	$GCP_{30\,\%}$	$GCP_{50\,\%}$
Обычные камни среднего размера Normal average stones	994	994	994	994
Мелкий песок Fine sand	375	375	375	375
Линзовидный крупный песок Lenticular coarse sand	375	375	375	375

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 4, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 4, 2025

Окончание табл. 4 / End of the Table 4

Компоненты смеси, кг/м³ Mixture components, kg/m³	Смеси первой группы Mixtures of the first group			
	NC	$GCP_{10\,\%}$	$GCP_{30\,\%}$	$GCP_{50\,\%}$
Пуццолан Pozzolana	0	35	105	175
Цемент Cement	350	315	245	175
Вода Water	210	210	210	210

Табл. 5. Результаты разработки смесей для второй группы для 1 м³

Table 5. Mixture development results for the second group for 1 m³

Компоненты смеси, кг/м³ Mixture components, kg/m³	Смеси второй группы Mixtures of the second group			
	NCR	$GCR_{P10\,\%}$	$GCR_{P30\,\%}$	$GCR_{P50\,\%}$
Мелкий песок Fine sand	375	375	375	375
Линзовидный крупный песок Lenticular coarse sand	375	375	375	375
Пуццолан Pozzolana	0	35	105	175
Цемент Cement	350	315	245	175
Вода Water	210	210	210	210
Переработанный гравий Recycled gravel	994	994	994	994

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже приведены результаты, полученные после проведения физико-механических испытаний кубических образцов размерами (10 × 10 × 10 см) с различными коэффициентами замены.

Физические свойства мягкого бетона

Эти характеристики включали в себя как кажущийся объемный вес, так и посадку с использованием специального измерительного конуса, называемого конусом Абрамса, для определения обрабатываемости бетона, его прочности и процентного содержания воды, добавляемой к цементу. Подходящая текстура (посадка) варьируется в зависимости от места установки. В табл. 6 показаны измеренные значения осадки для различных смесей, а также объемный вес свежего бетона.

Определение удобоукладываемости бетонной смеси

Удобоукладываемость бетонной смеси оценивают показателями подвижности или жесткости. Подвижность бетонной смеси оценивают по осадке (ОК) или расплыву (РК) конуса, отформованного из бетонной смеси. Для этого используют конус Абрамса, загрузочную воронку, стальную линейку, кельму, гладкий лист металла и прямой металлический стержень диаметром 16 мм с округленными концами. С целью определения подвижности бетонной смеси с зернами заполнителя наибольшей крупностью (до 40 мм включительно) применяют нормальный конус, а с зернами наибольшей крупностью более 40 мм — увеличенный. При подготовке конуса и приспособлений к испытаниям все соприкасающиеся с бетоном поверхности очищают и увлажняют.

Конус устанавливают на гладкий горизонтальный металлический лист и заполняют его бетонной смесью марок П1, П2 или П3 через воронку в три слоя одинаковой высоты. Каждый слой на его высоту уплотняют штыкованием металлическим стержнем, в нормальном конусе — 25 раз, в увеличенном — 56 раз. Бетонной смесью марок П4 и П5 конус заполняют в один прием и штыкуют 10 раз на всю высоту конуса.

Осадку конуса бетонной смеси определяют, укладывая гладкий стержень на верх формы и измеряя расстояние от нижней поверхности стержня до верха бетонной смеси с погрешностью не более 0,5 см (рис. 6).

Из результатов видно, что по мере увеличения процентного содержания цемента, замененного пуццоланом, удобоукладываемость бетона снижается, поскольку замена цемента пуццоланом равной массы увеличивает объем и плотность цемента выше,

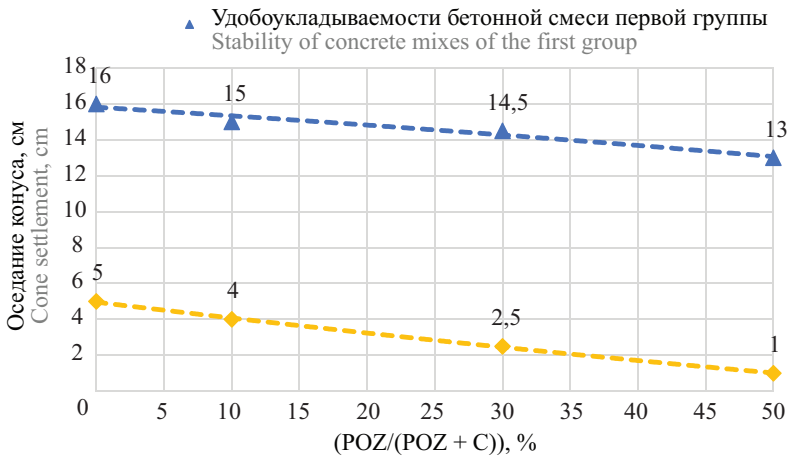
Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 4, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 4, 2025

Табл. 6. Результаты измерения осадки по Абрамсу и объемного веса свежего бетона

Table 6. Results of Abrams slump and volumetric weight measurements of fresh concrete

Смесь The mixture	Посадка «Абрамса», см Abrams landing gear, cm	Кажущийся объемный вес, кг/м^3 Apparent volumetric, kg/m^3
NC	16	2277
$GCP_{10\,\%}$	15	2247
$GCP_{30\,\%}$	14,5	2215
$GCP_{50\,\%}$	13	2207
NCR	5	1675
$GCR_{P10\,\%}$	4	1645
$GCR_{P30\,\%}$	2,5	1625
$GCR_{P50\,\%}$	1	1610

a



b

Рис. 6. Метод осадки конуса бетонной смеси (*a*); изменение текстуры, представленное спадом в зависимости от коэффициента замещения (*b*)

Fig. 6. Cone settlement method of concrete mix (*a*); texture variation represented by the decline as a function of the replacement ratio (*b*)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 4, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 4, 2025

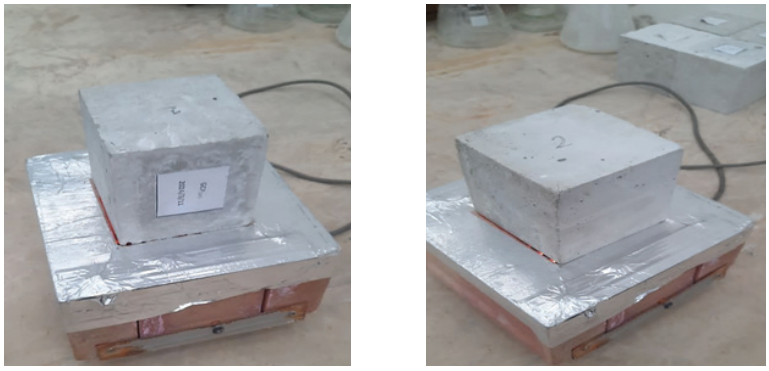


Рис. 7. Механизм измерения теплопроводности бетонных образцов

Fig. 7. Mechanism for measuring the thermal conductivity of concrete specimens

чем у пуццолана. На рис. 6 показано серьезное воздействие на текстуру бетона, когда его натуральная галька заменяется округлой галькой и водоцементное соотношение В/Ц установлено 0,6, так как образцы перемещаются из сегмента мягкой текстуры осадка = 4 см к сегменту жесткой текстуры, спад <4 см при коэффициенте замены 30 %.

Это связано с природой переработанных заполнителей и их относительной водоемкостью по сравнению с природными заполнителями, о чем свидетельствуют значения впитывания этих отдельных заполнителей, потому что их впитывание значительно превышает впитывание природных заполнителей, что создает проблему, связанную с эксплуатацией данного бетона, избежать которой можно путем добавления пластификатора для получения прочного слоя, учитывая, что не следует увеличивать дозу сверх допустимого предела, чтобы не замедлить затвердевание бетона.

Изменение термического сопротивления в зависимости от коэффициента замены

Формы камеры и источника тепла позволяли нагревать образец только с одной стороны, чтобы через некоторое время измерить передачу тепла с этой стороны на другую. На рис. 7 показан механизм измерения теплопроводности образцов бетона.

Грани испытуемых кубических образцов были пронумерованы так, что одна сторона имела номер 1 (подвергалась нагреву), а противоположная сторона — номер 2 (воздействовала на внешнюю среду). Образцы подвергались нагреву в течение одного и того же периода и температуры, измерялись с обеих сторон с помощью лазерного термометра, как показано на рис. 8, 9.

Количество переданной тепловой энергии Q рассчитывалось по следующему уравнению. На рис. 10 показан механизм теплопередачи в твердых телах:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где m — масса, кг; c — удельная теплоемкость, Дж/кг·°С; ΔT — изменение температуры, °С.

Рассчитан коэффициент теплопроводности для бетонных кубов, который определяется как количество теплового тока, проходящего перпендикулярно поверхности материала площадью 1 м^2 и толщиной 1 м за счет разницы температур. Между двумя его поверх-

Рис. 8. Измерение разности температур для первой группы смесей (GCP 30 %)

Fig. 8. Temperature difference measurement for the first group of mixtures (GCP 30 %)

Рис. 9. Измерение разности температур для первой группы смесей (GCP 50 %)

Fig. 9. Temperature difference measurements for the first group of mixtures (GCP 50 %)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 4, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 4, 2025

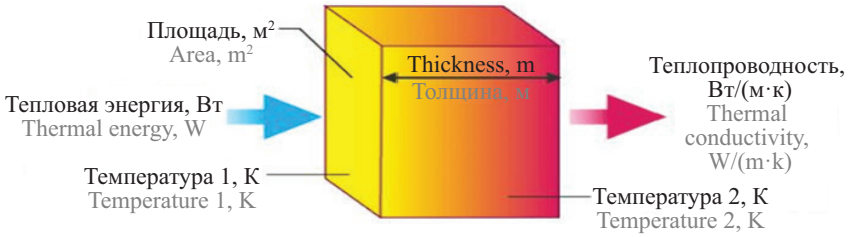


Рис. 10. Механизм теплопередачи в твердых телах

Fig. 10. Mechanism of heat transfer in solids

ностями коэффициент составляет 1 ° и определяется следующим соотношением:

$$\lambda = \frac{QL}{A\Delta T}, \quad (2)$$

где Q — количество тепла, передаваемое через материал, Вт; L — толщина, м; A — площадь, м^2; ΔT — изменение температуры, °C.

Тепловое сопротивление R — это сопротивление, которое элемент конструкции оказывает передаче тепла за счет проводимости через свою толщину. По мере увеличения этого сопротивления способность элемента конструкции сопротивляться теплу увеличивается. Эта величина также называется теплоизоляцией и рассчитывается по соотношению:

$$R = 1/\lambda. \quad (3)$$

В табл. 7 приведены результаты измерений теплопроводности и термостойкости бетонных смесей.

На рис. 11 представлено изменение теплового сопротивления в зависимости от коэффициента замещения.

Из результатов видно, что с увеличением процента замены цемента пуццоланом термическое сопротивление бетона увеличивается, так как замена цемента равным по массе пуццоланом приводит к снижению теплопроводности на 5 %, а переработанные заполнители демонстрируют большую термическую стойкость по сравнению с натуральными заполнителями даже при замене 50 % цемента молотым пуццоланом. Отмечается увеличение прочности более чем на 24 %.

Прочность при сжатии в зависимости от коэффициентов замены

Для определения сопротивления простому сжатию образцов бетона в возрасте 28 сут к их поверхности прикладывали силу. Сопротивление простому сжатию образцов рассчитывали путем расчета сжимающей силы, приводящей к разрушению образца, и расчета поверхности, подвергающейся воздействию этой силы. В табл. 8 представлены результаты.

Зависимость кубического сопротивления литых образцов (10 × 10 × 10 см) при простом давлении от коэффициентов замены, а также от формы представлена на рис. 12.

Бетон приобретает свою прочность в результате пуццолановой реакции между кремнеземом в пуццолане и гидроксидом кальция, высвобождаемым во время гидратации портландцемента, где при низких коэффициентах замещения количество кремнезема невелико и, следовательно, может образоваться только ограниченное количество C-S-H, хотя из-за относительно большого количества портландцемента

Табл. 7. Результаты измерения теплопроводности бетонных смесей

Table 7. Results of measuring thermal conductivity of concrete mixtures

Смесь The mixture	Толщина, м Thickness, m	Космос, м² Space, m²	Изменение температуры, °C Change temperature in, °C	Количество переданной тепловой энергии W Amount of thermal energy transferred W	Теплопроводность λ, Вт/мк Thermal conductivity λ, W/mk	Тепловое сопротивление R, мк/Вт Thermal resistance R, mk/W
NC	0,1	0,01	66	37,373	1,102	0,9071
$GCP_{10\,\%}$			64	36,848	1,093	0,9146
$GCP_{30\,\%}$			64	36,640	1,087	0,9198
$GCP_{50\,\%}$			64	35,520	1,054	0,9488
NCR			91	39,24	1,078	0,9275
$GCR_{P10\,\%}$			86	36,69	1,022	0,9784
$GCR_{P30\,\%}$			79	33,26	0,945	1,0583
$GCR_{P50\,\%}$			69	28,88	0,844	1,1842

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 4, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 4, 2025

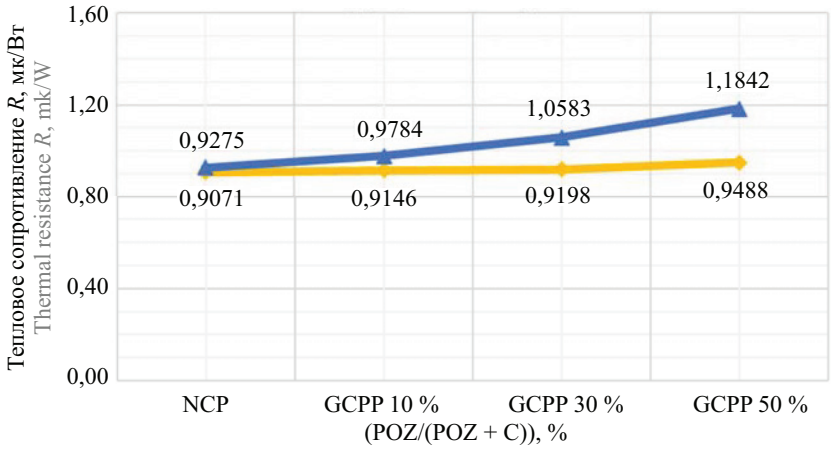


Рис. 11. Изменение теплового сопротивления в зависимости от коэффициента замещения

Fig. 11. Variation of thermal resistance depending on the substitution factor

Табл. 8. Результаты измерения сопротивления бетонных смесей простому сжатию

Table 8. Results of measuring the resistance of concrete mixtures to simple compression

Смесь The mixture	$\left(\frac{POZ}{POZ+C}\right)$, %	Прочность при сжатии, кг/см^2 Resistance to slight pressure, kg/cm^2
NC	0	330
$GCP_{10\,\%}$	10	244
$GCP_{30\,\%}$	30	180
$GCP_{50\,\%}$	50	162
NCR	0	194
$GCR_{P10\,\%}$	10	186
$GCR_{P30\,\%}$	30	155
$GCR_{P50\,\%}$	50	154

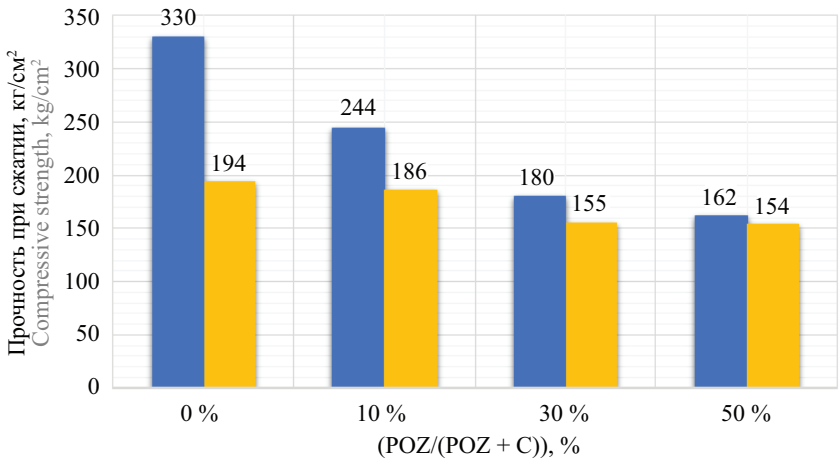


Рис. 12. Зависимость между простым сопротивлением бетона давлению и коэффициентами замещения

Fig. 12. Relationship between simple concrete pressure resistance and replacement factors

выделилось большое количество гидроксида кальция. Однако при высокой скорости замещения количество пуццолана в смеси увеличивается, т.е. снижается образование C-S-H за счет выделения небольшого количества гидроксида кальция в результате гидратации сравнительно небольшого количества портландцемента, имеющегося в смеси, и таким образом простая прочность на сжатие уменьшается по мере увеличения коэффициента замещения в смесях.

Следует отметить, что полная замена натуральных заполнителей переработанными заполнителями позволила сохранить бетон очень близким к бетону эталонных смесей при тех же соотношениях замены, так как при 50%-ном коэффициенте замены цемента молотым пуццоланом прочность снизилась на 5 %. Этот результат считается имеющим высокую степень важности, принимая во внимание, что другие характеристики существенно не изменяются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В свете полученных результатов о влиянии замены портландцемента молотым пуццоланом и натуральных заполнителей на переработанные заполнители на физические (теплопроводность) и механические (стойкость к простому сжатию) свойства бетона, производимого с целью воздействия на окружающую среду, можно отметить следующие моменты в качестве выводов этого исследования:

• по мере увеличения процента цемента, замененного пуццоланом, работоспособность бетона снижается, поскольку замена цемента пуццоланом равной массы увеличивает объем, поэтому плотность цемента выше плотности пуццолана;

• увеличение процента замены портландцемента натуральным пуццоланом повышает термическую стойкость получаемого бетона;

• переработанные заполнители демонстрируют более высокую термостойкость по сравнению с натуральными заполнителями. Даже когда 50 % цемента заменено натуральным пуццоланом, отмечается увеличение сопротивления более чем на 24 %;

• новые научные результаты показывают, что бетон, изготовленный из переработанного гравия с заменой 50 % цемента природным пуццоланом, предоставляет устойчивую и энергоэффективную альтернативу для строительного применения, особенно с точки зрения теплопроводности;

• устойчивость к простому давлению снижается с увеличением доли замены цемента молотым пуццоланом в смесях;

• вторичный гравий дает приемлемые значения устойчивости к простому давлению при использовании в разных пропорциях в бетоне, что открывает широкий простор для размышлений о его использовании в бетоне гражданских сооружений;

• значения сопротивления простому сжатию кубических образцов превышают минимальные пределы сирийской спецификации для цементных блоков. Это позволит производить цементные блоки с использованием переработанных заполнителей с возможностью замены цемента молотым пуццоланом в соответствии с различными коэффициентами замены;

• добавление природного пуццолана дало возможность снизить теплопроводность бетона, что привело к улучшению его изоляционных свойств. Это обусловлено уникальным химическим составом природного пуццолана, который улучшает термическое сопротивление бетонной матрицы. Кроме того, использование переработанного гравия в составе бетонной смеси позволяет улучшить общую прочность и долговечность материала, дополнительно улучшая его тепловые характеристики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Попов К.Н.* Полимерные и полимерцементные бетоны, растворы и мастики : учебное пособие. М. : Высшая школа, 1987. 72 с

2. *Osei D.Y., Jackson E.N.* Compressive strength and workability of concrete using natural pozzolana as partial replacement of ordinary Portland cement // Advances in Applied Science Research. 2012. Vol. 3. Issue 6. Pp. 3658–3662.

3. *Wang Y.* Research on the Sustainability in Green Building // Advances in Economics, Business and Management Research. 2022. DOI: 10.2991/aebmr.k.220405.231

4. *Aabid A., Baig M.* Sustainable Materials for Engineering Applications // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 18. P. 6085. DOI: 10.3390/ma16186085

5. *Wang H., Cao C.* On how to move from green building to green ecological city // Building Materials and Decoration. 2018. Vol. 35. Pp. 83–84.

6. *Омран Д., Вассуф М.* Использование информационного моделирования строительных объектов (BIM) с целью изучения ориентации здания при проектировании для достижения их большей устойчивости // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 3. С. 436–455. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.436-455

7. *Zhang D., Wu W., Fang P.* Research on the Development of Green Buildings in China // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 555. Issue 1. P. 012095. DOI: 10.1088/1755-1315/555/1/012095

8. *Yuan Q., Liu Z., Zheng K., Ma C.* Chapter 3 — Portland cement concrete // Civil Engineering Materials. 2021.

9. *Al-Swaidani A.M.* Natural pozzolana of micro and nano-size as cementitious additive: resistance of concrete/mortar to chloride and acid attack // Cogent En-

gineering. 2021. Vol. 8. Issue 1. DOI: 10.1080/23311916.2021.1996306

10. *Al-Swaidani A.M.* Use of micro and nano volcanic scoria in the concrete binder: Study of compressive strength, porosity and sulfate resistance // Case Studies in Construction Materials. 2019. Vol. 11. P. e00294. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00294

11. *Ekolu S.O., Hooton R.D., Thomas M.D.A.* Studies on Ugandan Volcanic ash and Tuff // Proceedings from the International Conference on Advances in Engineering and Technology. 2006. Pp. 75–83. DOI: 10.1016/B978-008045312-5/50009-1

12. *Ali K., Aljubayli N.* Study the Influence of Replacement the Aggregates of Mortar with Natural Pozzolana on its Fresh and Hardened Properties // Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies — Engineering Sciences Series. 2014.

13. *Alsheyab M.A.T.* Recycling of construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development // International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. Vol. 19. Issue 3. Pp. 2129–2138. DOI: 10.1007/s13762-021-03217-1

14. *Menegaki M., Damigos D.* A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2018. Vol. 13. Pp. 8–15. DOI: 10.1016/j.cogsc.2018.02.010

15. *Dahlbo H., Bachér J., Lähtinen K., Jouttijärvi T., Suoheimo P., Mattila T. et al.* Construction and demolition waste management — a holistic evaluation of environmental performance // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 10. Pp. 333–341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.073

16. *Zhang L.* Production of bricks from waste materials : a review // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. Pp. 643–655. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043

17. *Colorado H.A., Muñoz A., Monteiro S.N.* Circular economy of construction and demolition waste: A case study of Colombia // Sustainability. 2022. Vol. 14. Issue 12. P. 7225. DOI: 10.3390/su14127225

18. *Украинский И.С., Майорова Л.П., Саликов Д.А., Шевчук А.С., Чайников Г.А.* Повторное использование бетонного и кирпичного лома в качестве заполнителей в бетон // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 2. С. 291–301. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-291-301. EDN NENFHQ.

19. *Муртазаев С.А.Ю., Хадисов В.Х., Хаджиев М.Р.* Использование керамического кирпичного боя для получения легких керамобетонов // Экология и промышленность России. 2014. № 10. С. 22–25. EDN SQVWOD.

20. *Ахмед А.А., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Тимохин Р.А., Мурали Г.* Использование бетонного лома Ирака в качестве наполнителя и заполнителя тяжелого и легкого бетона // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 3. С. 28–39. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-3-28-39. EDN NKXOKJ.

Поступила в редакцию 14 августа 2024 г.
Принята в доработанном виде 28 ноября 2024 г.
Одобрена для публикации 13 февраля 2025 г.

Об авторах: **Мустафа Али Вассуф** — инженер-строитель кафедры управления строительством, инженер, магистрант факультета гражданского строительства; **Университет Тишрин**; г. Латакия, Сирия; ResearcherID: HSF-7867-2023, ORCID: 0000-0002-3001-5030; president@tishreen.edu.sy, moustafa.wassouf@tishreen.edu.sy;

Джамал Юнис Омран — PhD в области инженерии управления строительными проектами, доцент, декан факультета гражданского строительства, факультет гражданского строительства; **Университет Тишрин**; г. Латакия, Сирия; Scopus: 57194594127, ResearcherID: ABF-2210-2021, ORCID: 0000-0002-8429-6210; president@tishreen.edu.sy, j-omran@tishreen.edu.Sy;

Али Хейрбек — доктор технических наук в области технологии бетона, строительных материалов, профессор, профессор факультета гражданского строительства; **Университет Тишрин**; г. Латакия, Сирия; ORCID: 0000-0001-8115-1887; president@tishreen.edu.sy, alikheirbek@tishreen.edu.sy.

Вклад авторов:
Мустафа Али Вассуф — участие в разработке и внедрении учебных программ, проведение лабораторных экспериментов, заливка различных образцов смесей, написание статьи.
Джамал Юнис Омран — научное руководство, концепция исследования и разработка методологии, обзор текста, окончательные выводы.
Али Хейрбек — руководство лабораторными работами, научное руководство, проверка результатов, окончательные выводы.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Popov K.N. *Polymer and polymer cement concretes, solutions and mastics*. Moscow, Higher School, 1987; 72. (rus.).

2. Osei D.Y., Jackson E.N. Compressive strength and workability of concrete using natural pozzolana as partial replacement of ordinary Portland cement. *Advances in Applied Science Research.* 2012; 3(6):3658-3662.

3. Wang Y. Research on the Sustainability in Green Building. *Advances in Economics, Business and Management Research.* 2022. DOI: 10.2991/aebmr.k.220405.231

4. Aabid A., Baig M. Sustainable Materials for Engineering Applications. *Materials.* 2023; 16(18):6085. DOI: 10.3390/ma16186085

5. Wang H., Cao C. On how to move from green building to green ecological city. *Building Materials and Decoration.* 2018; 35:83-84.

6. Omran D., Wassouf M. Using Building Information Modeling (BIM) to Study Building Orientation in Design for Greater Stability. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):436-455. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.436-455 (rus.).

7. Zhang D., Wu W., Fang P. Research on the Development of Green Buildings in China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2020; 555(1):012095. DOI: 10.1088/1755-1315/555/1/012095

8. Yuan Q., Liu Z., Zheng K., Ma C. Chapter 3 — Portland cement concrete. C*ivil Engineering Materials.* 2021.

9. Al-swaidani A.M. Natural pozzolana of micro and nano-size as cementitious additive: resistance of concrete/mortar to chloride and acid attack. *Cogent Engineering.* 2021; 8(1). DOI: 10.1080/23311916.2021.1996306

10. Al-Swaidani A.M. Use of micro and nano volcanic scoria in the concrete binder: Study of compressive strength, porosity and sulfate resistance. *Case Studies in Construction Materials.* 2019; 11:e00294. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00294

11. Ekolu S.O., Hooton R.D., Thomas M.D.A. Studies on Ugandan Volcanic ash and Tuff. *Proceedings from the International Conference on Advances in Engineering and Technology.* 2006; 75-83. DOI: 10.1016/B978-008045312-5/50009-1

12. Ali K., Aljubayli N. Study the Influence of Replacement the Aggregates of Mortar with Natural Pozzolana on its Fresh and Hardened Properties. *Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies — Engineering Sciences Series.* 2014.

13. Alsheyab M.A.T. Recycling of construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development. *International Journal of Environmental Science and Technology.* 2022; 19(3):2129-2138. DOI: 10.1007/s13762-021-03217-1

14. Menegaki M., Damigos D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry.* 2018; 13:8-15 DOI: 10.1016/j.cogsc.2018.02.010

15. Dahlbo H., Bachér J., Lähtinen K., Jouttijärvi T., Suoheimo P., Mattila T. et al. Construction and demolition waste management — a holistic evaluation of environmental performance. *Journal of Cleaner Production.* 2015; 10:333-341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.073

16. Zhang L. Production of bricks from waste materials : a review. *Construction and Building Materials.* 2013; 47:643-655. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043

17. Colorado H.A., Muñoz A., Monteiro S.N. Circular economy of construction and demolition waste: A case study of Colombia. *Sustainability.* 2022; 14(12):7225. DOI: 10.3390/su14127225

18. Ukrainskiy I.S., Mayorova L.P., Salikov D.A., Shevchuk A.S., Chainikov G.A. Reuse of concrete and brick scrap as aggregates. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety.* 2023; 31(2):291-301. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-291-301. EDN NENFHQ. (rus.).

19. Murtazaev S.A.Yu., Khadisov V.Kh., Khadzhiev M.R. Use of ceramic brick scrap for producing lightweight ceramic concretes. *Ecology and Industry of Russia.* 2014; 10:22-25. EDN SQVWOD. (rus.).

20. Ahmed A.A., Fedyuk R.S., Liseytsev Yu.L., Timokhin R.A., Murali G. Use of Iraq concrete scrap as filler and aggregate of heavyweight and lightweight concrete. *Construction Materials and Products.* 2020; 3(3):28-39. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-3-28-39. EDN NKXOKJ. (rus.).

Received August 14, 2024.
Adopted in revised form on November 28, 2024.
Approved for publication on February 13, 2025.

Bionotes: **Moustafa Ali Wassouf** — civil engineer of the Department of Construction Management, engineer, master's student of the Faculty of Civil Engineering; **Tishreen University**; Latakia, Syria; ResearcherID: HSF-7867-2023, ORCID: 0000-0002-3001-5030; president@tishreen.edu.sy, moustafa.wassouf@tishreen.edu.sy;

Jamal Younis Omran — PhD in Construction Project Management Engineering, Professor, Dean of Faculty of Civil Engineering; **Tishreen University**; Latakia, Syria; Scopus: 57194594127, ResearcherID: ABF-2210-2021, ORCID: 0000-0002-8429-6210; president@tishreen.edu.sy, j-omran@tishreen.edu.sy;

Ali Kheirbek — PhD in Concrete Technology, Building Materials, Professor, Professor at the Faculty of Civil Engineering; **Tishreen University**; Latakia, Syria; ORCID: 0000-0001-8115-1887; president@tishreen.edu.sy, alikheirbek@tishreen.edu.sy.

Contribution of the authors:
Moustafa Ali Wassouf — participation in developing and implementing curricula, conducting laboratory experiments, pouring different samples of mixtures, writing scientific article.
Jamal Eunice Omran — scientific guidance, concept of research and development of methodology, text review, final conclusions.
Ali Kheirbek — supervision of laboratory work, scientific guidance, verification of results, final conclusions.
The authors declare that there is no conflict of interests.