

УДК 666.972.16

**Н. М. ЗАЙЧЕНКО, С. В. ЛАХТАРИНА, Е. В. ЕГОРОВА, В. Б. МАРТЫНОВА, Т. П. КИЦЕНКО**

ГООУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ЗАТВОРЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ  
ПОЛНОЙ УСАДКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ**

**Аннотация.** Исследовано влияние дополнительного количества воды затворения на показатели подвижности бетонной смеси, значения механических и деформационных свойств (аутогенной и влажностной усадки) легких высокопрочных бетонов. Установлено, что введение дополнительного количества воды затворения увеличивает фактическое значение водоцементного отношения до 0,41, однако не снижает показатель предела прочности при сжатии бетонов. При этом значение аутогенной усадки бетона с дополнительным количеством воды затворения в возрасте 28 суток на 50 % меньше усадки бетона без дополнительного количества воды. Общая усадка легкого бетона с дополнительным количеством воды затворения на 16 % ниже аналогичного состава без дополнительного количества.

**Ключевые слова:** подвижность, аутогенная усадка бетона, влажностная усадка бетона, легкий высокопрочный бетон, суперпластификатор.

В последние десятилетия отмечена тенденция увеличения доли конструкционного легкого бетона прочностью 45...70 МПа в вертикальных несущих элементах высотных зданий, предварительно напряженных сборных плит покрытий и перекрытий, конструкциях мостов и сооружений оффшорной зоны (Норвегия, Голландия, США, Германия, Великобритания, Япония и др.) [1–5]. По оценкам специалистов, применение легкого бетона в 1,5...2,5 раза снижает материальные затраты по сравнению с обычным тяжелым бетоном аналогичного класса прочности. При этом некоторые архитектурные варианты оформления конструктивно реализуемы только при использовании высокопрочного легкого бетона [6].

Анализируя известные литературные источники [7–13], можно сделать вывод, что основные преимущества легких бетонов проявляются прежде всего в следующем:

- увеличение длины пролетов несущих конструкций, работающих на изгиб, где собственная масса составляет значительную долю от полной нагрузки (большепролетные мосты);
- сокращение расхода бетона и арматуры и, соответственно, транспортировочной и монтажной массы, более высокая начальная прочность, более ранняя распалубка и предварительное обжатие, что обеспечивает возможность более ранней эксплуатации элементов;
- более высокая плотность, водо- и газонепроницаемость микро- и мезоструктуры за счет низкого содержания капиллярных пор;
- более высокая износостойкость;
- повышенная защита арматуры от коррозии за счет чрезвычайно медленного распространения карбонизации;
- повышенная водонепроницаемость, в основе которой лежит противодействие продвижению влаги, порождаемое сжатым воздухом, находящимся в порах и капиллярах заполнителя;
- повышенная стойкость к воздействию различных агрессивных сред;
- возможность получения менее теплопроводного бетона для ограждающих конструкций, что обусловлено тем, что коэффициент теплопроводности вещества, из которого складывается твердая фаза материала, в 100 раз превышает коэффициент теплопроводности воздуха, заключенного в порах. Теплопроводность легких бетонов составляет приблизительно  $\frac{1}{3}$  теплопроводности тяжелых, т. е. они оказывают в три раза большее сопротивление теплопередаче, чем тяжелые [9];

- повышенное сцепление цементного камня с легкими заполнителями, а также протекание пуццолановых реакций на границе раздела «цементная паста – пористый заполнитель», что обеспечивает эксплуатационную долговечность бетона;
- медленная влаготдача водонасыщенных легких заполнителей, которая обеспечивает бетону последующий «внутренний уход».

Для получения высокопрочных легких бетонов используют те же технологические приемы, что и в технологии тяжелых высокопрочных бетонов: применение высокомарочных, в том числе композиционных цементов и максимально прочных пористых заполнителей; проектирование состава бетона с предельно низким водоцементным отношением; применение супер- и гиперпластификаторов в сочетании с микрокремнеземом или другими тонкодисперсными кремнеземистыми добавками; в ряде случаев осуществляют предварительную подготовку легкого заполнителя (водонасыщение, активация поверхности, гидрофобизация и др.); особо тщательное перемешивание и уплотнение бетонной смеси с сохранением ее высокой однородности; создание благоприятных условий твердения бетона [14].

В то же время известно, что характерной особенностью легких бетонов на пористых заполнителях является то обстоятельство, что каждый тип крупного заполнителя позволяет получать бетоны только до определенной прочности, по достижении которой дальнейшее повышение прочности раствора (за счет повышения расхода цемента и снижения водоцементного отношения) не приводит к заметному повышению прочности бетона. Так по данным [14] для получения бетона с прочностью свыше 60 МПа и средней плотностью около 1 750 кг/м<sup>3</sup> (ККК = 34) применяли высокопрочный керамзит и органо-минеральный модификатор серии МБ.

С другой стороны, бетоны с высоким коэффициентом конструктивного качества получены при частичной замене плотного крупного заполнителя пористым (ККК = 39) [15], хотя при этом средняя плотность бетона остается достаточно высокой – 2 050 кг/м<sup>3</sup>. Дальнейшее снижение средней плотности бетона может быть достигнуто при замене плотного мелкого заполнителя пористым. При этом, в случае высокой пуццолановой активности мелкого заполнителя, может быть существенное повышение прочности бетона, обусловленное уплотнением микроструктуры и контактной зоны. Например, по данным [6, 7] отмечен положительный эффект частичной замены плотного песка и цемента комбинированной минеральной добавкой в виде микрокремнезема и золы-уноса.

**Целью** настоящей работы является исследование влияния минеральной добавки в виде зольных сфер и керамзитового песка в качестве частичной (полной) замены плотного песка, а также керамзита фракции 5...10 мм – как частичная (полная) замена гранитного щебня, на показатели подвижности бетонных смесей, среднюю плотность, аутогенную и влажностную усадки и прочность бетона.

Для определения влияния дополнительного количества воды затворения на показатель подвижности бетонных смесей, аутогенную и влажностную усадки и прочностные показатели легких бетонов были изготовлены ранее разработанные составы легких конструктивных бетонов с частичной (25 %) заменой крупного плотного заполнителя (щебня гранитного) – пористым (щебнем керамзитовым), и частичной (50 %) заменой мелкого плотного заполнителя (кварцевого песка) – керамзитовым песком [17]. При этом во всех случаях использовались сухие пористые заполнители без дополнительной воды затворения (состав № 1) и с дополнительной водой затворения, необходимой для внутреннего ухода (состав № 2). Объем дополнительной воды для состава № 2 составляет 0,025 м<sup>3</sup>.

В качестве компонентов бетонных смесей приняты: портландцемент (ПЦ): ПЦ I-500; минеральная добавка: микрокремнезем (МК): МАРЕPLAST SF, химическая добавка: суперпластификатор (СП) – Melflux 5581 F; крупный заполнитель плотный – щебень (Щ) гранитный фракции 5...10 мм, мелкий – песок (П) кварцевый; крупный заполнитель пористый (ЩК) – дробленый керамзитовый гравий, фракция 5...10 мм; мелкий – песок керамзитовый (ПК).

Бетонные смеси приготовлены с применением в качестве активной минеральной добавки микрокремнезема в количестве 10 % от расхода цемента. Количество суперпластификатора принято постоянным – 0,7 % от расхода цемента. Составы и свойства свежеприготовленных бетонных смесей приведены в табл. 1.

Аутогенную усадку бетона исследовали на образцах-призмах размером 40 40 160 мм при твердении в условиях, исключающих испарение влаги из бетона (рис. 1). Измерение деформаций образцов выполнено головками измерительными рычажно-зубчатыми типа 1ИГ (ГОСТ 18833) с ценой деления 0,001 мм.

Измерение деформаций аутогенной усадки осуществляли в течение 28 суток, затем образцы извлекали из формы, на их торцы наклеивали стальные реперы и в дальнейшем производили измерения

Таблица – Состав и свойства свежеприготовленных бетонных смесей

| № | Расход компонентов, кг (л)/м <sup>3</sup> |     |    |     |     |    |     |     |                   |     | Свойства бетонной смеси              |                         |
|---|---|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|-------------------|-----|--------------------------------------|-------------------------|
|   | В/Ц                                       | ПЦ  | МК | П   | ПК  | ЩК | Щ   | В   | В <sup>1</sup>    | СП  | средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | Д <sub>расп.</sub> , мм |
| 1 | 0,37                                      | 612 | 61 | 394 | 163 | 59 | 515 | 224 | 0                 | 4,3 | 1 924                                | 500                     |
| 2 | 0,41                                      | 612 | 61 | 394 | 163 | 59 | 515 | 224 | 24,5 <sup>*</sup> | 4,3 | 1 928                                | 530                     |

\*Примечание: избыточное количество воды сверх расчетной.

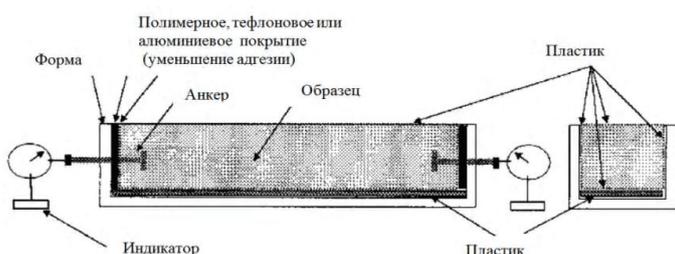


Рисунок 1 – Форма для определения линейной деформаций аутогенной усадки образцов с размерами поперечного сечения 40×40 мм.

деформаций усадки бетона, вызванных испарением из них влаги (влажностная усадка). При этом образцы хранились в эксикаторе над порошком хлористого кальция.

Измерение линейных деформаций усадки при высыхании бетона проводились с помощью индикаторов часового типа с точностью до 0,01 мм. Схема устройства для определения деформаций усадки при высушивании образцов бетона представлена на рис. 2.

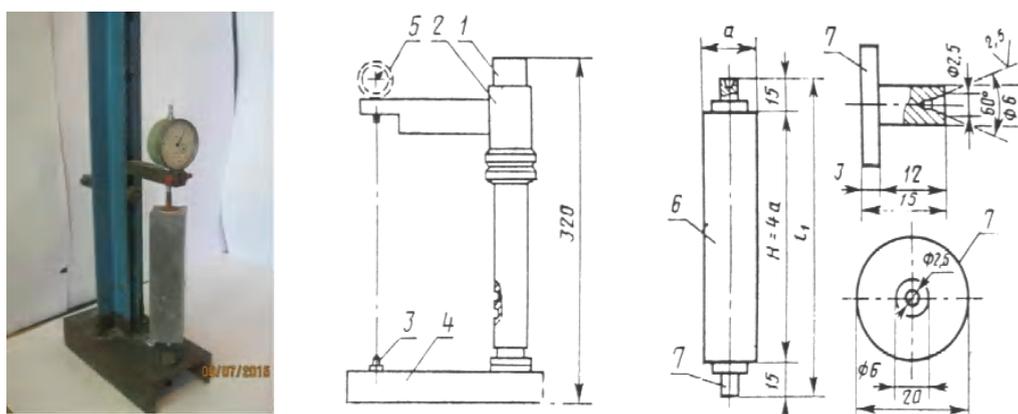


Рисунок 2 – Схема устройства для определения деформаций усадки при высыхании образцов бетона с размерами поперечного сечения 40×40 мм: 1 – стойка; 2 – кронштейн; 3 – конусообразный выступ; 4 – нижняя опора; 5 – индикатор; 6 – образец; 7 – репер; а – размер стороны поперечного сечения образца; Н – высота образца; l<sub>1</sub> – база измерений.

Текущность (D<sub>распл.</sub>) смесей определяли при помощи уменьшенного конуса Абрамса (d<sub>1</sub> = 140 мм, d<sub>2</sub> = 65 мм, h = 215 мм, V = 2,2 л.). Предел прочности при сжатии бетона определяли на образцах-кубах со стороной ребра 0,07 м.

Установлено, что бетонная смесь с сухим пористым заполнителем (состав № 1) характеризуется высокой начальной текучестью (диаметр расплыва конуса 500 мм), однако вследствие поглощения пористым заполнителем части воды затворения наблюдается ее резкая потеря. В то же время при введении дополнительной воды затворения для внутреннего ухода (состав № 2) бетонная смесь также характеризуется высокой начальной текучестью (диаметр расплыва конуса 530 мм), однако при этом ее дальнейшая потеря во времени выражена в значительно меньшей мере.

Введение дополнительного количества воды затворения увеличивает фактическое значение водоцементного отношения до 0,41, однако не снижает показатель предела прочности при сжатии бетонов (рис. 3). При этом значение аутогенной усадки бетона состава № 2 в возрасте 28 суток составляет  $-100 \times 10^{-6}$  (рис. 4), что на 50 % меньше усадки бетона с сухим пористым заполнителем (состав № 1):  $-200 \times 10^{-6}$ . Очевидно, что поглощаемая пористым заполнителем избыточная часть воды затворения впоследствии служит агентом внутреннего ухода, что снижает риск микротрещинообразования бетонов в раннем возрасте вследствие развития аутогенной усадки.

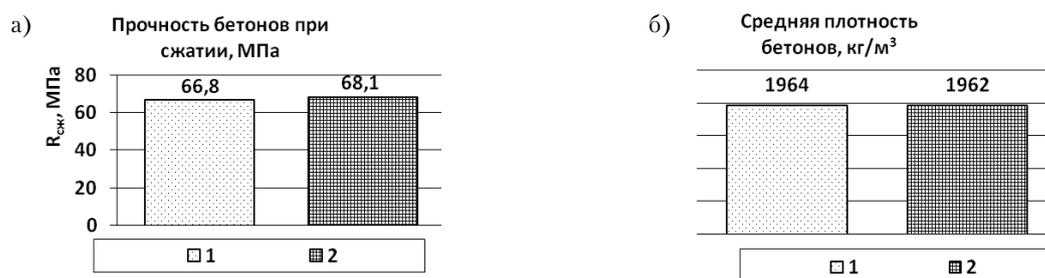


Рисунок 3 – Изменение предела прочности при сжатии (а) и средней плотности (б) конструкционных легких бетонов.

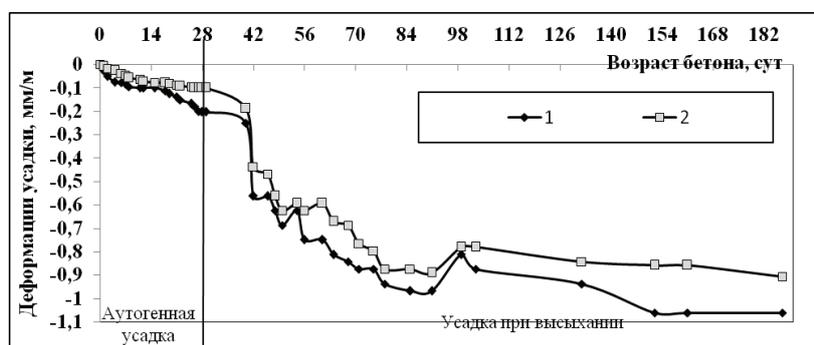
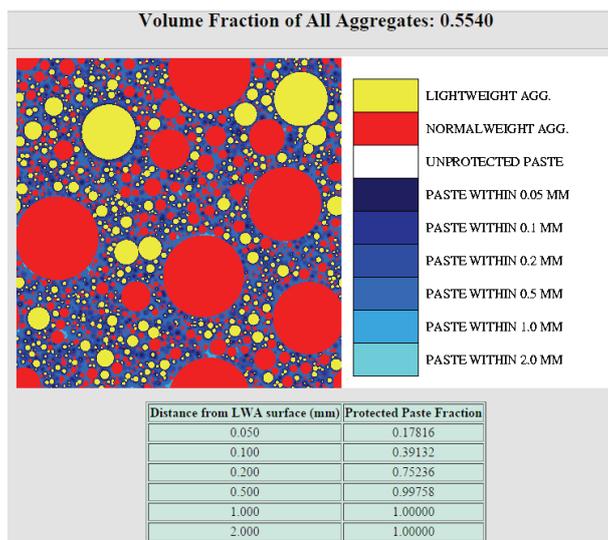


Рисунок 4 – Изменение аутогенной усадки и усадки при высыхании бетонов во времени.

На официальной странице Американского института стандартов NIST (<http://concrete.nist.gov>) в онлайн режиме была построена 2D модель распределения пористых и плотных заполнителей в бетоне и при этом рассчитана область ухода за бетоном на расстояние до 2 мм от поверхности пористых заполнителей всех фракций. Показано, что дополнительная вода затворения, обеспечивая, как минимум, водосодержание пористого заполнителя 9,8 % и его распределение в бетоне, создает благоприятные условия для более полной гидратации вяжущего во всем объеме бетона, уменьшая при этом внутренние напряжения, вызванные аутогенной усадкой (рис. 5).

После измерения аутогенной усадки в течение 28 суток образцы-призмы выдерживали в эксикаторе над хлористым кальцием и продолжали измерять усадку бетонов при высыхании. Общая усадка бетона состава № 1 с сухим пористым заполнителем в возрасте 187 суток составляет 1,07 мм/м (рис. 4), в то же время значение полной усадки бетона с дополнительным количеством воды затворения (состав № 2) составляет 0,9 мм/м, что на 16 % меньше.



**Рисунок 5** – 2D модель распределения пористых и плотных заполнителей в бетоне.

## ВЫВОДЫ

Установлено, что введение дополнительного количества воды затворения увеличивает фактическое значение водоцементного отношения до 0,41, однако не снижает показатель предела прочности при сжатии бетонов. При этом значение аутогенной усадки бетона с дополнительным количеством воды затворения в возрасте 28 суток на 50 % меньше усадки бетона без дополнительного количества воды. Общая усадка легкого бетона с дополнительным количеством воды затворения на 16 % ниже аналогичного состава без дополнительного количества воды. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что избыточная вода затворения, поглощаемая пористым заполнителем, служит для внутреннего ухода за бетоном и снижает значение аутогенной усадки и усадки при высыхании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев, В. Ф. Керамзитобетон в мостостроении [Текст] / В. Ф. Исаев // Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по легким бетонам / Под ред. И. А. Плотникова. – М. : Стройиздат, 1985. – С. 146–147.
2. Building Bridges and other Marine Structures with Structural Lightweight Aggregate Concrete [Текст] : ESCSI Information Sheet № 4700.4 / Expanded Shale, Clay and Slate Institute. – Murray Holladay Road : Expanded Shale, Clay and Slate Institute, 1992. – 26 p.
3. Spliced Segmental Prestressed Concrete I-Beams for Shelby Creek Bridge [Текст] / W. B. Caroland, D. Deep, H. H. Jansen, L. Spaans // PCI Journal. – 1992. – September-October. – P. 22–33.
4. Celik, H. O. Lightweight HPC on route 106 bridge in Virginia [Текст] / H. O. Celik // HPC Bridge Views. – 2004. – Issue No. 32. – P. 3.
5. Clarke, J. L. Structural Lightweight Aggregate Concrete [Текст] / J. L. Clarke. – London ; New York : Blackie Academic & Professional, 2005. – 240 p.
6. Фаликман, В. Р. Высокопрочный легкий бетон: технология и свойства [Текст] / В. Р. Фаликман, Ю. В. Сорокин, О. М. Горячев // Бетон и железобетон. – 2005. – № 2. – С. 8–11.
7. Бужевич, Г. А. Долговечность легких бетонов на пористых заполнителях [Текст] / Г. А. Бужевич, Г. И. Горчаков // Всесоюзная конференция по легким бетонам : тезисы докладов / Под ред. А. А. Плотникова. – М. : Гостройиздат, 1970. – С. 61–73.
8. Довжик, В. Г. Технология высокопрочного керамзитобетона [Текст] / В. Г. Довжик, В. А. Дорф, В. П. Петров. – М. : Стройиздат, 1976. – 136 с.
9. Иванов, И. А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях [Текст] / И. А. Иванов. – М. : Стройиздат, 1993. – 182 с. – ISBN 5-274-00822-4.
10. Звездов, А. И. Высокопрочные легкие бетоны в строительстве и архитектуре [Текст] / А. И. Звездов, В. Р. Фаликман // Деловая слава России. – 2010. – № 4. – С. 106–109.
11. Легкие бетоны: Проектирование и технология [Текст] : научное издание / А. Шорт [и др.] ; пер. с англ. В. З. Мешкова ; под ред. В. Н. Ярмаковского. – М. : Стройиздат, 1981. – 233 с.
12. Симонов, М. З. Основы технологии легких бетонов [Текст] / М. З. Симонов. – М. : Издательство литературы по строительству, 1973. – 584 с.

13. Мешкаускас, Ю. И. Конструктивный керамзитобетон [Текст] / Ю. И. Мешкаускас. – М. : Стройиздат, 1977. – 83 с.
14. Зайченко, Н. М. Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно-модифицированной микроструктурой [Текст] : Монография / Н. М. Зайченко. – Макеевка : ДонНАСА, 2009. – 207 с.
15. Weiss, J. Improving Concrete Bridge Decks with Internal Curing, Concrete [Электронный ресурс] / J. Weiss, C. DiBella, D. D. Bentz // Concrete Bridge Views. – 2013. – Issue 69. – Режим доступа : <http://concretebridgeviews.org/i69/Article3.asp>.
16. Фаликман, В. Р. Высокопрочный легкий бетон: технология и свойства [Текст] / В. Р. Фаликман, Ю. В. Сорокин, О. М. Горячев // Бетон и железобетон. – 2005. – № 2. – С. 8–11.
17. Лахтарина, С. В. Влияние частичной замены плотных заполнителей пористыми на среднюю плотность и прочность бетонов [Текст] / С. В. Лахтарина, Н. М. Зайченко // Вісник Одеської державної академії будівництва і архітектури. – 2014. – Вип. № 52. – С. 151–160.

Получено 16.01.2018

М. М. ЗАЙЧЕНКО, С. В. ЛАХТАРИНА, О. В. ЄГОРОВА, В. Б. МАРТИНОВА,  
Т. П. КІЦЕНКО  
ВПЛИВ ДОДАТКОВОЇ ВОДИ ЗАТВОРЮВАННЯ НА ПОКАЗНИКИ ПОВНОЇ  
УСАДКИ ВИСОКОМІЦНИХ ЛЕГКИХ БЕТОНІВ  
ДОНУ ВПО «Донбасська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Досліджено вплив додаткової кількості води затворювання на показники рухливості бетонної суміші, значення механічних і деформаційних властивостей (аутогенної і вологісної усадки) легких високоміцних бетонів. Встановлено, що введення додаткової кількості води збільшує фактичне значення водоцементного відношення до 0,41, однак не знижує показник межі міцності при стиску бетонів. При цьому значення аутогенної усадки бетону з додатковою кількістю води в віці 28 діб на 50 % менше усадки бетону без додаткової кількості води. Загальна усадка легкого бетону з додатковою кількістю води на 16 % нижче аналогічного складу без додаткової кількості.

**Ключові слова:** рухомість, аутогенна усадка бетону, вологісна усадка бетону, легкий високоміцний бетон, суперпластифікатор.

MYKOLA ZAICHENKO, SERGEY LAHTARYINA, ELENA EGOROVA,  
VITA MARTYNONOVA, TATYANA KITSENKO  
INFLUENCE OF THE EXTRA WATER ADDITIONAL TO THE TOTAL  
SHRINKAGE OF HIGH-STRENGTH LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The effect of extra mixing water on the slump of the concrete mix, the mechanical and deformation properties (autogenous and drying shrinkage) of high-strength lightweight aggregate concrete are investigated. It is established that the addition of extra mixing water, increases the actual value of water-cement ratio to 0.41, however, does not reduce the index of compressive strength of the concrete. The value of concrete autogenous shrinkage with an addition of extra mixing water at the age of 28 days is 50% less than shrinkage of concrete without additional water. The total shrinkage of lightweight concretes with addition of extra mixing water is 16% below the composition without adding.

**Key words:** slump, autogenous shrinkage, drying shrinkage, high-strength lightweight aggregate concrete, superplasticizer.

**Зайченко Николай Михайлович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: высокопрочные и особо высокопрочные бетоны на основе модифицированных дисперсных компонентов бетона.

**Лахтарина Сергей Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: легкие высокопрочные бетоны.

**Егорова Елена Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: самоуплотняющиеся бетоны.

**Мартынова Вита Борисовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: ячеистые бетоны.

**Киценко Татьяна Петровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: огнеупорные вяжущие и бетоны.

**Зайченко Микола Михайлович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: високоміцні і надвисокоміцні бетони на основі модифікованих дисперсних компонентів бетону.

**Лактарина Сергій Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: легкі високоміцні бетони.

**Єгорова Олена Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: бетони, що самоущільнюються.

**Мартынова Вита Борисовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ДОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: низдрюваті бетони.

**Киценко Татьяна Петрівна** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ДОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: вогнетривкі в'язучі та бетони.

**Zaichenko Mykola** – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: high strength and high-performance concretes on the base of modified fillers.

**Lakhtaryina Sergey** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: lightweight high-strength concrete.

**Yegorova Elena** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: self-compacting concretes.

**Martynova Vita** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: cellular concretes.

**Kitsenko Tatyana** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: fire resistant binders and concretes.