

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.54

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.763-771

Оптимизация составов коррозионно-стойких бетонов по виду и расходу добавок-модификаторов для условий Республики Бурунди

Килперик Ками, **Сергей Михайлович Усачев**, Наталья Анатольевна Белькова
Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведены результаты исследования влияния вида и расхода добавок-пластификаторов на свойства мелкозернистого бетона, эксплуатируемого в условиях Республики Бурунди. Объект исследования — мелкозернистый бетон, предмет исследования — показатели качества бетонной смеси и затвердевшего бетона. Особенностью данных исследований является то, что были использованы сырьевые материалы Республики Бурунди.

Материалы и методы. В качестве сырьевых материалов использованы: цемент ЦЕМ II/ В-П 32,5 М компании BUCESCO (Республика Бурунди), песок из р. Музази Республики Бурунди и добавки-пластификаторы разных производителей и различного вещественного состава.

Результаты. Установлено, что введение добавок пластифицирующего действия ГПМ-У и GLENIUM 323 MIX оказывает значительный водоредуцирующий эффект на цементную систему. При этом наблюдается и повышение качества затвердевшего цементного камня. Выявленные для цементного камня закономерности просматриваются и для мелкозернистого бетона: введение добавок-пластификаторов любого типа позволяет уплотнить структуру, снизить пористость и повысить прочность материала. При этом повышение плотности мелкозернистого бетона дает возможность обеспечить его меньшую проницаемость и соответственно устойчивость к воздействию агрессивных сред. Это особенно важно для условий эксплуатации конструкций, характерных для Республики Бурунди.

Выводы. В результате исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации: оптимальные дозировки добавок (независимо от их типа) находятся в пределах 0,9–1,2% от массы цемента (исходя из величины водоредуцирующего эффекта). Добавки на основе поликарбоксилатных эфиров дают наибольший эффект как на чистом цементном камне, так и на мелкозернистом бетоне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Бурунди, бетон, цемент, добавки-пластификаторы, водоредуцирующий эффект, прочность при сжатии, коррозионная стойкость

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам и анонимным рецензентам за время, затраченное на рассмотрение статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ками К., Усачев С.М., Белькова Н.А. Оптимизация составов коррозионно-стойких бетонов по виду и расходу добавок-модификаторов для условий Республики Бурунди // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 763–771. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.763-771

Автор, ответственный за переписку: Наталья Анатольевна Белькова, verlnata@mail.ru.

Optimization of corrosion-resistant compositions concrete by type and consumption of additive modifiers for the conditions of the Republic of Burundi

Chilperic Kami, **Sergey M. Usachev**, Natalia A. Belkova
Voronezh State Technical University (VSTU); Voronezh, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The results of a study on the influence of the type and dosage of plasticizing admixtures on the properties of fine-grained concrete operated under the conditions of the Republic of Burundi are presented. The object of the study is fine-grained concrete, while the subject of the study is the quality indicators of the concrete mix and hardened concrete. A distinctive feature of these studies is the use of raw materials sourced from the Republic of Burundi.

Materials and methods. The following raw materials were used: CEM II/V-P 32.5 M cement produced by BUCESCO (Republic of Burundi), sand from the Muzazi River in the Republic of Burundi, and plasticizing admixtures from different manufacturers with various chemical compositions.

Results. It was established that the incorporation of the plasticizing admixtures GPM-U and GLENIUM 323 MIX provides a significant water-reducing effect on the cement system. At the same time, an improvement in the quality of the hardened cement paste was observed. The patterns identified for the cement paste were also observed for fine-grained concrete: the incorporation of plasticizing admixtures of any type makes it possible to densify the structure, reduce porosity, and in-

crease the strength of the material. In turn, the increased density of fine-grained concrete ensures lower permeability and, consequently, greater resistance to aggressive environmental exposure. This is particularly important for the operating conditions characteristic of the Republic of Burundi.

Conclusions. As a result of the studies, the following conclusions and recommendations can be made: the optimal dosages of additives (regardless of their type) are within 0.9–1.2 % of the mass of cement (based on the value of the water-reducing effect). At the same time, additives based on polycarboxylate ethers give the greatest effect both on pure cement stone and on fine-grained concrete.

KEYWORDS: Burundi, concrete, cement, plasticizing additives, water-reducing effect, compressive strength, corrosion resistance

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the editorial board and anonymous reviewers for their time spent reviewing the article.

FOR CITATION: Kami K., Usachev S.M., Belkova N.A. Optimization of corrosion-resistant compositions concrete by type and consumption of additive modifiers for the conditions of the Republic of Burundi. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):763-771. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.763-771 (rus.).

Corresponding author: Natalya A. Belkova, verlnata@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Бетон является материалом, обладающим значительным спектром свойств, и функционирует в широком диапазоне агрессивных сред в течение длительного периода эксплуатации. Коррозионная стойкость служит одной из важнейших характеристик для качественного бетона. Затвердевшая цементная матрица бетона в очень ограниченной степени растворима в воде, это означает, что некоторые компоненты со временем будут постепенно вымываться с поверхности бетона [1, 2]. Коррозия цементных бетонов и конструкций из них наносит существенный вред экономике любой страны.

Если рассматривать особенности эксплуатации бетонов в условиях Республики Бурунди, то конструкции здесь эксплуатируются в довольно сложных климатических условиях: происходит постоянное изменение уровня воды из-за круглогодичной смены дождливого и сухого сезонов. Также имеются и температурные колебания (от 16 до 27 °С) при относительной влажности воздуха, близкой к 100 %¹ [3]. При этом вода как эксплуатационная среда содержит умеренное количество растворенных солей, водородный показатель рН составляет 8,5–9, щелочность среды — 2,5–2,8, содержание электролитов — 156–158 мг/л. Воды рек Республики Бурунди по отношению к бетону классифицируются как нейтральные и слабощелочные.

Таким образом, для рассматриваемых условий эксплуатации возможно проявление следующих видов коррозии цементного камня: коррозия выщелачивания; углекислотная коррозия с образованием легкорастворимых соединений; сульфатная или сульфатоалюминатная коррозия с накоплением и кристаллизацией с увеличением объема малорастворимых продуктов [4].

Согласно исследованиям [5–11], повышение долговечности цементных бетонов может быть достигнуто двумя методами: правильным выбором типа цемента и заполнителей и применением хими-

чески активных модификаторов (химических и минеральных), которые взаимодействуют с цементной матрицей, уплотняют ее и уменьшают проводимость материала для агрессивных компонентов внешней среды. К таким модификаторам относятся, в частности, добавки супер- и гиперпластификаторы, которые позволяют снижать водоцементное отношение (В/Ц), повышать плотность и прочность бетона и, как следствие, его коррозионную стойкость [12, 13]. Эффективность добавок зависит от их вещественного состава [14] и дозировки, а также минералогического состава цемента [15–17]. В большинстве трудов [6, 7, 12, 13] в качестве объекта выступали системы (камень, бетон) на основе цементов классов ЦЕМ I (т.е. без активных минеральных добавок в составе клинкера). Установлено [15, 16], что даже относительно незначительные колебания в минералогическом составе цементного клинкера вызывают изменения как величины оптимальных дозировок добавок, так и свойств затвердевшего материала. Введение минерального компонента в цементный клинкер приводит к изменениям как характеристик бетона [7, 11], так и свежеприготовленной смеси при остальных одинаковых условиях. Поэтому проблема оптимизации составов цементного бетона (для конкретных сырьевых материалов) по типу и расходу добавок актуальна.

В соответствии с предыдущими работами авторов [18–20] разработаны составы бетонов и выполнены комплексные исследования структуры и свойств бетонов в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации в Бурунди. Необходимо отметить, что в качестве вяжущего материала в данных составах применялся цемент с пуццолановой добавкой, который обладает повышенными значениями водопотребности и показателями усадки и набухания. Все это отрицательно сказывается на показателях коррозионной стойкости в частности и долговечности в целом.

Цель исследования — оптимизация составов мелкозернистого бетона на цементах, содержащих минеральный активный компонент, по виду и количеству добавок-пластификаторов.

¹ Бурунди // Труды Института Африки. 2019. Т. 23.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве сырьевых материалов использованы: цемент ЦЕМ II/В-П 32,5 М компании «BUCESO» (Республика Бурунди), песок из р. Музази Республики Бурунди.

Указанный цемент характеризуется повышенным содержанием алюмината кальция C_3A (до 9,0%), карбоната кальция $CaCO_3$ (до 9,1%) и гидросульфата кальция $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ (до 8,2%). При этом сумма силикатов кальция составляет порядка 67–68%. Нормальная густота цементного теста — 31,5% [18].

Песок имеет сложный химический состав: содержание кварца не превышает 94,0%, остальное — примеси в виде полевого шпата (до 5,2%) и других минералов. Песок представлен фракцией от 0,16 до 5,0 мм, модуль крупности — 2,98. Для данного заполнителя характерно повышенное содержание пылевидных и глинистых частиц — до 8,2%.

В качестве добавок использованы: ПФМ-НЛК (группа нафталинсульфонатов), производитель ООО «Полипласт»; Зикамент ФФ (группа меламинасульфонатов), производитель Группа компаний Sika; GLENIUM 323 MIX, производитель ООО «БАСФ Строительные системы»; ГПМ-У (группа поликарбоксилатных эфиров) производитель ЗАО «НП ЦМИД».

Исследования выполнялись в три этапа. На первом этапе в качестве модельной системы выступало цементное тесто нормальной густоты. В качестве критерия оптимизации применили показатель водоредуцирующего эффекта в зависимости от расхода добавок-пластификаторов в соответствии с ГОСТ 30459–2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности». Дозировка добавок принята согласно рекомендациям производителей в пределах 0,6–1,2% от массы цемента. В/Ц отношение эталонной смеси (цементного теста без добавок) составило 0,32.

На втором этапе проводились исследования свойств и структуры цементного камня, модифицированного добавками-пластификаторами при их оптимальной дозировке. Подвижность смеси соответствовала нормальной густоте цементного теста (при различных значениях В/Ц отношения). Микроструктура цементного камня оценивалась с помощью метода сканирующей электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп Phenom XL).

На третьем этапе проводилась оптимизация состава мелкозернистого бетона по виду добавки-пластификатора. Исследования осуществлялись на мелкозернистом бетоне состава Ц:П = 1:3, подвижностью по осадке конуса ОК = 2–4 см. Образцы твердели в нормальных условиях в течение 28 сут.

Средняя плотность определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.1–2020 «Бетоны. Методы определения плотности»; пористость — по ГОСТ 12730.4–2020. «Бетоны. Методы определения параметров пористости»; предел прочности при сжатии — по ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы

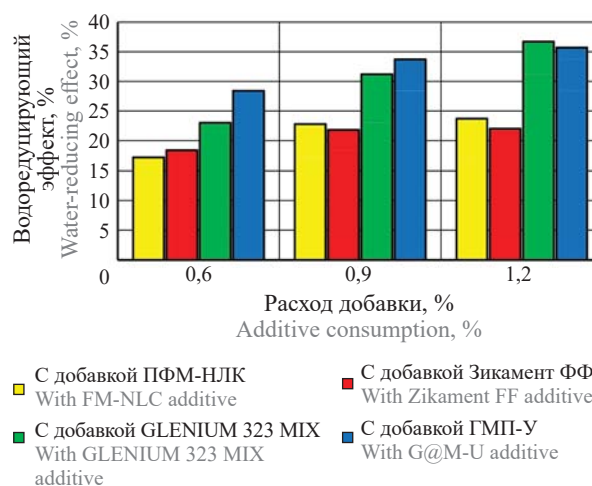


Рис. 1. Зависимость величины водоредуцирующего эффекта от вида и расхода добавки-пластификатора

Fig. 1. The dependence of the water-reducing effect on the type and dosage of the plasticizer additive

определения прочности по контрольным образцам». Прочностные характеристики систем устанавливались на электромеханической испытательной системе INSTRON 5982 с автоматической обработкой данных в Bluehill Elements.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены результаты определения величины водоредуцирующего эффекта выбранных добавок в зависимости от их дозировки. Выявлено, что наибольшим водоредуцирующим эффектом обладают добавки ГПМ-У и GLENIUM 323 MIX на основе поликарбоксилатных эфиров. Это объясняется механизмом действия добавок на основе поликарбоксилатных эфиров, которому присущ стерический эффект. Для добавки ГПМ-У оптимальной является дозировка 0,9% от массы цемента. Повышение дозировки с 0,6 до 0,9% приводит к повышению величины водоредуцирующего эффекта на 15–18% (с 28,4 до 33,7%). Дальнейшее повышение расхода до 1,2% практически не влияет на величину водоредуцирующего эффекта (он увеличивается с 33,7 до 35,6%, т.е. всего на 5%). Это можно объяснить повышением концентрации молекул добавки в растворе и достижением точки критической концентрации мицеллообразования.

Для добавки GLENIUM 323 MIX наблюдается несколько иная картина: при повышении ее расхода с 0,6 до 0,9% величина водоредуцирующего эффекта изменяется с 23 до 31,2% (т.е. примерно на 30–35%), при дальнейшем увеличении расхода добавки эта разница составляет более 15% (величина водоредуцирующего эффекта повышается с 31,2 до 36,7%). То есть применение добавки ГПМ-У более экономически выгодно.

Что касается остальных добавок, для них так же характерен оптимум при дозировке добавки

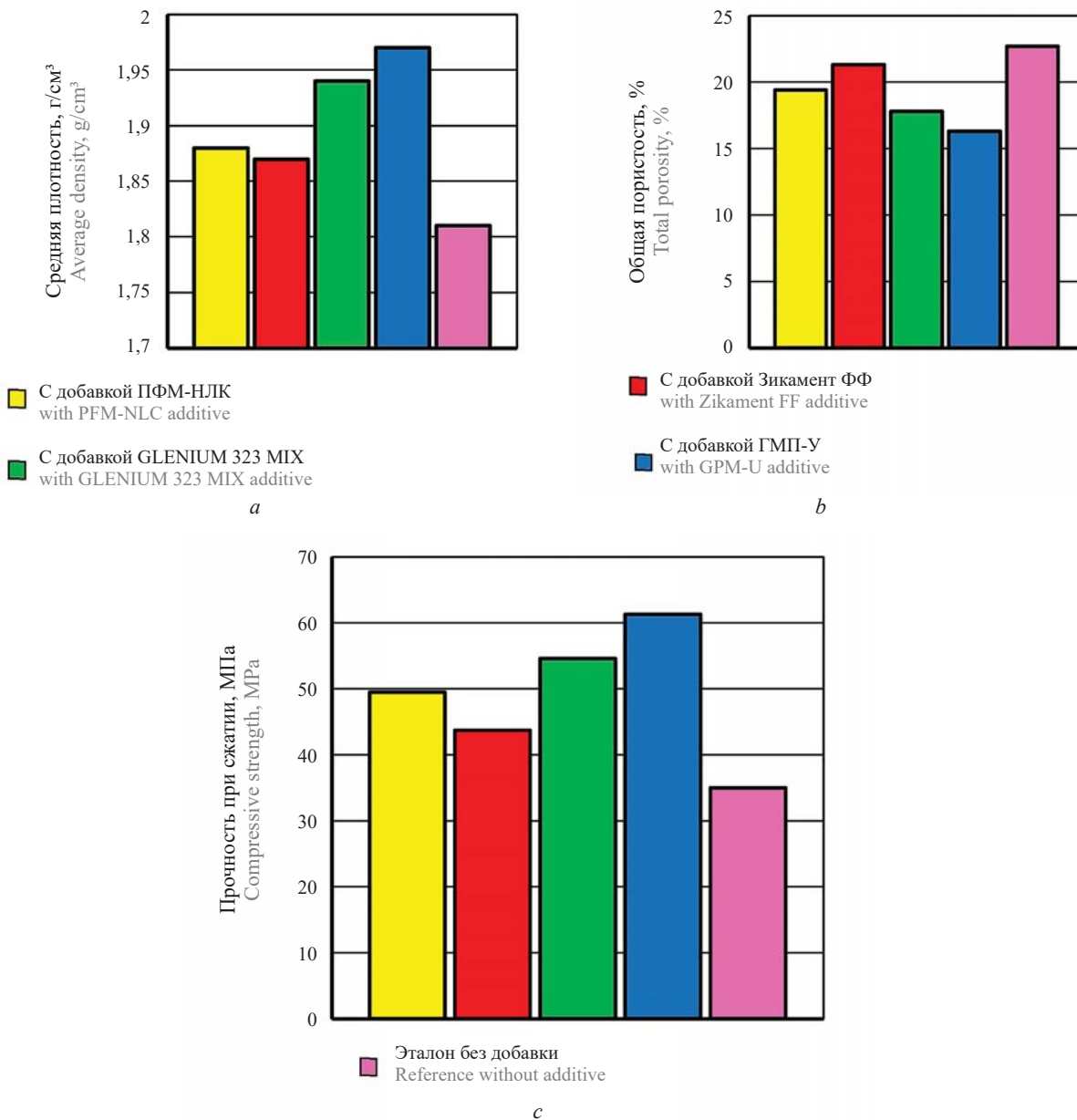


Рис. 2. Зависимость свойств и структуры цементного камня от вида добавки-пластификатора: *a* — средней плотности; *b* — общей пористости; *c* — прочности при сжатии

Fig. 2. The dependence of the properties and structure of cement stone on the type of plasticizer additive: *a* — average density; *b* — total porosity; *c* — compressive strength

0,9 % при относительно низком водоредуцирующем эффекте (от 16 до 22 %). Это можно объяснить иным механизмом действия (относительно добавок на поликарбоксилатных эфирах).

В целом проведенные исследования позволили установить, что для цементов с минеральными активными добавками характерны те же эффекты, как и в цементах без добавок. Но эффективность действия добавок-пластификаторов в данном случае несколько ниже. Так, согласно исследованию [17], величина водоредуцирующего эффекта для цемента класса ЦЕМ I различных производителей с добавками-пластификаторами на основе нафталинсульфонатов при оптимальных их дозировках колеблется в пределах 27–40 %,

а для изучаемого цемента класса ЦЕМ II/ В-II она находится в пределах 17–24 %. Это можно объяснить действием пуццоланового компонента цемента, который повышает его водопотребность.

Установлено, что оптимальной дозировкой добавок является значение 0,9 % от массы цемента, именно этот расход был принят для дальнейших исследований показателей свойств цементного камня и бетона.

На рис. 2 представлены результаты исследования свойств цементного камня как основного матричного материала при дозировке добавок 0,9 % от массы цемента.

По полученным данным видно, что введение добавок-пластификаторов повышает плотность

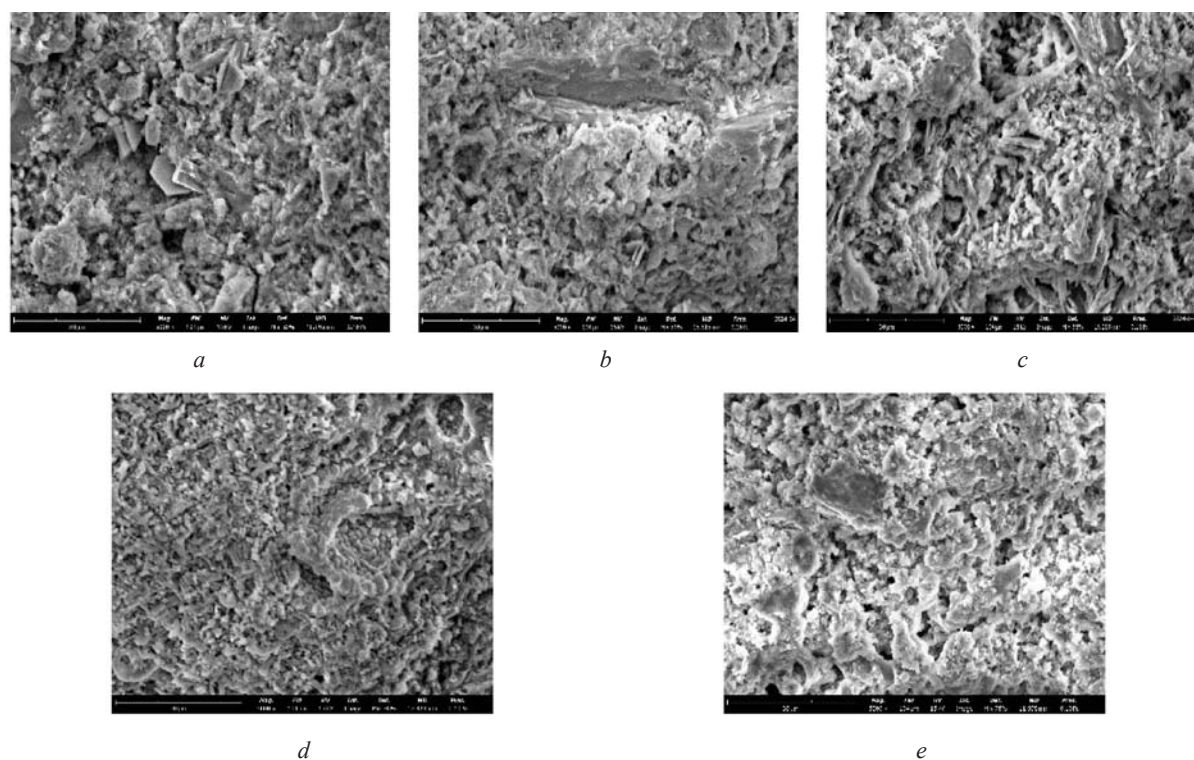


Рис. 3. Микроструктурные особенности цементного камня: *a* — эталон (без добавок); *b* — с добавкой Зикамент ФФ; *c* — с добавкой ПФМ-НЛК; *d* — с добавкой ГМП-У; *e* — с добавкой GLENIUM 323 MIX

Fig. 3. Microstructural features of cement stone: *a* — standard (without additives); *b* — with addition of Zikament FF; *c* — with PFM-NLC additive; *d* — with GMP-U additive; *e* — with GLENIUM 323 MIX additive

(с 1,81 до 1,97 г/см³) и соответственно снижает общую пористость цементного камня (с 22 до 16,3 %). При этом максимальные значения плотности получены для системы с добавками на основе поликарбоксилатов (ГМП-У и GLENIUM 323 MIX), что находится в корреляции с величиной водоредуцирующего эффекта. Все это дает предпосылки к прогнозированию повышения прочности и коррозионной стойкости цементного камня. Так, повышение прочности цементного камня для этих систем составляет 50–75 % (с 35,2 МПа для эталона до 54–61 МПа для систем с добавками).

Если сравнивать сведения, полученные для этих двух добавок, то наблюдается большая эффективность добавки ГМП-У: прочность цементного камня составила 61 МПа по сравнению с 54 МПа для цементного камня с добавкой GLENIUM 323 MIX. Это можно трактовать так, что добавка ГМП-У — комплексная и, помимо пластифицирующего компонента, содержит компонент, регулирующий процессы твердения бетонных смесей. Все это нашло свое отражение в более эффективном ее действии даже на цементе, содержащем пуццолоновый компонент.

Для систем с двумя другими добавками так же отмечается улучшение качества цементного камня: плотность повышается с 1,81 до 1,87 г/см³ при минимальном снижении пористости до 19–21 %. Прочность цементного камня с добавкой ПФМ-НЛК составила 49,5 МПа, что выше эталона примерно на 40 %, для системы с добавкой Зикамент ФФ — около 22 %.

Это так же можно интерпретировать особенностями состава добавки ПФМ-НЛК, которая содержит пластифицирующий, воздухововлекающий и гидрофобизирующий компоненты, которые уплотняют структуру.

В целом можно сказать, что введение добавок-пластификаторов значительно улучшает качественные характеристики цементного камня и компенсирует действие пуццолоновой составляющей в цементном клинкере, что отражено в изменениях микроструктуры цементного камня (рис. 3).

Микроструктура немодифицированного добавками цементного камня представлена в виде неоднородной аморфно-кристаллической массы с кристаллитами различного размера и типа (в том числе и кристаллов портландита Ca(OH)₂) и видимой пористостью. При введении в цементную систему добавок ПФМ-НЛК и Зикамент ФФ микроструктура уплотняется, в ней практически отсутствуют крупные кристаллы портландита (рис. 3, *b*, *c*), структура представлена мелкокристаллической фазой гидросиликатов кальция и отдельными игольчатыми кристаллами этtringита.

Цементный камень, модифицированный добавками на основе поликарбоксилатных эфиров (рис. 3, *d*, *e*), характеризуется большим числом устойчивых гидратных высокоосновных гидросиликатов кальция различного состава в виде гелеобразной массы, состоящей из мелких кристаллов, которые форми-

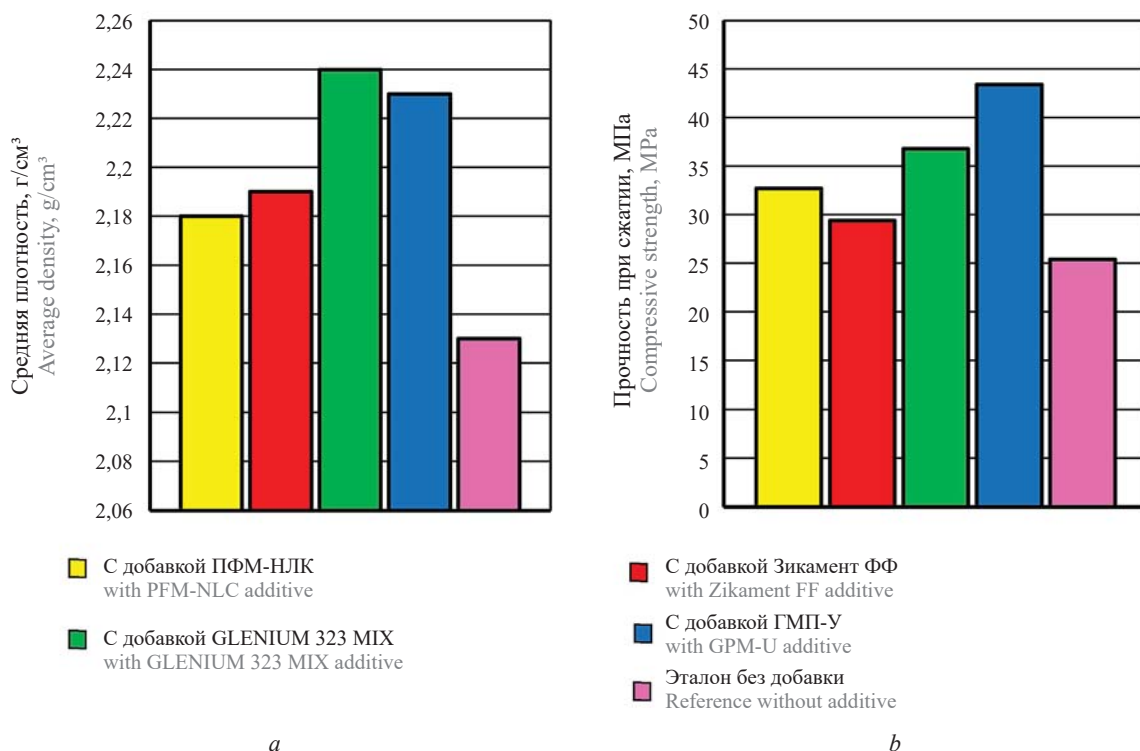


Рис. 4. Зависимость свойств мелкозернистого бетона от вида добавки-пластификатора: *a* — средней плотности; *b* — прочности при сжатии

Fig. 4. The dependence of the properties of fine-grained concrete on the type of plasticiser additive: *a* — average density; *b* — compressive strength

руют плотную стабильную структуру, что и нашло отражение в высоких прочностных свойствах.

Далее проводились исследования влияния вида добавок на свойства мелкозернистого бетона при оптимальной дозировке для равноподвижных смесей.

Для мелкозернистого бетона так же прослеживаются полученные для цементного камня зависимости (рис. 4): наибольшие значения плотности и прочности получены для бетона с добавкой ГПМ-У (прочность при сжатии бетона с добавкой составила 43,4 МПа по сравнению с 25,4 МПа для эталона, т.е. практически в два раза) при относительно значительном повышении плотности бетона (с 2,13 до 2,23 г/см³).

Для бетона с добавкой GLENIUM 323 MIX характерны меньшие (по сравнению с бетоном с добавкой ГПМ-У) прочности: 36,8 МПа (что примерно на 40 % выше, чем у эталона). То есть опять прослеживается более эффективное действие комплексной добавки ГПМ-У.

При этом, согласно исследованию [17], для цементных систем с добавками такого типа (на основе поликарбоксилатных эфиров) характерны и пониженные значения влажностной усадки, что положительно скажется на стойкости материала в засушливые периоды эксплуатации.

Для добавок на основе меламинасульфонатов и нафталинсульфонатов так же наблюдается некоторое улучшение качества материала (рис. 4). Однако

в данном случае повышение прочности составляет 15–30 % (с 25,4 до 29,4–32,8 МПа) при относительно небольшом увеличении значения плотности (на 50–70 кг/м³). Повышение плотности мелкозернистого бетона позволяет обеспечить его меньшую проницаемость и, соответственно, устойчивость к воздействию агрессивных сред. Это особенно важно для условий эксплуатации конструкций, характерных для Республики Бурунди.

В целом можно сказать, что выбранный технологический прием улучшения качества цементных бетонов путем модифицирования их добавками пластифицирующего действия оказался эффективным применительно к использованным в исследовании сырьевым материалам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Введение добавок-пластификаторов улучшает качественные характеристики как цементного камня, так и мелкозернистого бетона, что является предпосылкой получения бетонов с заданными показателями коррозионной стойкости на цементе, производимом компанией BUCESCO (Республика Бурунди), и местном мелком заполнителе.

В зависимости от параметров эксплуатационной среды и свойств конструкции можно рекомендовать следующее применение добавок-пластификаторов:

1. Добавки на основе поликарбоксилатных эфиров — для бетонов и конструкций с повышенными качественными характеристиками (прочностью, трещиностойкостью, надежностью и т.п.), эксплуатируемых в достаточно длительных условиях повышенной или пониженной влажности или в условиях попеременного насыщения водой и высушивания (градиент влажности от 0 до 100 %).

2. Добавки на основе меламинасульфонатов и нафталинсульфонатов — для рядовых бетонов и конструкций из них, которые применяются в сухих

условиях или при переменном увлажнении и высушивании (градиент влажности от 50 до 100 %).

3. Оптимальные дозировки добавок-пластификаторов независимо от их типа находятся в пределах 0,6–0,9 % от массы цемента (для использованных в исследовании сырьевых материалов).

Также были определены направления для дальнейших исследований, которые будут касаться разработки составов модифицированного добавками тяжелого бетона и оценки его стойкости в различных условиях эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Обоснование методов испытаний коррозионной стойкости материалов гидратационного твердения // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека : II Междунар. онлайн-конгресс, посвящ. 30-летию кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. 2019. С. 735–739. EDN OAUUVD.

2. Трофимов Б.Я., Шулдяков К.В., Махмудов А.М. Влияние на долговечность бетона микроструктуры гидратных фаз цементного камня // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 3. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-8-18. EDN UCUSLU.

3. Mikerego E., Niyonzima N., Ntirampeba J.C. Impact of impurities of local construction materials on the bearing capacity of the concrete used in structures in Burundi // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 10. С. 1357–1362. DOI: 10.22227/1997-0935. 2021.10.1357-1362. EDN DZANPX.

4. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М. : Стройиздат, 1980. 536 с.

5. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н., Толыпин Д.А. Оптимизация процесса выбора типа цемента для изделий, эксплуатирующихся в агрессивных средах // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 3. С. 18–23. DOI: 10.12737/article_5abfc9b8581017.80464211. EDN YVAQFS.

6. Гончаров Ю.И., Рахимбаев Ш.М., Малькова М.Ю., Иванов А.С., Терсенова Л.А., Морозова А.Ю. Коррозионно-стойкие мелкозернистые шлакобетоны // Строительные материалы. 2004. № 6. С. 38–39. EDN IBENZD.

7. 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.

8. Yuan Q., Liu Z., Zheng K., Ma C. Portland cement concrete // Civil Engineering Materials. 2021. Pp. 59–204. DOI: 10.1016/b978-0-12-822865-4.00003-9

9. Lei L., Hirata T., Plank J. 40 years of PCE superplasticizers — History, current state-of-the-art and an outlook // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 157. P. 106826. DOI: 10.1016/j.cemconres. 2022.106826. EDN OEEPTF.

10. Тараканов О.В. Формирование микроструктуры цементных материалов с минеральными и комплексными добавками // Технология бетонов. 2009. № 7–8. С. 58–60.

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

13. 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. 107. Pp. 333–341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.073

14. Макушина Ю.В. К вопросу об идентификации добавок-пластификаторов для бетонов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 2 (51). С. 90–96. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-2/90-96. EDN SXZNGF.

15. Борисов А.А., Калашников В.И., Ащеулов П.В. Классификация реакционной активности цементов в присутствии суперпластификаторов // Строительные материалы. 2002. № 1. С. 10–12. EDN IBEDLH.

16. Белькова Н.А., Литвинова А.С., Сунрунчик Г.Г. Исследование влияния вида цемента на эффективность действия добавок-пластификаторов //

Химия, физика и механика материалов. 2019. № 4 (23). С. 33–45. EDN PYCRPA.

17. Зоткин А.Г. Прочностная совместимость цемента с суперпластификаторами // Технологии бетонов. 2014. № 9 (98). С. 22–26. EDN TBGACV.

18. Усачев С.М., Кукина О.Б., Ками К. Исследование свойств сырьевых материалов для бетонов в Республике Бурунди // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. № 1 (69). С. 36–46. DOI: 10.36622/VSTU.2023.69.1.003. EDN DWSVNT.

19. Усачев С.М., Ками К. Изменение структуры и свойств бетонов в различных условиях эксплуата-

ции (на примере Республики Бурунди) // Научный журнал строительства и архитектуры. 2024. № 2 (74). С. 58–67. DOI: 10.36622/2541-7592.2024.74.2.005. EDN DSTCCQ.

20. Шмитько Е.И., Макушина Ю.В., Белькова Н.А., Милохин И.В. Влажностная усадка бетона: влияние состава и структуры применяемых пластифицирующих добавок // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 1 (42). С. 128–135. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-1-13. EDN AXOXUL.

Поступила в редакцию 12 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2026 г.

Об авторах: **Килперик Ками** — аспирант кафедры технологий строительных материалов, изделий и конструкций; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; ResearcherID: PMF-7732-2026, ORCID: 0009-0001-5384-6187; kchilperic1@gmail.com;

Сергей Михайлович Усачев — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологий строительных материалов, изделий и конструкций; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; РИНЦ ID: 620342, ResearcherID: W-9416-2018, ORCID: 0000-0002-3856-187X; sergey.usa4ev@mail.ru;

Наталья Анатольевна Белькова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий строительных материалов, изделий и конструкций; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; РИНЦ ID: 608015, ResearcherID: V-8765-2018, ORCID: 0000-0002-3005-5956; verlnata@mail.ru.

Вклад авторов:

Ками К. — проведение экспериментальных исследований, обработка материала, написание статьи.

Усачев С.М. — общее научное руководство, концепция исследования.

Белькова Н.А. — научное руководство, анализ данных, написание статьи, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Посвящается светлой памяти коллеги и учителя Сергея Михайловича Усачева.

REFERENCES

1. Rakhimbaev Sh.M., Tolykina N.M., Khakhaeva E.N. Substantiation of test methods for corrosion resistance of hydration hardening materials. *Nature-like technologies of building composites for human habitat protection : II International online congress dedicated to the 30th anniversary of the Department of Building Materials Science, Products and Structures*. 2019; 735-739. EDN OAUUVD. (rus.).
2. Trofimov B., Shuldyakov K., Mahmudov A. Influence of microstructure of hydrate phases of cement stone on concrete durability. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2021; 3:8-18. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-8-18. EDN UCUSLU. (rus.).
3. Mikerego E., Niyonzima N., Ntirampeba J.C. Impact of impurities of local construction materials on the bearing capacity of the concrete used in structures in Burundi. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(10):1357-1362. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1357-1362. EDN DZANPX.
4. Moskvin V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. *Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection*. Moscow, Stroyizdat, 1980; 536. (rus.).
5. Rakhimbayev Sh.M., Tolykina N.M., Khakhaeva E.N., Tolykin D.A. Optimization of the process of choosing the type of cement for products operated in aggressive media. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2018; 3:18-23. DOI: 10.12737/article_5abfc9b8581017.80464211. EDN YVAQFS. (rus.).
6. Goncharov Yu.I., Rakhimbaev Sh.M., Malkova M.Yu., Ivanov A.S., Tersenova L.A., Morozova A.Yu. Corrosion-resistant fine-grained slag concrete. *Construction Materials*. 2004; 6:38-39. EDN IBENZD. (rus.).
7. 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.

8. Yuan Q., Liu Z., Zheng K., Ma C. Portland cement concrete. *Civil Engineering Materials*. 2021; 59-204. DOI: 10.1016/b978-0-12-822865-4.00003-9
9. Lei L., Hirata T., Plank J. 40 years of PCE superplasticizers — History, current state-of-the-art and an outlook. *Cement and Concrete Research*. 2022; 157:106826. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106826. EDN OEEPTF.
10. Tarakanov O.V. Formation of the microstructure of cement materials with mineral and complex additives. *Concrete technology*. 2009; 7-8:58-60. (rus.).
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. Colorado H.A., Muñoz A., Neves Monteiro S. Circular economy of construction and demolition waste: a case study of Colombia. *Sustainability*. 2022; 14(12):7225. DOI: 10.3390/su14127225. EDN VXHVFG.
13. 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; 107:333-341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.073
14. Makushina Ju.V. Identification of plasticizer-additives for concrete. *FEFU School of Engineering Bulletin*. 2022; 2(51):90-96. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-2/90-96. EDN SXZNGF. (rus.).
15. Borisov A.A., Kalashnikov V.I., Ashcheulov P.V. Classification of the reactive activity of cements in the presence of superplasticizers. *Construction Materials*. 2002; 1:10-12. EDN IBEDLH. (rus.).
16. Belkova N.A., Litvinova A.S., Suprunchik G.G. Study of impact of cement type on efficiency of plasticizer additives. *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2019; 4(23):33-45. EDN PYCRPA. (rus.).
17. Zotkin A.G. Strength compatibility of cements with superplasticizers. *Concrete Technologies*. 2014; 9(98):22-26. EDN TBGACV. (rus.).
18. Usachev S.M., Kukina O.B., Kami K. Exploration of the properties of raw materials for concrete in the Republic of Burundi. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023; 1(69):36-46. DOI: 10.36622/VSTU.2023.69.1.003. EDN DWSVNT. (rus.).
19. Usachev S.M., Kami K. Changes in the structure and properties of concretes in different operating conditions (by the example of the republic of Burundi). *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2024; 2(74):58-67. DOI: 10.36622/2541-7592.2024.74.2.005. EDN DCTCCQ. (rus.).
20. Shmitko E., Makushina Ju., Belkova N., Milokhin I. Moist shrinkage of concrete: influence of composition and structure of the applied plasticizing additives. *FEFU School of Engineering Bulletin*. 2020; 1(42):128-135. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-1-13. EDN AXOXUL. (rus.).

Received October 12, 2025.

Adopted in revised form on October 15, 2025.

Approved for publication on February 13, 2026.

BIONOTES: Chilperic Kami — postgraduate student of the Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84 20th Anniversary of October st., Voronezh, 394006, Russian Federation; ResearcherID: PMF-7732-2026, ORCID: 0009-0001-5384-6187; kchilperic1@gmail.com;

Sergey M. Usachev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84 20th Anniversary of October st., Voronezh, 394006, Russian Federation; ID RSCI: 620342, ResearcherID: W-9416-2018, ORCID: 0000-0002-3856-187X; sergey.usa4ev@mail.ru;

Natalia A. Belkova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84 20th Anniversary of October st., Voronezh, 394006, Russian Federation; ID RSCI: 608015, ResearcherID: V-8765-2018, ORCID: 0000-0002-3005-5956; verlnata@mail.ru.

Contribution of the authors:

Chilperic Kami — experimental research, material processing writing the article.

Sergey M. Usachev — general scientific guidance, research concept.

Natalia A. Belkova — scientific guidance, data analysis, writing article, final findings.

The authors declare no conflict of interest.

Dedicated to the blessed memory of a colleague and teacher Sergey Mikhailovich Usachev.