

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

**ИННОВАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ**

Сборник научных трудов

Тверь 2022

УДК 378.1:[33+31+62+69+004+502+54]
ББК 74.48

Инновации и моделирование в строительном материаловедении: сборник научных трудов / под ред. В.В. Белова. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2022. 156 с.

Представлены статьи с результатами актуальных исследований ученых и специалистов Тверского государственного технического университета. Работы посвящены возможностям математического моделирования, прогнозирования свойств и проведения автоматизированных расчетов. В них определены сегодняшние инновационные подходы и методология развития строительных технологий и процессов подготовки специалистов, работающих в данной сфере.

Предназначен для научных и инженерно-технических работников, научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, а также докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов вузов строительного профиля.

Авторы докладов несут ответственность за достоверность приведенных в них сведений.

ВЛИЯНИЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДОБАВОК НА СВОЙСТВА СУХОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО

А.В. Балаева, В.Б. Петропавловская

© Балаева А.В., Петропавловская В.Б., 2022

Аннотация. Показано влияние активных минеральных добавок на свойства гипсового вяжущего. Исследованы свойства гипсовых смесей, основные физико-механические характеристики. Проанализированы результаты исследования различными авторами влияния модифицирующих добавок, приводящего к существенному повышению прочностных характеристик и водостойкости гипсового вяжущего. Указаны новые экспериментальные результаты, показывающие, что применение оптимального содержания метакаолина в качестве активной минеральной добавки позволяет управлять формированием микроструктуры и свойствами камня на основе композиционного вяжущего, повышать плотность, водостойкость при сохранении прочностных характеристик. Установлено, что при оптимально подобранном водотвердом отношении можно получить прочность, близкую к прочности бетона.

Ключевые слова: гипсовое вяжущее, метакаолин, сухая строительная смесь, свойства.

Введение

В последнее время продукции на основе гипсовых вяжущих становится все больше на рынке стройиндустрии. Гипсовые вяжущие вещества и материалы на их основе обладают рядом ценных качеств, их производство нетоксично, характеризуется низким расходом топлива и энергии. Гипсовые материалы отличаются огне- и пожаробезопасностью, сравнительно низкой плотностью. Особо важным свойством гипсовых вяжущих веществ является скорость их твердения и схватывания. При этом гипсовые изделия имеют определенные недостатки, из-за которых масштабы их применения в строительстве ограничены: низкую водостойкость, проявляющуюся в значительном падении прочности при увлажнении; недостаточную морозостойкость; повышенную ползучесть [1].

Чаще всего причиной ухудшения основных эксплуатационно-технических показателей является оставшаяся вода затворения. В связи с этим основная задача заключается в нахождении способов снижения

водо вяжущего отношения получаемой композиции с обеспечением формования из нее изделия с заданными параметрами.

Авторы статьи [2] утверждают, что наибольшее водоредуцирующее действие проявляют поликарбоксилаты, а именно Melflux 2651 F. Было выявлено, что данная добавка существенно замедляет сроки схватывания гипсового теста, а ее введение до 0,6 % в 5 раз увеличивает прочность при сжатии отвержденного гипсового вяжущего по сравнению с немодифицированным вяжущим. Кроме того, применение метакаолина в качестве активной минеральной добавки позволяет управлять формированием микроструктуры и свойствами камня на основе композиционного вяжущего, повышать плотность, водостойкость, морозостойкость изделий при сохранении прочностных характеристик. Авторы статьи [3] определяли оптимальное содержание активной минеральной добавки АМД в составе смеси. Они исследовали добавки:

каолин по ТУ 5729-016-48174985-2003 ООО НПП «Промышленные минералы», г. Тольятти, удельная поверхность $S_{уд} = 1\ 357\ м^2/кг$;

метакаолин, полученный путем обжига каолина при температуре $700\ °C$ в течение 1 ч, $S_{уд} = 1\ 357\ м^2/кг$;

активированный метакаолин (метакаолин-А), $S_{уд} = 1\ 357\ м^2/кг$;

трепел (аморфный), содержание $SiO_2 = 52,22\ \%$, $S_{уд} = 1\ 194\ м^2/кг$;

биокремнезем Diamix, $S_{уд} = 20\ м^2/г$;

диатомит дегидратированный Diasil Инзенского месторождения, $S_{уд} = 11,2\ м^2/г$.

Было установлено, что исследуемые природные АМД обладают разной степенью активности на 5-е, 7-е и 30-е сутки. При этом наибольшей активностью по поглощению $Ca(OH)_2$ на 5-е и 7-е сутки обладают добавки метакаолина и метакаолина-А, что обуславливает их относительно небольшое требуемое содержание в составе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (ГЦПВ). Наиболее эффективными по критерию повышения прочности являются метакаолин, повышающий пределы прочности при изгибе на 49 %, при сжатии – на 48 %; биокремнезем – 37 и 44 % соответственно; метакаолин-А – 28 и 48 % соответственно.

Немаловажную роль играет вид метакаолина, поскольку он оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства вяжущего. Авторы статьи [4] сравнили промышленный метакаолин «МетаРус» (МК-1) и метакаолин, полученный в лабораторных условиях (МК-2). В результате проведенных опытов были сделаны заключения: составы, содержащие метакаолин МК-2, характеризуются меньшей прочностью, чем соответствующие им составы, содержащие метакаолин МК-1. Гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, содержащее МК-1, обладает наибольшими коэффициентами водостойкости и коррозионной стойкости [4].

Одним из наиболее эффективных способов повышения водостойкости является создание ГЦПВ. Авторы статей [5, 6, 9] провели ряд экспериментов, используя различные активные минеральные добавки: метакаолин, кремнегель и трепел. Результаты показали, что активность метакаолина в 2 раза превышает активность оставшихся двух добавок. Далее было исследовано влияние одной из лучших пластифицирующих добавок Melflux 5581, редиспергируемого полимерного порошка Vinnapas 8034 Н и эфира целлюлозы Hercules 7591. Введение модифицирующих добавок (за исключением эфира целлюлозы) привело к снижению пористости образцов и коэффициента капиллярного водопоглощения, что обуславливает повышение водостойкости ГЦПВ в присутствии гиперпластификатора, редиспергируемого полимерного порошка и комплексной добавки. Кроме того, существенно возросла морозостойкость.

На основе проведенных в статьях [5, 6] опытов можно сделать вывод, что повышение водостойкости гипсовых вяжущих обеспечивается введением комплексной добавки, потому что частицы редиспергируемых полимерных порошков распределяются в структуре материала, формируя непрерывный полимерный каркас. Образование полимерных пленок во внутрипоровом пространстве приводит к внутренней гидрофобизации материала, а пластифицирующая добавка снижает вязкость раствора и тем самым уменьшает количество воды затворения.

Авторы статей [7, 8] проводили эксперименты для улучшения характеристик гипсовых вяжущих на основе местных материалов, а также промышленных отходов. В качестве вяжущего для проведения работы применялся строительный гипс Г-5 БП, в качестве компонента комплексной гидравлической добавки – негашеная известь третьего сорта и керамзитовая пыль, а в качестве тонкомолотого активного минерального компонента – отход производства керамзита. В качестве водоудерживающей применялась добавка высокомолекулярного полиэтиленоксида. При выполнении экспериментов авторами статьи [8] была выведена зависимость повышения водостойкости гипсового вяжущего от введения комплексной добавки, включающей известь в количестве 5 % от массы гипсового вяжущего и керамзитовую пыль с удельной поверхностью $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ в количестве 10–30 % от массы вяжущего. Стало известно, что эффективность действия керамзитовой пыли как активной минеральной добавки повышается с увеличением в ее составе количества аморфной фазы и уменьшением суммарного количества глинистых минералов. Разработанные составы штукатурных гипсовых сухих смесей повышенной водостойкости имеют основные показатели физико-технических свойств: прочность при сжатии 5–7 МПа; прочность сцепления с основанием 0,5–0,6 МПа.

Одним из главных плюсов, который можно отметить, является конкурентоспособность в ценовом отношении благодаря применению полиэтиленоксида местного производства (вместо дорогостоящих импортных добавок), а также отходов промышленности строительных материалов – керамзитовой пыли. Применение последних сокращает расход более дорогостоящего строительного гипса.

Цели настоящей работы – подбор и исследование оптимального состава сухой строительной смеси на основе гипсового вяжущего и комплексных органоминеральных добавок, а также изучение влияния последних на основные характеристики смеси, такие как прочность и водостойкость.

Материалы и методы исследования

В исследованиях основным исходным материалом является полуводный высокопрочный гипс Г-16. В качестве добавок используются метакаолин, суперпластификатор Melflux 2651F и минеральная фибра (эттрингит) – отход очистки воды. Минералогический состав метакаолина МКЖЛ: каолинит – 90–93 %; кварц – 4–5 %; слюда – 2,5–3 %. Ниже приведен химический состав метакаолина в процентах:

Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	Na_2O	CaO	ППП
42–43	53–54	0,4–0,8	0,3–0,5	0,8–1,1	0,05	0,15	До 1,5

Для затворения гипсовых порошков используется насыщенный раствор извести. Предел прочности при сжатии, истинную и среднюю плотность образцов определяют по стандартным методикам как среднее из результатов испытаний трех образцов. Свойства современного гипса устанавливаются нормами ГОСТ 23789 и ГОСТ 125.

Чтобы решить поставленную задачу, мы должны сделать по три образца для разного процентного содержания метакаолина, Melflux 2651F и отхода очистки воды, а также серию образцов нормального состава (без добавок). Следовательно, необходимо изготовить двенадцать образцов.

В ходе проведения экспериментальной части научного исследования применялась машина МС-500 для испытания на сжатие и изгиб.

Приготовление смеси исследуемых составов для изготовления образцов осуществлялось в лаборатории (в емкостях для смешивания). Подготавливалась гипсовая смесь путем перемешивания сухих компонентов (гипсового вяжущего Г-16, метакаолина) в течение 1 мин до достижения визуального равномерного распределения частиц метакаолина в массе гипсового вяжущего. Melflux 2651F затворялся насыщенным раствором извести и перемешивался до полного растворения в течение 1 мин. В жидкую субстанцию порционно (по 1/3 части) добавлялась сухая

гипсовая смесь и активно перемешивалась в течение 2 мин. Общее время перемешивания должно составлять не менее 5 мин. В случае проведения опытов с минеральной фиброй, в качестве которой использовался отход очистки сточных вод (он представлял собой некую суспензию), процесс приготовления смеси несколько отличался. Все сухие компоненты (гипсовое вяжущее Г-16, метакаолин, Melflux 2651F) перемешивались вместе в течение 1 мин. Суспензия из отходов очистки воды и насыщенный раствор извести перемешивались в отдельной емкости в течение 1 мин до получения однородной структуры. Образовавшаяся смесь укладывалась в металлическую форму. После этого поверхность образцов заглаживалась строительным мастерком.

Температура внутри помещения в процессе приготовления образцов составляла 20 ± 2 °С, а влажность – не менее 45 %. Образцы твердели в нормальных условиях (влажность – 60–100 %; $t - 20 \pm 2$ °С) в течение 3 сут.

В табл. 1 указаны расходы сухих материалов в граммах (г), жидких составляющих – в миллилитрах (мл).

Таблица 1

Расход материалов

Маркировка	Г16	Вода	Мета-каолин	Melflux 2651F	Гашеная известь	Отход очистки воды
Серия 0	150	72	–	–	–	–
Серия 1	120	–	0,4	0,4	27	–
Серия 2	120	–	0,2	0,4	25	2
Серия 3	120	–	0,1	0,4	27	–

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные значения плотности и прочности на сжатие в возрасте 3 сут стандартных образцов-кубов $2 \times 2 \times 2$ см приведены на рис. 1 и 2. Сводные данные указаны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментов

Маркировка	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа
Серия 0	1 314,80	19,30
Серия 1	1 932,59	49,73
Серия 2	1 597,53	45,13
Серия 3	1 889,88	50,16



Рис. 1. Сравнительный анализ плотности образцов

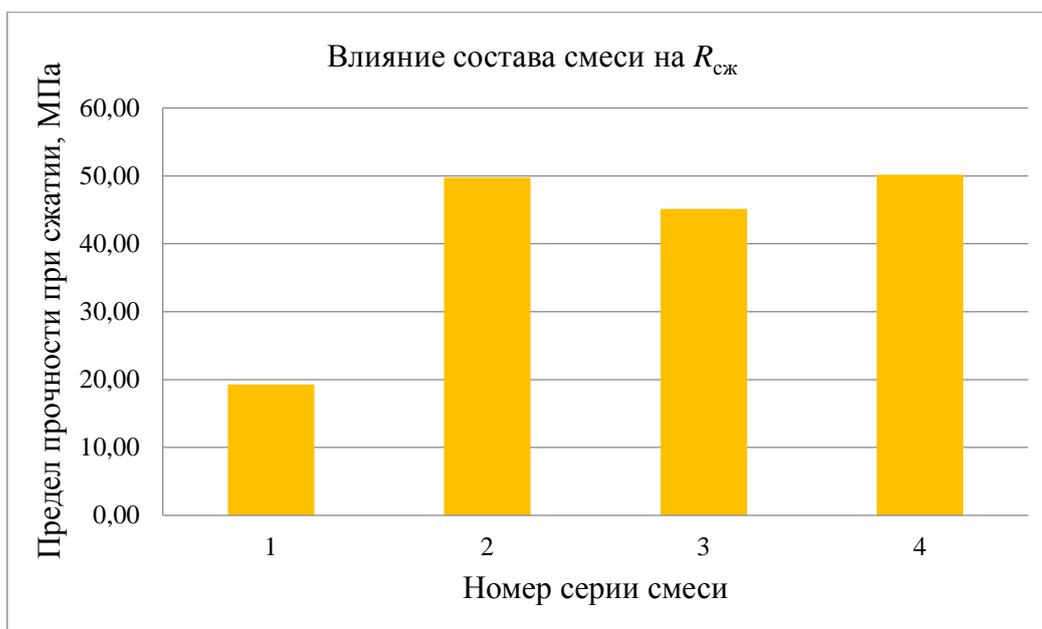


Рис. 2. Сравнительный анализ прочности на сжатие

Анализ результатов показал, что плотность образцов с добавкой в виде отхода очистки воды значительно ниже, чем плотность образцов без добавки, и стремится к плотности образцов нулевого состава. Однако данная добавка несколько снижает показатели результатов испытания на прочность на сжатие по сравнению с другими образцами. При этом во всех проведенных испытаниях на прочность можно отметить значительный рост показателей в сравнении с серией образцов, где в составе фигурируют только гипсовое вяжущее и вода. Значения по результатам на прочность можно сравнить со значениями прочностью бетона.

Похожие исследования влияния добавки Melflux 2651F проводили авторы статьи [10]. В ходе их исследования были получены аналогичные зависимости по прочности. Авторы статьи [9] отмечают снижение нормальной густоты ГЦПВ; повышение плотности, прочности, водостойкости; снижение водопоглощения искусственного камня на основе ГЦПВ. Оптимальное количество всех вводимых добавок в рассмотренном диапазоне составляет 0,75–1 % по массе.

С точки зрения авторов, наиболее эффективной из рассмотренных ими пластифицирующих добавок является добавка Melflux 2651F, которая как раз и используется в настоящем исследовании. Ее введение в количестве 0,75–1 % по массе по сравнению с контрольными составами без введения добавок позволяет снизить нормальную густоту ГЦПВ на 25–26 %, повысить прочность при сжатии приблизительно в 2,5 раза, а коэффициент размягчения – с 0,72 до 0,88–0,9 (отвечающий требованиям, предъявляемым к водостойким вяжущим), благодаря образованию более плотной структуры искусственного камня, что коррелирует с повышением плотности и снижением водопоглощения образцов.

Выводы и заключение

1. Показано, что введение в состав смеси на основе гипсового вяжущего такой добавки, как Melflux 2651F, приводит к повышению прочности, а также существенному водоредуцирующему эффекту.

2. Выявлено, что использование отхода очистки воды позволяет корректировать плотность смеси (при этом незначительно снижается прочность). Кроме того, введение такой добавки дает возможность с пользой применять отходы.

3. Полученные данные показывают необходимость проведения дальнейших исследований в этом направлении и потребность в разработке состава с дополнительными добавками для регулирования сроков схватывания и пластичности смеси.

Выполненные предварительные лабораторные испытания исследуемого состава на основе гипсового вяжущего и органоминерального комплекса добавок позволяют сделать вывод о том, что применение Melflux 2651F и отхода очистки воды способствует получению хороших показателей физико-механических свойств смеси.

Библиографический список

1. Локтионова М.Д., Потапова Е.Н. Свойства композиционных гипсовых вяжущих // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34. № 5 (228). С. 50–52.

2. Влияние химической природы пластификаторов на свойства гипсового теста и камня / В.Г. Хозин [и др.] // Строительные материалы. 2019. № 10. С. 35–39.

3. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р. Роль активных минеральных добавок природного происхождения в формировании структуры и свойств гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 6. С. 60–63.

4. Манушина А.С., Зырянов М.С., Потапова Е.Н. Влияние вида метакАОлина на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31. № 3. С. 63–65.

5. Манушина А.С., Ахметжанов А.М., Потапова Е.Н. Влияние добавок на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Успехи в химии и химической технологии. 2015. Т. XXIX. № 7. С. 59–61.

6. Потапова Е.Н., Исаева И.В. Повышение водостойкости гипсового вяжущего // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 20–22.

7. Багдасаров А.С., Нестеренко А.И. Использование отходов промышленности для производства шлако-известково-гипсового вяжущего // Инженерный вестник Дона. 2020. № 3. С. 20.

8. Халиуллин М.И., Рахимов Р.З., Гайфуллин А.Р. Штукатурные сухие смеси на основе композиционного гипсового вяжущего повышенной водостойкости // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 1 (31). С. 103–159.

9. Влияние пластифицирующих добавок на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего / М.И. Нуриев [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. 2015. Т. 29. № 7. С. 59–61.

10. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Гиперпластификаторы «Melflux» для сухих строительных смесей и бетонов // Строительные материалы. 2010. № 3. С. 38–39.

INFLUENCE OF THE ORGANOMINERAL COMPLEX OF ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF DRY MIXTURE BASED ON GYPSUM BINDER

A.V. Balaeva, V.B. Petropavlovskaya

***Abstract.** The influence of active mineral additives on the properties of a gypsum binder is shown, the properties of gypsum mixtures, the main physical and mechanical characteristics have been investigated. The results of studies by various authors on the effect of modifying additives, leading to a significant increase in the strength characteristics and water resistance of the gypsum binder, are analyzed. New experimental results are presented, showing that the use of the optimal content of metakaolin as an active mineral additive makes it possible to control the formation of the microstructure and properties of the stone based on the composite binder, to increase the density and water resistance while maintaining the strength characteristics. It has been established*

that with an optimally selected water-solid ratio, it is possible to obtain a strength close to that of concrete.

Keywords: *gypsum binder, metakaolin, dry building mixture, properties.*

Об авторах:

БАЛАЕВА Анастасия Валерьевна – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: nastya1999tver@mail.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

About the authors:

BALAEVA Anastasia Valerievna – Master Student of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: nastya1999tver@mail.ru

PETROPAVLOVSKAYA Victoria Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

УДК 691.327: 666.972

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГАЗОБЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

В.В. Белов, Р.А. Али

© Белов В.В., Али Р.А., 2022

***Аннотация.** Показана возможность приготовления неавтоклавнога газобетона с использованием техногенных пылевидных базальтовых отходов, которые образуются в ходе дробления базальта при производстве минераловатных изделий и осаждаются в электро-фильтрах, а также с применением волокнистых базальтовых отходов (ВБО). Пылевидные базальтовые отходы, представляющие собой порошок с удельной поверхностью 376 м²/кг, использовались в качестве минерального микронаполнителя. Волокнистые базальтовые отходы применялись в качестве дисперсно-армирующего компонента газобетона. Указано, что при введении ВБО в газобетон повышается его прочность и уменьшается трещинообразование благодаря их хорошему сцеплению с*

цементным камнем и волокнистой структуре. Установлено, что введение в бетон в оптимальном количестве базальтовых отходов способствует повышению эксплуатационных свойств газобетона неавтоклавно твердения. На основе результатов исследования микроструктуры образцов газобетона показано, что прочность и трещиностойкость материала повышаются вследствие улучшения структуры межпоровых перегородок газобетона.

Ключевые слова: газобетон неавтоклавно твердения, эксплуатационные свойства, техногенные пылевидные и волокнистые базальтовые отходы, микронаполнитель, дисперсно-армирующий компонент, химические добавки.

Способы снижения плотности газобетона

На сегодняшний день в России, как и во всем мире, прослеживается тенденция к энергосбережению. В связи с этим введенные требования к уменьшению теплопроводности ограждающих конструкций зданий и сооружений предполагают расширение номенклатуры высококачественных теплоизоляционных материалов, а также разработку новых технологий производства высокоэффективных газобетонов, поскольку большинство известных технологий основано на использовании дорогостоящего сырья (известки, портландцемента, молотого кварцевого песка и др.), что приводит к росту стоимости получаемого строительного материала [1–3]. Различают особо легкие (теплоизоляционные) бетоны, плотность которых в высушенном состоянии составляет менее 600 кг/м^3 , и легкие бетоны с плотностью от 600 до $2\ 000 \text{ кг/м}^3$. Прочность легких бетонов варьируется в значительных пределах (от $2,5$ до 30 МПа и выше).

Среди легких бетонов выделяют конструктивно-теплоизоляционные, плотность которых составляет $600\text{--}1\ 400 \text{ кг/м}^3$, а прочность – $2\text{--}10 \text{ МПа}$, и конструкционные с плотностью $1\ 400\text{--}2\ 000 \text{ кг/м}^3$ и прочностью 30 МПа . В поризованных легких бетонах растворную часть вспучивают с помощью газо- или пенообразователей. Среди искусственных пористых заполнителей наиболее эффективным по-прежнему считается керамзитовый гравий. Причин тому несколько: дешевизна и доступность, высокая пористость и оптимальная структура гранул [4]. В строительстве применяют в основном легкие бетоны с крупнопористым заполнителем диаметром до $20\text{--}40 \text{ мм}$, в меньшей степени используются мелкозернистые легкие бетоны. При увеличении содержания легкого заполнителя понижается его плотность, что приводит к повышению теплозащитных свойств легкого бетона, т. е. его теплофизические свойства улучшаются. Однако прочность бетона при этом уменьшается. В связи с этим нужно определять такое оптимальное соотношение свойств сырьевых материалов и выбирать состав бетона так, чтобы его физико-механические и

эксплуатационные характеристики достигались при минимально возможном расходе цемента [5].

Решение указанной проблемы включает в себя использование минеральных отходов в производстве неавтоклавных ячеистых бетонов. Это обеспечит производство доступным и частично уже подготовленным сырьем, позволит существенно экономить сырьевые и энергетические ресурсы и сокращать капитальные вложения [6, 7]. В приготовленную в виде состава сухую строительную смесь добавляют требуемое количество жидкого компонента, перемешивают, заливают в форму и таким способом получают в сжатые сроки качественный газобетон. При этом неавтоклавные газобетоны имеют нестабильную пористую структуру, невысокие строительно-технические свойства и повышенную влажностную усадку [8]. Скорректировать указанные недостатки можно путем армирования газобетона волокнистыми добавками [9, 10].

Для интенсификации процесса газовыделения в цементно-песчаную газобетонную смесь необходимо дополнительно вводить щелочь в виде извести или каустической соды (NaOH). При этом расход цемента для обеспечения требуемой прочности обычно находится на уровне 350 кг/м³ и более, что повышает себестоимость продукции и объем перерабатываемых материалов. Кроме того, более плотный газобетон имеет худшие теплозащитные свойства, в связи с чем толщину стены необходимо увеличивать до 70–75 см для получения ее одинакового термического сопротивления (при использовании газобетона плотностью 500 кг/м³ толщина стены составляет около 50 см). Помимо указанных недостатков цементно-песчаной смеси, эта технология плоха еще и тем, что свойства производимого на местах материала колеблются в недопустимых пределах. Исследования последних 10 лет показывают, что наиболее качественный и экономичный газобетон получается при производстве с применением высококальциевых зол ТЭЦ, поскольку зола, подобно портландцементам, обладает высокой дисперсностью и вяжущими свойствами, т. е. способна самостоятельно твердеть после затворения ее водой. При этом применение зол и химических добавок способствует повышению ранней и поздней прочности и уменьшению плотности газобетона [11]. В состав предлагаемой сухой смеси для изготовления газобетона входят цемент (или цемент и наполнитель), вода и сухой газообразователь. За счет такого сочетания можно добиться оптимальных значений прочности, а также снизить среднюю плотность [8].

В то же время свободная известь, содержащаяся в золе, вызывает деструктивные явления в газобетоне. Для того чтобы предотвратить возникновение строительных дефектов, а также интенсифицировать процессы газовыделения и набора прочности, следует применять добавки, способные вступать в реакции с составляющими золоцементной композиции с образованием едкого натра (NaOH) и структурно-активных

AFt- и AFm-фаз. Недорогие и доступные добавки такого типа используются повсеместно: NaCl и Na₂S₂O₄. Разработана технология получения углерод-кремнеземистой нанодисперсной добавки на основе шунгита [11].

В настоящее время в России изготовление газобетона марок по плотности D350–D400 составляет не менее трети от общего объема производства [14]. Разработка и применение систем программного расчета оптимального состава крайне необходимы в заводской практике для нейтрализации негативного влияния нестабильного качества сырьевых материалов на технологию и свойства ячеистого бетона [12–14]. В теплоизоляционном пенобетоне получена плотность 250 кг/м³ путем применения мелкозернистых песков и полимерной микрофибры и обработки поверхности изделий специальными полимерными составами [15, 16].

Размер пор цементного камня преимущественно составляет 1–2 мкм, лишь отдельные поры имеют один из линейных размеров до 10 мкм. Зерна и поры представленных размеров обеспечивают высокие прочностные характеристики и высокую морозостойкость материала [17].

Теплоизоляционные свойства ячеистого бетона в сухом состоянии зависят в первую очередь от плотности материала. На рис. 1 приведен обобщенный график зависимости теплопроводности от плотности [18–20].

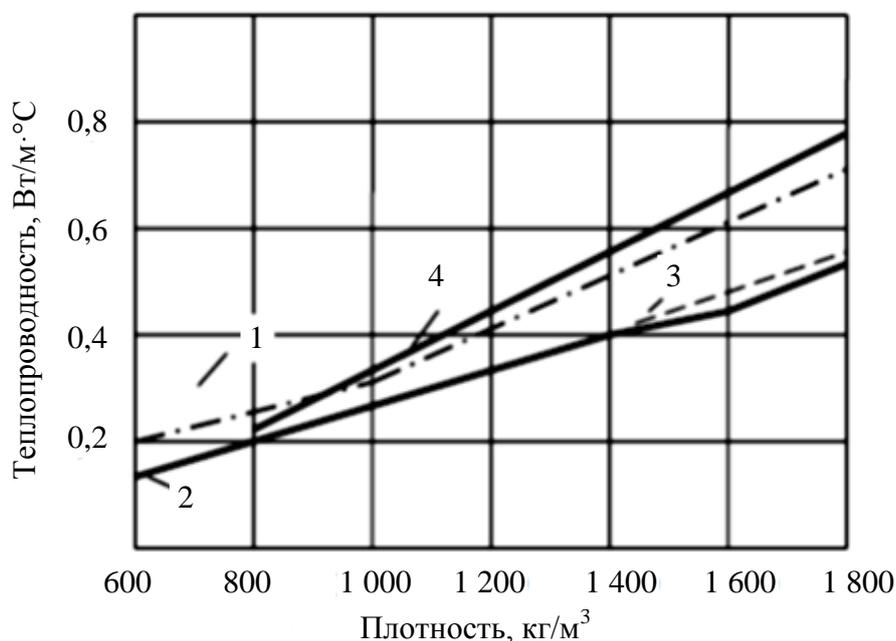


Рис. 1. Зависимость теплопроводности легких бетонов от плотности:
1 – керамзитобетон; 2 – перлитобетон;
3 – шлакобетон; 4 – аглопоритобетон

В табл. 1 приведены физико-механические характеристики материала межпоровых перегородок по данным [18–20].

Таблица 1

Физико-механические характеристики материала межпоровых перегородок на основе разных видов наполнителя

Вид наполнителя	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте, сут				В/Т
	4	7	14	28	
Доменный шлак	21	24,1	30,6	44,2	0,27
Зола-унос	19,1	32,8	37,8	48,6	0,26
Песок	19,5	22,8	29,8	37,8	0,28
Известняк	19,2	25,7	32,6	36,9	0,29

Примечание. Количество наполнителя составляет 50 % от массы цемента.

Основные преимущества керамзитобетона рассмотрены в статье [18]. По звуко- и теплоизоляционным свойствам, химической стойкости и водонепроницаемости керамзитобетон не только не уступает традиционным легким бетонам, но и намного превосходит их. В обиходе блоки из керамзитобетона нередко называют биоблоками, так как они выполняются из экологически чистых природных компонентов. Изделия из керамзитобетона используют для возведения несущих конструкций в промышленном и гражданском жилищном строительстве.

Современные способы уменьшения усадки композитов

В источнике [21] решены задачи повышения прочности газобетонов, твердеющих в естественных условиях; сокращения времени поризации растворной смеси; снижения усадки при высыхании газобетона, устранения усадочных явлений при его формовании и выдержке; снижения сорбционной влажности и водопоглощения; использования более доступных и дешевых сырьевых материалов.

По сравнению с прототипом, который интенсивно поглощает влагу и во влажном состоянии теряет до 60 % прочности на сжатие, а при высыхании имеет усадку 2,6 мм/м с образованием усадочных трещин, предложенный состав не дает усадки при формовании, имеет минимальную усадку при высыхании и характеризуется максимальной прочностью на сжатие. При его применении значительно сократилось время поризации и снизились показатели водопоглощения [22].

Расчеты, выполненные с использованием данного метода, позволили впервые получить сведения об особенностях и характере развития собственных напряжений, связанных с изменениями влажности и степени

карбонизации бетона в наружных слоях стеновых панелей, а также определить с учетом влияния ползучести предельные суммарные значения этих напряжений, при которых на поверхностях панелей могут образовываться усадочные трещины, и установить ширину и глубину последних. На этой основе могут быть разработаны технологические и конструктивные мероприятия, направленные на повышение долговечности ячеистобетонных изделий [23].

Влажностная усадка является важнейшим и проблемным свойством современных бетонов модифицированной структуры, снижающим их качество. В работе [9] показано, что добавка-суперпластификатор – основной компонент модификатора структуры бетона, способствует возрастанию усадочных явлений. Определены особенности структуры и состава применяемых в настоящее время добавок-пластификаторов.

Интересные выводы сделаны в статье [24]: усадка мелкозернистого песчаного бетона, изготовленного (по ГОСТ 310.4-81) из смесей нормальной консистенции ($V/C = 0,4$), через три месяца в 1,6–1,7 раза (а через пять месяцев – в 1,9–2 раза) выше по сравнению с усадкой в возрасте 28 сут. Такие материалы могут быть использованы для изготовления изделий из мелкозернистого бетона как в строительстве жилых помещений, так и в промышленном строительстве. Мелкозернистый бетон содержит портландцемент, глауконитовый песок и воду. В качестве наполнителя используется молотый глауконитовый песок с удельной поверхностью $S_{уд} = 350 \text{ м}^2/\text{кг}$, в качестве добавки – суперпластификатор С-3 при соотношении компонентов, масс. %: портландцемент – 18,0–19,04; глауконитовый песок – 68,1–68,9; наполнитель – 1,0–2,0; суперпластификатор С-3 – 0,1–0,2; вода – 11,0–11,7 [25].

Эффективность новой пластифицирующей добавки [26] по предложенному способу оценивалась на основе ГОСТ 30459-2003 «Добавки для бетонов и строительных растворов». Образцы мелкозернистого бетона (цементно-песчаного раствора) изготавливались и испытывались в соответствии с ГОСТ 10180 и ГОСТ 310.1-310.4. Применение предлагаемой добавки дает эффект, проявляющийся в реологии бетонных смесей, а также в улучшении ряда физико-механических показателей бетона по сравнению с контрольными (бездобавочными) составами, а также в сравнении с прототипами. Предлагаемая добавка синтезируется на основе отходов производства, что позволяет одновременно решать несколько задач:

техническую – повышаются подвижность, жизнеспособность, прочность (особенно при тепловлажностной обработке), морозостойкость; уменьшается деформация усадки;

экономическую – уменьшаются стоимость добавки и расход цемента;

экологическую – данный отход утилизируется путем захоронения на спецполигонах.

Основным фактором повышения прочности является снижение В/Ц. При водоредуцировании бетона введенным суперпластификатором (СП-1) объем цементного камня уменьшается. Таким образом, оптимальная дозировка СП-1 при водоредуцировании может быть несколько большей, чем при пластификации. В случае введения в состав бетонной смеси аналогичного суперпластификатора С-3 в количестве 0,25–1,0 % от массы цемента при постоянном В/Ц = 0,27 прочность полученного материала может быть как выше, так и ниже, чем у контрольного состава [27–31]. Чтобы получить оптимальный состав [32], в состав добавки для бетонной смеси вводили последрождевую барду (рН $5,56 \pm 0,51$, содержание сухих веществ $4,5 \pm 0,5$ масс. %, плотность $1,016 \text{ г/см}^3$) и модификатор (фтористый натрий, 30%-ю перекись водорода и высокоактивную минеральную добавку (микрокремнезем) с удельной поверхностью $S_{\text{уд}} = 2\,000 \text{ м}^2/\text{кг}$) при их определенном весовом соотношении (рис. 2).

Последрождевая барда	88,98–91,20
Фтористый натрий	0,40–0,50
30%-я перекись водорода	0,4–0,50
Микрокремнезем	8,00–10,02

Рис. 2. Состав добавки для бетонной смеси, масс. % [35]

При добавлении вышеуказанного модификатора в бетонную смесь гидратационная активность цемента по каталитическому механизму действия возрастает вследствие смещения кислотно-основного равновесия в процессе твердения системы и возникающей разности показателей кислотности ΔpH [33]. Использование данной добавки вызывает изменения в структуре искусственного камня, что обеспечивает возможность разработки высокоэффективных составов бетона, характеризующихся повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Введение модификатора повышает прочность бетона при изгибе на 67 % в возрасте 3 сут и на 43 % в возрасте 28 сут, существенно повышает водонепроницаемость и снижает усадку на 23 %.

При введении гипса в состав газобетонной смеси усадка уменьшается незначительно, однако из-за продолжительного времени достижения распалубочной прочности плотность и прочность верхних и нижних слоев различаются. Получаемый газобетон позволяет добиться однородности по высоте заливки, при этом повышаются и другие показатели (сокращается технологический цикл, отсутствует усадка). Однако использование автоклавной технологии усложняет процесс производства газобетона, делает его высокоэнергозатратным и, соответственно, приводит к существенному снижению технико-экономических

показателей [34]. Результаты исследований также показывают, что, например, фосфогипс может применяться не только как наполнитель, но и как активатор твердения [38].

По результатам исследования влияния подвижности растворной смеси на линейные деформации цементного камня установлено, что для безусадочного твердения стяжки с подвижностью ПК2 содержание $\text{CaO}_{\text{своб}}$ в золе должно составлять более 3,5 %, при этом достигается компенсирующее усадку линейное расширение от 0,5 до 1,5 мм/м [36].

При дисперсном армировании с использованием полипропиленовой фибры усадка в возрасте 28 сут для материала плотностью 125 и 150 кг/м³ уменьшается на 16 и 20,2 % соответственно [37–41]. При этом одними из важнейших характеристик, определяющих многие физико-механические свойства ячеистого бетона, по-прежнему являются его плотность и пористость [42].

Структурообразование ячеистых бетонов с химическими и минеральными добавками

Газообразователи представляют собой вещества, применяемые для создания в теле бетона мелких воздушных или других равномерно распределенных газообразных пор [43]. Чтобы улучшить свойства бетона, используют различные тонкомолотые добавки, вводимые в количестве 5–20 % и более от массы цемента. Использование добавок для снижения материалоемкости и уменьшения массы строительных конструкций без потери их несущей способности и прочих эксплуатационных свойств – один из основных факторов повышения экономической эффективности строительства. При этом общепринятая классификация добавок к цементам и бетонам отсутствует. В разных странах разработаны свои классификаторы.

Обычно в большинстве классификаций добавок к бетонам на первом месте стоят пластификаторы, что обусловлено их эффективностью, отсутствием негативного воздействия на бетон и арматуру, а также невысокой стоимостью и доступностью [44]. Из суперпластификаторов наибольшее распространение получили лигносульфонаты – отходы целлюлозно-бумажного производства. При добавлении суперпластификатора в состав бетонной смеси В/Ц может быть уменьшено, что позволяет снизить водоотделение и усадочные процессы, повысить водонепроницаемость бетона и уплотнить капиллярно-пористую структуру цементного камня. Увеличение подвижности смеси при неизменном составе бетона не влечет за собой возрастания его водонепроницаемости [27–31, 44, 45].

Результаты опытов показывают, что суперпластификатор С-3 выполняет структурообразующую функцию, улучшая уплотняемость формовочных смесей [27–29, 46–48]. Увеличение подвижности бетонной

смеси до низкого значения вязкости является основой получения высоких водоредуцирующих эффектов. По равновеликим распльвам различных пластифицированных и непластифицированных суспензий цемента и отдельных смесей водоредуцирующие эффекты $V_{эф}$ рассчитываются по формуле

$$V_{эф} = (В/Ц)_{н} / (В/Ц)_{п},$$

где $(В/Ц)_{н}$, $(В/Ц)_{п}$ – водоцементное отношение непластифицированных и пластифицированных суспензий соответственно.

Введение в исходное цементное тесто пластификатора С-3 позволяет увеличить прочность исходного цементного камня почти в 1,5 раза. Такой результат был достигнут при введении в цементное тесто пластификатора в количестве 1 %. При уменьшении расхода пластифицирующей добавки до 0,5 % ее влияние на прочность цементного камня остается существенным [46, 49].

Противоморозную добавку следует выбирать с учетом условий внешней среды, вещественного и химико-минералогического состава цемента и вида заполнителя. Ее можно комбинировать с другими добавками: газообразующими, воздухововлекающими, пластифицирующими и суперпластификаторами [50].

В соответствии с данными источников [27, 29, 51, 52] эффективным пластификатором является Melflux 1641 F. Он используется в качестве высокоэффективного диспергатора, обладает выраженным водоредуцирующим эффектом, снижает усадку бетона и раствора [50]. Дозировка составляет 0,05–0,5 % от массы вяжущего [44, 53]. Гиперпластификатор Melflux 5581 является эффективным разжижителем [27–29], в том числе для неавтоклавного газобетона [54].

По данным источников [9, 55–58], требования к долговечности бетона, реологическим свойствам цементных растворов обусловлены потребностью в высококачественных материалах и изделиях, характеризующихся повышенной прочностью и износостойкостью. Согласно статье [59], самую низкую водопотребность (23–29 %) имеют среднеалюминатные клинкерные цементы или составы с минеральными добавками низкой гидравлической активности [44]. Наилучший эффект достигается при введении суперпластификатора в количестве 0,5–0,7 % от массы цемента; жесткость смесей при этом снижается с 40 до 14–17 с. В случае введения в бетон пластифицирующих добавок при постоянном расходе цемента и равноподвижности бетонной смеси можно уменьшить водоцементное отношение. При добавлении газообразователя бетон приобретает повышенную прочность на растяжение, водонепроницаемость, морозостойкость и долговечность, в частности стойкость к солям, попеременному увлажнению и высушиванию [43, 59]. Однако при этом приходится решать проблему обеспечения достаточных связующих

свойств между цементной матрицей и волокнами в дисперсно-армированных композитах. Для оценки этих свойств в соответствии с ориентацией волокна в статье [60] проводились испытания на разрыв волокнистого материала.

Гидрофобизирующие добавки (поверхностно-активные вещества (ПАВ)) позволяют улучшить физико-механические и эксплуатационные свойства газобетона за счет стойкости к агрессивным веществам в окружающей среде [41]. В процессе тепловлажностной обработки бетон с гидрофобизирующими добавками (например, с добавлением мылонафта) приобретает более высокую прочность, чем бетон с теми же характеристиками, но без добавок [42, 46, 60]. Эффективность гидрофобизирующей добавки связана с уменьшением водопоглощения бетона [61–63]. Эффективность газообразующих и воздухововлекающих добавок оценивают по увеличению морозостойкости по сравнению с бетоном контрольного состава, используя средства испытания и вспомогательные устройства согласно действующим стандартам [43, 64].

При проектировании теплоизоляционно-конструкционных бетонов с улучшенными физико-механическими характеристиками для формирования монолитной контактной зоны между активным гранулированным заполнителем и цементной матрицей получен бетон на основе гранулированного заполнителя из различных типов кремнеземсодержащего сырья с прочностью 10–15 МПа, плотностью 1 000–1 200 кг/м³ [65]. По данным работы [9], при введении в цементный раствор наночастиц улучшается структура цементного камня и повышается его трещиностойкость. В составе газобетонной смеси нанотрубки выступают как центры кристаллообразования, но они имеют протяженную, а не точечную форму, поэтому кристаллы получаются также вытянутой формы. Микроструктура полученных кристаллических новообразований приведена на рис. 3.

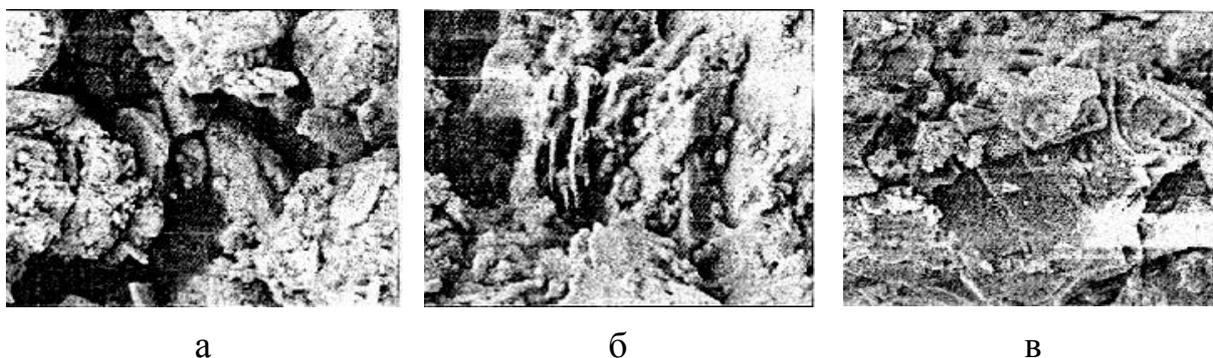


Рис. 3. Микроструктура кристаллических новообразований: без введения углеродных многослойных нанотрубок (а); с углеродными нанотрубками (б, в) [65]

Известно [67], что прочность ячеистого бетона зависит от прочности межпоровых перегородок, причем для достижения необходимого качества она должна составлять не менее 30 МПа. Определялись физико-механические характеристики материала перегородок, полученного на основе портландцемента и наполнителей. Установлено, что образцы на основе шлака и золы характеризуются наивысшей прочностью. Наиболее интенсивный рост наблюдается в более отдаленные сроки твердения.

Существуют различные способы повышения плотности и, соответственно, прочности газобетона. Одним из них является рациональная упаковка частиц наполнителя [68], причем наибольшая компактность упаковки достигается при использовании полидисперсного наполнителя. Так, экспериментально установлено, что при введении золы-уноса и молотого шлака в соотношении 1:1 прочность цемента повышается на 40 % по сравнению с составом на одном виде наполнителя [69]. Введение 40 % доменного шлака (крупнодисперсного компонента) и 10 % микрокремнезема (высокодисперсного компонента) позволяет добиться максимальной прочности цементного камня.

Микрокремнезем используется не только в качестве наполнителя, но и в качестве гидравлически активной минеральной добавки [70]. В результате высокой поверхностной активности компонентов соответствующей дисперсности и большой энергии их взаимодействия в водной среде выделяется значительное количество тепла и уплотняется структура цементного камня [71].

Было также отмечено, что усадка уменьшилась при использовании доменного шлака [72].

Применение сухих тонкозернисто-порошковых смесей для получения всех видов бетонов нового поколения (реакционно-порошковых, порошково-активированных песчаных и порошково-активированных щебеночных) позволяет повысить прочность бетонов и снизить удельный расход цемента на единицу прочности [73, 74].

В качестве заменителя цемента использовался глинистый минерал. Физико-механические свойства полученных материалов были протестированы по показателям объемной плотности, пористости, теплопроводности и прочности на сжатие готового продукта [73]. Использование в качестве щелочного активатора NaOH показало более высокую эффективность по сравнению с использованием KOH, что, вероятно, объясняется более выгодными условиями для полимеризации алюмосиликатного геля, складывающимися при участии атомов Na^+ , а не более крупных ионов K^+ , а также оптимальным сочетанием очередности и интенсивности протекания химических процессов в щелоче-алюмосиликатной системе [74]. Известно, что свежееобразованные поверхности минеральных материалов имеют существенно более высокие

значения поверхностного натяжения, чем и определяется их высокая адгезионная активность [75, 76].

Опыт использования пылевидных отходов дробления в производстве строительных материалов

К минеральным строительным материалам с высокими теплоизоляционными свойствами относится ячеистый газобетон неавтоклавного твердения [77, 78]. Основные проблемы при получении неавтоклавного газобетона связаны с его низкими прочностью и трещиностойкостью. Повышению прочностных характеристик и улучшению структуры газобетона способствует применение наполнителей из природного сырья, обладающих реакционно-химической активностью, наряду с суперпластификаторами [79, 80]. Компактная упаковка частиц наполнителя с оптимальной гранулометрией обеспечивает повышение прочности материала [78–82].

При использовании промышленных отходов можно получать высококачественные и экологически чистые ячеистые бетоны с низкой себестоимостью. Их производство станет более прибыльным и позволит эффективнее решать проблему строительства доступного жилья [83, 84]. При получении газобетонных стеновых камней на основе отходов дробления средней плотностью $650\text{--}750\text{ кг/м}^3$ с оптимальной структурой уменьшаются усадочные деформации [85]. Для уменьшения усадки применяется отношение известняка к цементу, которое больше, чем единица [86]. Снижение усадочных деформаций с увеличением содержания заменяющих цемент добавок можно объяснить уменьшением количества цементного клинкера [87, 88].

Таким образом, введение в состав бетонной смеси промышленных отходов позволяет решить сразу несколько задач: техническую (увеличения подвижности, прочности, особенно при тепловлажностной обработке; повышения морозостойкости, долговечности; снижения усадочных деформаций); экономическую (сокращения расхода цемента); экологическую (данные виды отходов утилизируются путем захоронения на спецполигонах) [89, 90]. Результаты исследования [91] показывают, что при введении основных минералов (CSH-геля и тоберморита) предел прочности на сжатие повышается, поскольку улучшается взаимосвязанная микроструктура. Экспериментально исследовано добавление полипропилена, углерода, базальтовых и стеклянных волокон, изменение значения теплопроводности, прочности на сжатие и прочности на изгиб ячеистого бетона, который используется при производстве стеновых элементов здания [92].

Высокие значения pH необходимы, чтобы избежать чрезмерного выщелачивания и сульфатной коррозии [93]. Результаты опытно-промышленных испытаний показали, что предложенные технические

решения позволяют существенно улучшить строительные-технические свойства ячеистого бетона, обеспечивая его конкурентоспособность на рынке строительных материалов [78, 94].

Одно из актуальных направлений решения проблем ресурсо- и энергосбережения связано с применением минеральных добавок, а также соблюдением экологических норм при производстве и применении строительных материалов [95]. Установлено, что использование отходов теплоэнергетики, а именно золы-уноса ТЭЦ в качестве наполнителя в поливинилхлоридной композиции, улучшает механические характеристики материала и положительно влияет на свойства [96]. Рассматривается возможность применения в качестве добавки в строительные композиты отходов производства цементно-стружечных плит [97].

Использование измельченных отходов стекла в бетоне – важный шаг на пути развития устойчивых, экологических и энергоэффективных технологий и создания конкретных систем, основанных на экономической инфраструктуре [98]. Результаты испытаний теплопроводности [99] показали, что зола на основе кремнеземистого состава имеет лучшую теплопроводность, чем песок, при их одинаковой плотности. Использование этих и других аналогичных компонентов в производстве ячеистых бетонов позволяет сокращать затраты энергии и контролировать процесс прохождения влажности через ограничивающие конструкции [100]. При введении отходов перлита до 10 % по массе теплопроводность уменьшается примерно на 15 % без существенного снижения прочности на сжатие. Дальнейшее увеличение количества вводимых отходов (до 30 %) приводит к повышению теплопроводности, но прочность на сжатие при этом снижается примерно на 20 % [101]. У бетонных образцов с активными нанокремнеземсодержащими материалами уменьшается водопоглощение и повышается водостойкость [102]. Применяются и натуральные материалы (например, пемза), которые имеют практически такую же пористую характеристику, что и ячеистый бетон [103].

Результаты экспериментов позволяют предположить, что структура неавтоклавного бетона, содержащего суперпластификатор СП-1, более стабильна, чем структура материалов без этой добавки [104].

Исследовано влияние на свойства прочности комплексной добавки, состоящей из непрерывных базальтовых волокон и SiO_2 микропыли [105]. Комплексная добавка представляет собой промышленные отходы, которые способствуют улучшению свойств бетона и портландцемента [106].

Для наиболее эффективного управления свойствами композитов с добавлением промышленных отходов необходима разработка многокомпонентных составов с использованием модифицирующих добавок [107]. Поскольку минеральные отходы являются малоопасными веществами, которые не наносят ущерба окружающей среде, их можно применять в качестве заполнителя в цементных композитах [108].

Опыт использования волокнистых промышленных отходов при изготовлении строительных материалов

Дисперсное армирование газобетона может выполняться с использованием как синтетического, так и стеклянного фиброволокна, при этом синтетическая фибра, в отличие от стеклянной, характеризуется гибкостью и стойкостью к щелочам при гидратации вяжущего, т. е. при приготовлении бетонной смеси сохраняются ее свойства и не разрушаются пленки ПАВ [108–110]. Синтетическая фибра сохраняет форму и размеры после затворения смеси, что позволяет повысить прочность бетона на растяжение и изгиб. При использовании в качестве дисперсного компонента синтетических волокон снижаются усадочные деформации и уменьшается теплопроводность [108]. К таким волокнам, в частности, относятся полиамидные (вискозные, капроновые), получаемые при изготовлении шинного корда. Кордное волокно дешевле нейлонового, полиэтиленового и полипропиленового. Кордные нити длиной от 5 до 10 мм и диаметром до 0,5 мм без особых усилий перемешиваются с бетонной смесью и равномерно распределяются в ее объеме [109].

Применение высокодисперсной базальтовой фибры позволяет увеличить прочность ячеистого бетона при растяжении и его трещиностойкость [84, 119]. Волокнистые базальтовые наполнители способствуют улучшению структуры, повышению физико-механических и эксплуатационных свойств газобетона за счет улучшенной адгезии волокон к цементной матрице, сравнительно высокой прочности волокон на растяжение и их устойчивости по отношению к щелочной среде. Базальтовые волокна отличаются высокой прочностью, сопоставимой с прочностью стеклянного волокна, при этом модуль упругости базальтового волокна на 15–20 % выше, чем у стекловолокна.

Дисперсное армирование бетонных матриц при помощи грубых базальтовых волокон диаметром порядка 100 мкм обеспечивает высокую деформативность газобетона, полученного на основе портландцементов, и улучшение его физико-механических свойств [78–111]. Использование высокодисперсных наполнителей и добавок, различных по природе и фракционному составу, помогает улучшить физико-механические свойства композиционных материалов. Результаты исследований фибробетона показали, что наиболее высокие прочностные характеристики имеют составы с метакаолином, армированные полиакрилонитрильным волокном [115–117].

В статье [118] показано, что дисперсно-армированные образцы обладают более высокими прочностными свойствами по сравнению с неармированными. В результате дисперсного армирования модифицированным базальтовым волокном снижается истираемость раствора [115, 119]. Исследованы физико-механические характеристики дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов с полифункциональными

модифицирующими добавками. Изучено влияние фибры нескольких видов: полипропиленового, мультифиламентного и полиакрилонитрильного синтетического волокна специальной обработки с длиной резки 12 мм, а также влияние модифицированной астраленами базальтовой микрофибры длиной 100–500 мкм [119]. Использование волокнистой структуры способствует уменьшению теплопроводности материала и созданию эффективных утеплителей в стеновых конструкциях [120].

Модификация теплоизоляционного газобетона при помощи многослойных углеродных нанотрубок обеспечивает улучшение структуры и прочностных характеристик полученного материала, способствует повышению его долговечности [121, 122]. Формирование изоляционной оболочки здания опирается на применение эффективных изоляционных материалов и соответствующих им строительных систем [119]. Рассматривается конструкционное применение армированных волокном сэндвич-панелей [117].

Модификация сырьевой смеси дисперсным армированием в количестве 1–3 % от массы цемента приводит к изменению морфологии новообразований [123]. По результатам анализа [124] установленных закономерностей микроструктуры базальтофибробетона определено оптимальное содержание базальтовых волокон – 0,5 % от массы цемента по критерию прироста прочности [125].

Большой интерес представляет получение бетона неавтоклавного твердения, который отличается малой фондоэнергоёмкостью, безотходностью и экологичностью. Экспериментальный состав ячеистого газобетона, полученного с использованием пылевидных базальтовых отходов (ПБО) и волокнистых базальтовых отходов (ВБО), позволяет упрочнить и стабилизировать макроструктуру газобетона, оптимизировать его деформативные свойства, повысить устойчивость газомассы до начала схватывания вяжущего [78, 124, 125]. Базальтовое волокно имеет хорошую адгезию к пуццолану, высокий показатель активности и хорошие свойства межфазного склеивания с цементом [126].

Рассмотрено влияние золы рисовой шелухи на физические, механические и микроструктурные свойства газобетона [127]. Изменения значений теплопроводности, прочности на сжатие и прочности на изгиб ячеистого бетона были экспериментально исследованы путем добавления полипропилена, углерода, базальтового и стеклянного волокон.

Таким образом, анализ опубликованных источников показывает, что прочность ячеистого бетона неавтоклавного твердения во многом зависит от верно подобранного состава бетона, вида наполнителя, примененных высокодисперсных волокнистых наполнителей, технологических решений, обеспечивающих в том числе получение эффективного неавтоклавногазобетона на основе ПБО и ВБО. Использование базальтовых отходов дает возможность значительно сэкономить

энергетические и сырьевые ресурсы (песок, известняк, дисперсно-армирующие добавки) без снижения качества полученного ячеистого бетона и добиться существенного улучшения его деформативных свойств.

Добавление в смесь волокнистых базальтовых материалов в качестве дисперсно-армирующего компонента может повысить прочность, уменьшить трещинообразование и стабилизировать макроструктуру газобетона.

Изложенное определяет сущность рабочей гипотезы данной научной работы: путем варьирования рецептуры сырьевой смеси неавтоклавного газобетона, включающей портландцемент, ПБО, ВБО в качестве армирующего дисперсного компонента, газообразователь и пластификатор, можно получить оптимальные составы для изготовления неавтоклавного газобетона с пониженными усадочными деформациями и экономией расхода цемента.

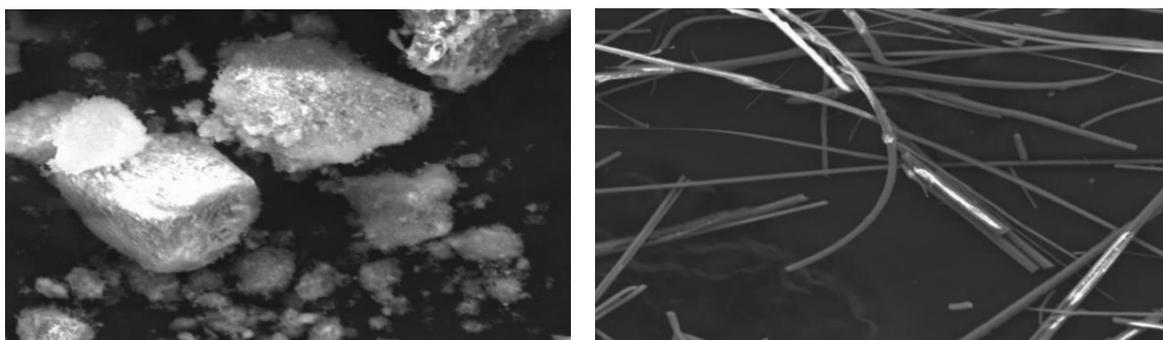
Материалы и методы исследований

В работе использовались конкретные сырьевые материалы. Основным цементом для выполнения научной работы был принят портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н.

В качестве основного микронаполнителя применялись ПБО, в качестве дисперсного армирования – ВБО, которые являются отходами производства минераловатных изделий.

Свойства ПБО: удельная поверхность по Блейну 346 м²/кг; насыпная плотность 780 кг/м³; истинная плотность 2,18 г/см³; гранулометрический состав характеризуется размером частиц от 0,4 до 75 мкм. Волокнистые базальтовые отходы представляют собой волокна толщиной 50–70 мкм, длиной около 4–6 мм, насыпная плотность составляет 190 кг/м³.

Микроструктура ПБО и ВБО представлена на рис. 4.



а б
Рис. 4. Микроструктура ПБО (а) и ВБО (б)

Для сравнения с ПБО в исследованиях применялся молотый кварц (МК) (кварцевый песок) с удельной поверхностью $260 \text{ м}^2/\text{кг}$, истинной плотностью $2,62 \text{ г}/\text{см}^3$. Гранулометрический состав характеризовался размером частиц от 3,07 до 212,6 мкм.

Использовался комплекс химических модифицирующих добавок, в который входил доступный суперпластификатор СП-1, обладающий поверхностно-активными свойствами, что способствовало повышению подвижности бетонных смесей. Для сравнения водоредуцирующего эффекта применялись более современные пластифицирующие добавки – гиперпластификаторы Melflux 1641 и Melflux 5581.

Введение в состав газобетона едкого натра (NaOH) приводит к интенсификации процесса газообразования смеси и уменьшению средней плотности газобетона. Едкий натр эффективно использовать в качестве щелочной добавки взамен гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (известь), который требует предварительной подготовки. В работе применялась алюминиевая пудра марки ПАП-2.

Были описаны методы исследования дисперсного состава, структуры применяемых исходных компонентов, композиционного неавтоклавного газобетона, а также его физико-механических характеристик.

На первом этапе изучался состав модельной смеси (без газообразователя) с использованием цемента, ПБО в качестве наполнителя, а также суперпластификатора «Полипласт СП-1». Переменными факторами являлись соотношение ПБО и цемента по массе ПБО/Ц = 0,25; 0,50; 0,75 ; 1; 1,25; 1,5 и содержание добавки суперпластификатора (рис. 5).

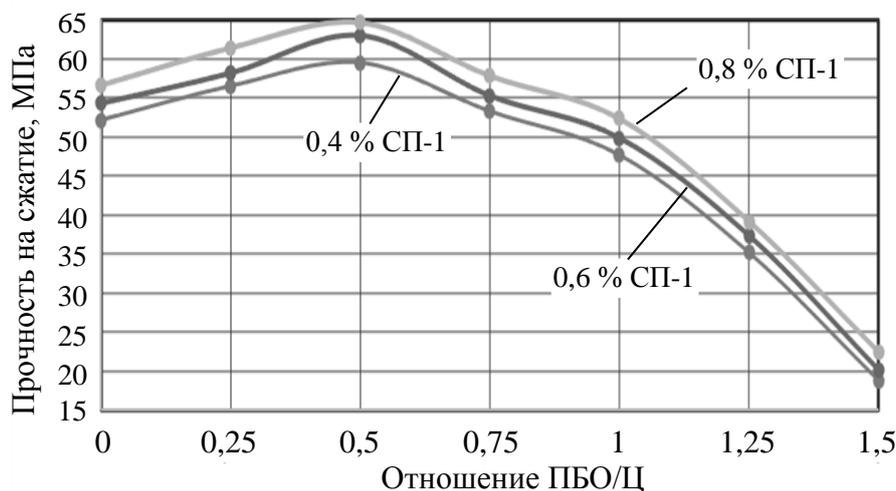


Рис. 5. Зависимости предела прочности на сжатие неспученной матрицы газобетона от соотношения ПБО и цемента по массе и содержания добавки суперпластификатора

Полученные данные позволили установить эффективность ПБО как наполнителя матрицы газобетона, проявляющего активную роль в

формировании микроструктуры материала, а также определить диапазоны варьирования основного рецептурного фактора и добавки суперпластификатора для поиска их оптимальных значений при исследовании составов газобетона.

Для разработки составов композиционного газобетона был проведен четырехфакторный планированный эксперимент на трех уровнях варьирования типа В4 (табл. 2). В качестве факторов варьирования были приняты соотношение ПБО и цемента по массе ПБО/Ц, В/Т-отношение, содержание алюминиевой пудры Al и щелочной добавки (ЩД) NaOH.

Таблица 2

Уровни переменных факторов в планированном эксперименте

Факторы		Уровень варьирования			Интервал варьирования
Натуральные	Кодированные	-1	0	+1	
ПБО/Ц	X ₁	0,50	0,75	1,00	0,25
NaOH (ЩД)	X ₂	0	0,5	1,00	0,50
Al	X ₃	550	600	650	50
В/Т	X ₄	0,62	0,64	0,66	0,02

В качестве примера ниже приведены уравнения регрессии, полученные по результатам планированного эксперимента и отражающие зависимости плотности и прочности на сжатие газобетона от содержания алюминиевой пудры и щелочной добавки, что позволяет оптимизировать эти рецептурные факторы:

$$Y(\rho_{cp}) = F(x_3x_4) = 490,694 - 8,562 4x_3 - 4,336 8x_4 + 5,494 6x_3^2 - 10,505 4x_4^2 + 1,625x_3x_4;$$

$$Y(R_{сж}) = F(x_3x_4) = 1,803 37 - 0,033 9x_3 - 0,086 74x_4 + 0,023 61x_3^2 - 0,008 608x_4^2.$$

Зависимости прочности на сжатие и средней плотности от содержания алюминиевой пудры, В/Т-отношения при постоянном отношении ПБО/Ц и содержании NaOH представлены на рис. 6. В частности, данные показывают, что с увеличением содержания алюминиевой пудры и В/Т-отношения прочность при сжатии и средняя плотность газобетона понижаются, и это согласуется с физикой процесса и литературными данными.

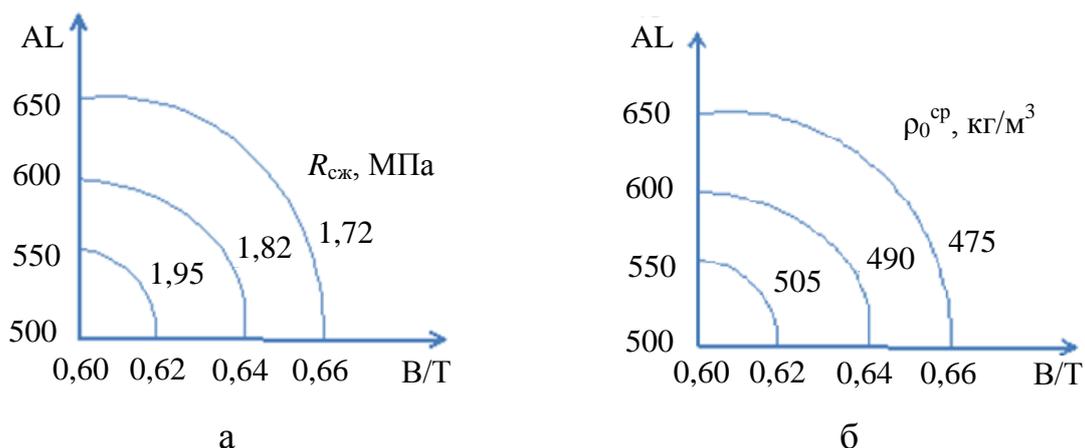


Рис. 6. Зависимости предела прочности на сжатие (а) и средней плотности (б) газобетона от содержания алюминиевой пудры (Al), В/Т-отношения при постоянном отношении ПБО/Ц и содержании NaOH

В дальнейших экспериментах производили подбор составов композиционного газобетона и их оптимизацию с применением ПБО, а также сравнительную оценку и выявление эффективности этого наполнителя в сравнении с традиционным наполнителем газобетона (т. е. с МК) в параллельных составах. При этом предварительные эксперименты на невспученной матрице газобетона показали, что прочность на сжатие композиции с ПБО при отношении ПБО/Ц = 1 выше на 5–10 % по сравнению с газобетоном на основе МК (даже с отношением МК/Ц = 0,75).

В табл. 3 представлены рецептурно-технологические факторы, определяющие возможность получения кондиционных опытных образцов неавтоклавного газобетона с применением как ПБО, так и МК.

Таблица 3

Характеристики газобетонной смеси

№	Отношение наполнителей к цементу	В/Т	Распływ смеси, см	Время вспучивания газобетона, мин	Температура смеси, °С	Горбушка, мм
1	2	3	4	5	6	7
На основе ПБО						
1	0,25	0,55	31	7	41,5	+12
2	0,50	0,57	31	7	40,8	+9
3	0,75	0,59	28,5	13	38,2	+8
4	1,0	0,62	26,5	9	38,0	+5
5	1,25	0,66	28	13	37,5	+7

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
На основе МК						
1	0,25	0,43	28	12	36,8	+3
2	0,50	0,42	30	8	43,3	+9
3	0,75	0,40	29	7	37,6	+6
4	1,0	0,38	27,5	6	36,0	+5
5	1,25	0,42	28	9	38,7	+2

Установлены оптимальные по максимальному пределу прочности на сжатие, минимальной усадке и минимальному расходу цемента соотношения основных компонентов смеси: ПБО/Ц = 1 и МК/Ц = 0,75. Введение ПБО (при соотношении ПБО/Ц = 1) в газобетон по сравнению с контрольным составом с соотношением МК/Ц = 0,75 (рис. 7) не изменяет прочностные показатели газобетона. Таким образом, при использовании ПБО вместо МК появляется возможность снижения расхода цемента до 20 % или до 60 кг на 1 м³ для обычного состава неавтоклавного газобетона.

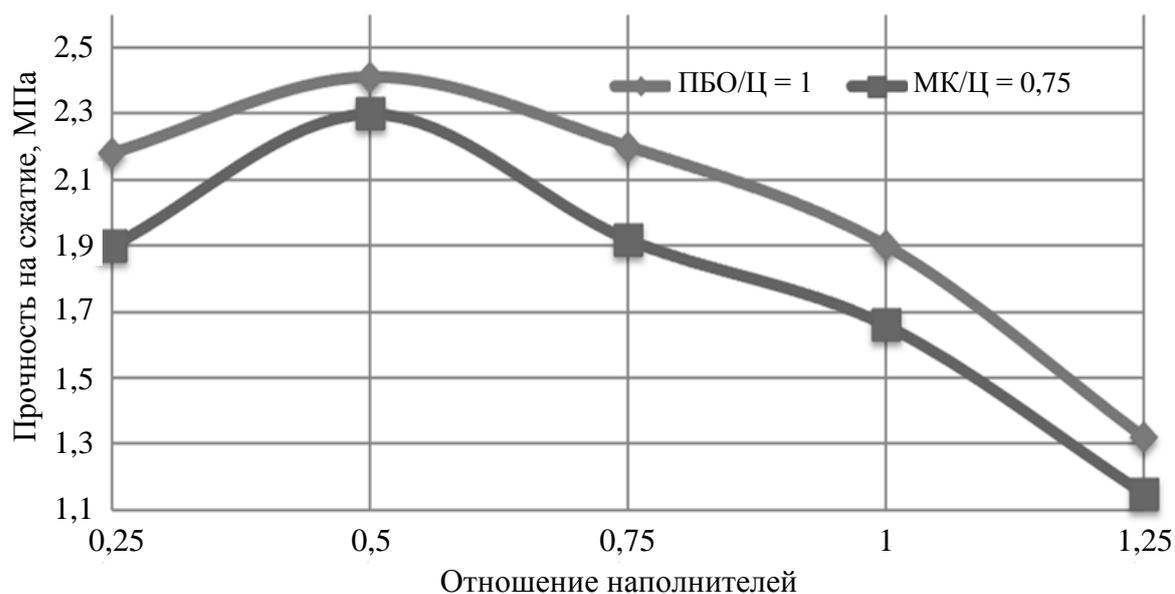


Рис. 7. Зависимости предела прочности на сжатие газобетона от различного отношения ПБО и МК к цементу

В табл. 4 представлены соответствующие оптимальные составы неавтоклавного газобетона.

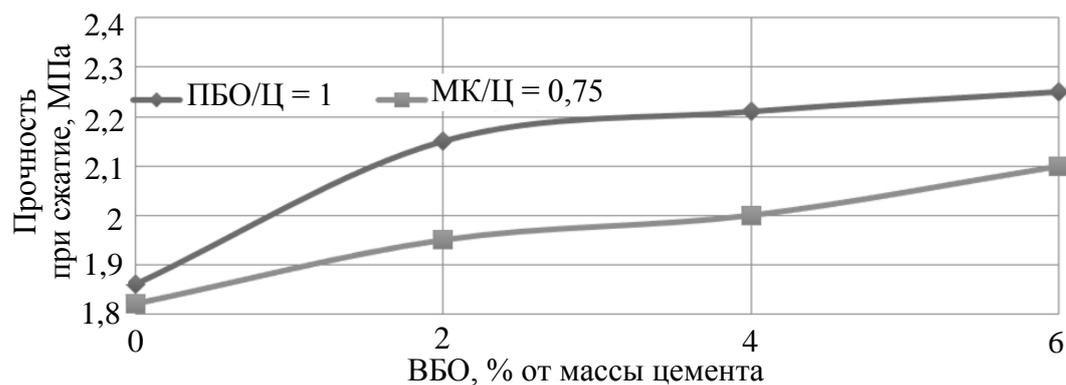
Таблица 4

Оптимальные составы неавтоклавного газобетона

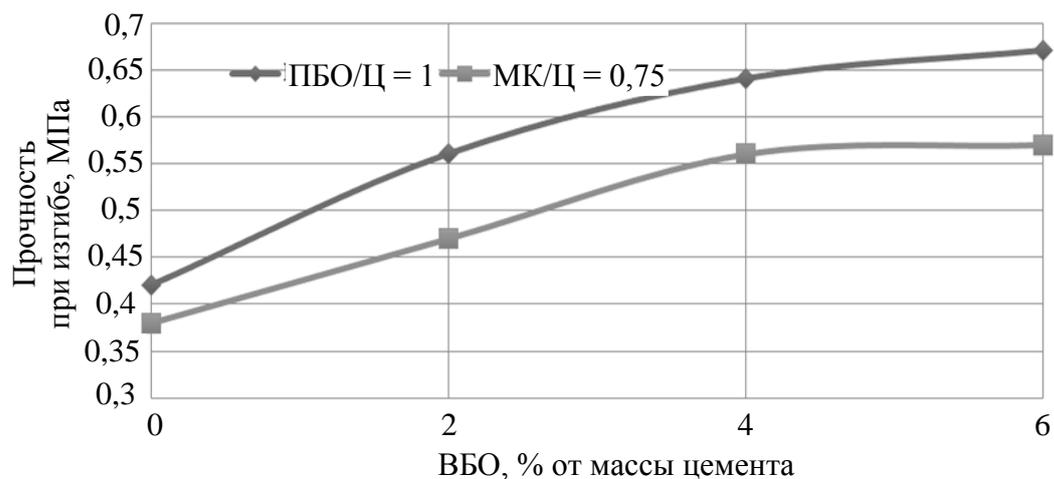
Отношение наполнителей к цементу	Расплав смеси, см	Расход материалов на 1 м ³						Прочность при сжатии, МПа	Средняя плотность, кг/м ³
		Ц, кг	ПБО, кг	СП-1, кг	Вода, л	Алюминиевая пудра, г	NaOH, кг		
На основе ПБО (ПБО/Ц = 1)									
1,0	28	240	240	1,92	307	650	2,40	1,90	492
На основе МК (МК/Ц = 0,75)									
0,75	29	300	180	2,40	200	650	3,00	1,92	525

Для улучшения эксплуатационных свойств композиционного неавтоклавного газобетона, прежде всего снижения усадки и повышения трещиностойкости, было предложено введение в его состав ВБО в качестве дополнительного армирующего компонента. Исследование технологических свойств газобетонной смеси с применением ВБО показало, что при увеличении количества ВБО от 0 до 6 % от массы цемента расстояние от верха формы до горбушки уменьшалось от +9 до –5 мм для D500. Вспучивание смеси заканчивалось через 10–17 мин; при повышении содержания ВБО время вспучивания увеличивалось.

Для определения оптимального содержания ВБО выполняли однофакторный эксперимент с варьированием содержания отходов в интервале от 0 до 6 %. Наибольший предел прочности на сжатие – 2,21 МПа (класс прочности на сжатие В1,5) при ПБО/Ц = 1 и 2,0 МПа при МК/Ц = 0,75 (класс прочности на сжатие В1,5). Он достигается при содержании ВБО в количестве 6 % от массы цемента (см. рис. 5), но в этом случае расстояние от верха формы до горбушки меньше нуля (–2 или –5 мм). Из-за перенасыщения волокном структура газобетона ухудшается. При содержании ВБО 0–4 % от массы цемента прочность на сжатие повышается, а расстояние от верха формы до горбушки больше нуля. При этом введение дисперсно-армирующих ВБО увеличивает предел прочности при сжатии газобетона на 23–25 % (рис. 8а), а предел прочности при изгибе – на 45–50 % (рис. 8б).



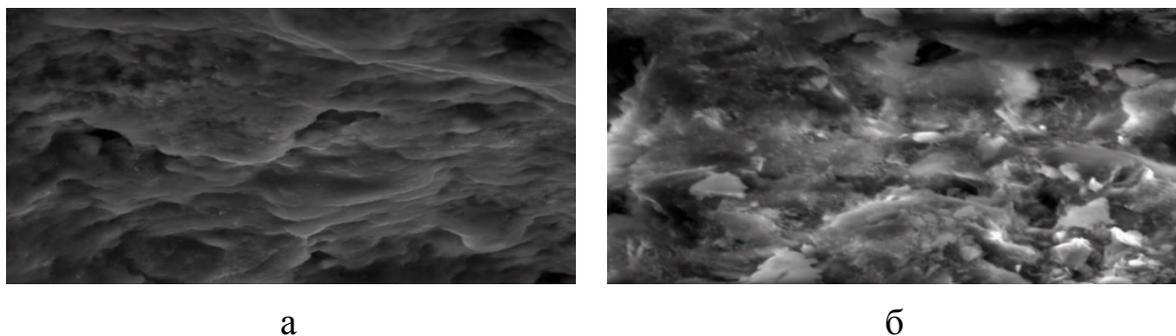
а



б

Рис. 8. Зависимость предела прочности бетона при сжатии (а) и при изгибе (б) от содержания ВБО

Дисперсное армирование неавтоклавного газобетона при применении ВБО способствует улучшению структуры газобетона. При этом самая плотная структура достигается в случае использования состава с содержанием ВБО 4 % от массы цемента (рис. 9).



а

б

Рис. 9. Микроструктура неавтоклавного газобетона состава Ц + ПБО + АІ + ЩД, 4 % ВБО в возрасте 180 сут: $\times 1\ 000$ (а); $\times 3\ 000$ (б)

С использованием термогравиметрии и дифракционного анализа определены фазовые составы композиционного неавтоклавного газобетона. Анализ кривых на термогравиграммах позволяет установить наиболее характерные участки. Первый экстремум существенного снижения массы образцов зафиксирован при температурах от 100 до 160 °С, второй – при температурах от 310 до 575 °С, третий – при температурах от 590 до 865 °С, четвертый – при температурах от 880 до 907 °С. Пятый перелом кривой снижения массы образцов зафиксирован установкой при температурах от 920 до 1 000 °С.

В табл. 5 представлены результаты термогравиметрического анализа опытных образцов неавтоклавного газобетона с применением базальтовых отходов.

Таблица 5

Результаты термогравиметрического анализа образцов газобетона на основе ПБО (ПБО/Ц = 1) на 180-е сутки твердения

№	Состав газобетона	Потеря массы TG, %, при температуре, °С						Влажность по массе, %
		120–130	150–270	325–450	475–525	650–750	950	
1	Ц + ПБО + + ЩД + АІ	1,0	2,5	5,2	7,2	20,0	28,0	9,65
2	Ц + ПБО + + 2 % ВБО + + АІ + ЩД	0,51	4,2	6,0	8,2	16,3	27,0	8,74
3	Ц + ПБО + + 4 % ВБО + + АІ + ЩД	0,35	3,8	5,8	8,3	16,0	26,0	8,67

Минеральные составы неавтоклавного газобетона определяли с помощью рентгенофазового анализа.

В табл. 6 представлены фазовые составы опытных образцов неавтоклавного газобетона с применением базальтовых отходов на 180-е сутки твердения.

Таблица 6

Фазовые составы образцов газобетона на 180-е сутки твердения, %

Характеристика состава образца	Карбонаты			Кварц	Аморфная фаза
	Кальцит	Доломит	Ватерит		
Состав № 1 (Ц + ПБО + ЩД + Al)	26,2	7,8	13,5	7,5	45,0
Состав № 2 (Ц + ПБО + 2 % ВБО + Al + ЩД)	23,1	8,9	15,3	7,7	45,0
Состав № 3 (Ц + ПБО + 4 % ВБО + Al + ЩД)	27,2	8,1	12,2	7,5	45,0

При исследовании пористости образца газобетона оптимального состава № 3 (4 % ВБО) установлено, что размеры пор газобетона не превышают 2,5 мм, наибольшее количество пор имеют размеры от 0,5 до 1,5 мм. При экспериментальных исследованиях размеры пор менее 0,5 мм не определены. Размеры между порами составляют от 0,5 до 1,0 мм, форма пор – круглая (рис. 10).

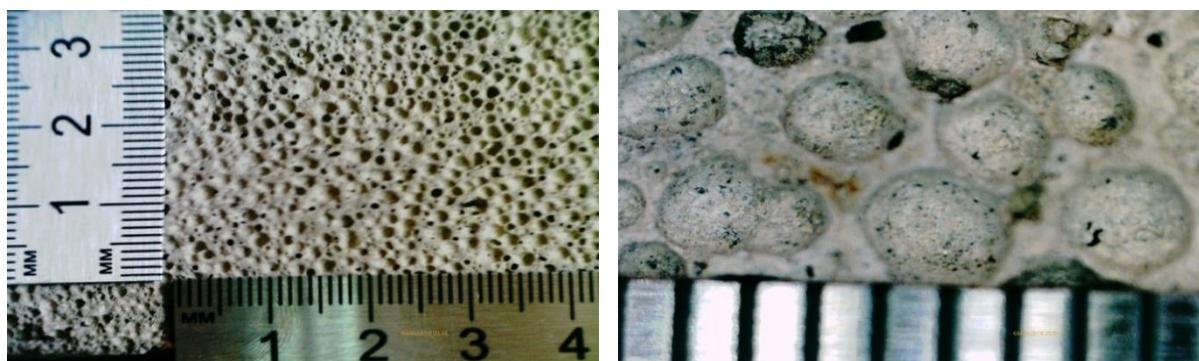


Рис. 10. Макроструктура образцов неавтоклавного газобетона состава Ц + ПБО + Al + ЩД, 4 % ВБО, возраст 180 сут

Деформация усадки неавтоклавного газобетона исследовалась в соответствии с требованиями ГОСТ 24544-81. Самое низкое значение усадки (1,585 мм/м в возрасте 180 сут) было получено для образцов состава № 3 на основе ПБО при ПБО/Ц = 1, а также ВБО в количестве 4 % от массы цемента (рис. 11).

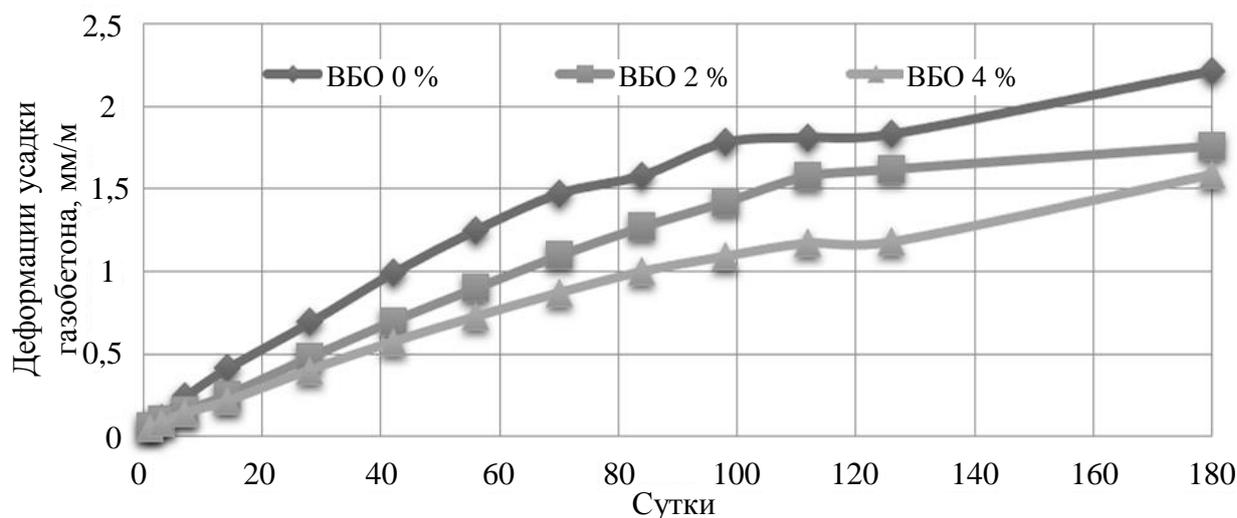


Рис. 11. Зависимость усадки газобетона на основе ПБО (ПБО/Ц = 1) от содержания ВБО

В табл. 7 приведены разработанные составы неавтоклавного газобетона марки по средней плотности D500 с использованием ПБО при ПБО/Ц = 1 и ВБО в количестве 4 % от массы цемента (состав № 1); при ПБО/Ц = 0,25 без ВБО (состав № 2), а также с использованием в качестве наполнителя МК при МК/Ц = 0,75 и вводом ВБО в количестве 4 % от массы цемента (состав № 3).

Таблица 7

Составы неавтоклавного газобетона (на 1 м³)

Отношение наполнителей к цементу	Цемент, кг	ПБО, кг	ВБО, кг	Алюминиевая пудра, г	NaOH, кг	Вода, л	СП-1, кг
С применением базальтовых отходов							
Состав № 1 (ПБО/Ц = 1)	240	240	9,6	650	2,40	312	1,92
Состав № 2 (ПБО/Ц = 0,25)	420	60	–	650	4,2	265	3,36
С применением МК							
Состав № 3 (МК/Ц = 0,75)	300	180	6–12	650	3,00	200	2,00

Строительно-технические свойства разработанных составов неавтоклавного газобетона приведены в табл. 8.

Таблица 8

Строительно-технические свойства составов неавтоклавного газобетона

Показатели качества	Состав № 1 (ПБО/Ц = 1)	Состав № 2 (ПБО/Ц = 0,25)	Состав № 3 (МК/Ц = 0,75)
Марка по плотности	D500	D500	D500
Класс по прочности на сжатие	B1,5	B1,5	B1,5
Марка по морозостойкости	F _{1,50}	F _{1,50}	F _{1,50}
Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	0,125	0,125	0,127
Усадка, мм/м	1,58	3,0	1,67
Коэффициент размягчения	0,82	0,82	0,80

Данные табл. 8 показывают, что при замене части цемента ПБО в соотношениях ПБО/Ц = 1 и введении в состав композиции ВБО в объеме 4 % от массы цемента (базовый состав № 1) усадка неавтоклавного газобетона снижается на 47 % без потери его прочности по сравнению с контрольным составом № 2 при ПБО/Ц = 0,25 без ВБО и значительно меньшем (на 40 % и более) расходе цемента. При этом расход цемента в производстве неавтоклавного газобетона базового состава № 1 с использованием ПБО при ПБО/Ц = 1 меньше на 20 % по сравнению с составом № 3, в котором используется в качестве наполнителя МК при МК/Ц = 0,75 и сравнимых значениях показателей качества.

Рассчитана технико-экономическая эффективность применения базальтовых отходов в производстве неавтоклавного газобетона. Годовая стоимость продукции и валовая прибыль предприятия по производству газобетона представлены в табл. 9.

Таблица 9

Стоимость материалов для приготовления 1 м³
неавтоклавного газобетона на основе заводского состава
при ПБО/Ц = 1 (в ценах 2016 года)

Наименование материала	Ед. изм.	Расход на 1 м ³ , кг	Цена, руб.	Стоимость, руб.
1	2	3	4	5
Цемент (с учетом доставки)	Т	0,240	4 600	1 104
ПБО	Т	0,240	100	24

Окончание табл. 9

1	2	3	4	5
ВБО	Т	0,096	100	9,6
Алюминиевая пудра	Т	0,065 0	46 000	30
NaOH	Т	0,002 4	54 000	129,6
СП-1	Т	0,001 9	60 000	115,2
Вода	м ³	0,312	23,26	5,43
Итого на 1 м ³				1 418,0
НДС 18 %				255,2
Всего на 1 м ³ с НДС				1 673,2

Экономический эффект при замене части цемента ПБО и использовании ВБО в оптимальном количестве составляет в среднем 35–40 %.

Библиографический список

1. Белов В.В., Али Р.А. Дисперсно-армированный газобетон с использованием базальтовых отходов // Цемент и его применение. 2016. № 3. С. 102–105.

2. Белов В.В., Курятников Ю.Ю. Использование золы гидроудаления при изготовлении сухой готовой смеси для неавтоклавного газобетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова: научно-теоретический журнал. 2012. № 1. С. 34–38.

3. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона: монография. М.: Палеотип, 2006. 244 с.

4. Мирошников Е.В., Строкова В.В., Череватова А.В. Наноструктурированное перлитовое вяжущее и пенобетон на его основе // Строительные материалы. 2010. № 4. С. 105–106.

5. Смесь для производства ячеистого бетона: пат. 2338712 Рос. Федерация / Крутиков В.А; заявл. 10.09.2007; опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32.

6. Белов В.В. Сухие смеси для изготовления ячеистого бетона: современное состояние проблемы, экспериментальные исследования, перспективы производства и применения // Сухие строительные смеси. 2010. № 3. С. 29.

7. Белов В.В., Али Р.А. Оптимизация структуры связующей матрицы газобетона с использованием карбонатного наполнителя // Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности: материалы Международной научно-технической конференции, 30 июня – 3 июля 2015 г., г. Тула. Тула: ТулГУ, 2015. С. 11–12.

8. Курятников Ю.Ю. Сухие золосодержащие смеси для изготовления газобетона естественного твердения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Воронеж, 2009. 166 с.
9. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник. М.: АСВ, 2011. 510 с.
10. Поры и прочностные характеристики строительных материалов / А.М. Салахов [и др.] // Строительные материалы. 2011. № 12. С. 25–28.
11. Инновационные технологии высокоэффективных керамических строительных изделий на основе кремнистых пород / Г.Д. Ашмарин [и др.] // Строительные материалы. 2011. № 7. С. 28–30.
12. Наружные ограждающие конструкции зданий из крупноразмерных ячеистобетонных изделий / Н.П. Сажнев [и др.] // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 12–18.
13. Бедарев А.А., Шмитько Е.И. Оптимизация структуры газосиликата с применением мультипараметрической модели // Строительные материалы. 2013. № 4. С. 89–93.
14. Глушков А.М. Технологический комплекс ПБК-Р для производства неавтоклавного пенобетона // Строительные материалы. 2010. № 7. С. 81–86.
15. Бедарев А.А. Системы моделирования и оптимизации структуры ячеистого силикатного бетона Cellular Concrete Cellular MOD Concrete // Молодежь в современном мире: гражданский, творческий и инновационный потенциал: сборник материалов 3-й Всероссийской заочной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Старый Оскол, 2012. С. 327–334.
16. Жуков А.Д. Применение газобетона в фасадных системах // Технологии бетонов. 2012. № 3–4. С. 50.
17. Лотов В.А., Сударев Е.А., Иванов Ю.А. Тепловыделение в системе цемент – вода при гидратации и твердении // Строительные материалы. 2011. № 11. С. 35–37.
18. Горев В.М., Токарева С.А., Вытчиков Ю.С. Современные ограждающие конструкции из керамзитобетона для энергоэффективных зданий // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 34–36.
19. Сырьевая смесь для получения газобетона неавтоклавного твердения: пат. 2380343 Рос. Федерация / Полухина Н.А., Чалая Е.В., Зеленков Д.С.; заявл. 20.10.2008; опубл. 27.01.2010, Бюл. № 3.
20. Смесь для изготовления легкого бетона и легкий бетон: пат. 2399598 Рос. Федерация / Добровольский В.Н.; заявл. 27.12.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26.
21. Шмитько Е.И., Белькова Н.А., Макушина Ю.В. Влияние поверхностно-активных веществ на влажностную усадку бетонов // Строительные материалы. 2018. № 4. С. 48–51.

22. Строкова В.В. Механизм структурообразования строительных композитов с гранулированным наноструктурирующим наполнителем // Строительные материалы. 2011. № 9. С. 64–65.

23. Строкова В.В. Конструкционные легкие бетоны на основе активных гранулированных наполнителей // Строительные материалы. 2009. № 10. С. 23–25.

24. Сахаров Г.П., Стрельбицкий В.П. Развитие производства ячеистых бетонов на традиционной и альтернативной основе // Технологии бетонов. 2010. № 1–2. С. 18–22.

25. Мелкозернистый бетон и способ приготовления бетонной смеси для его получения: пат. 2657303 Рос. Федерация / Низина Т.А., Балыков А.С., Мирский В.А.; заявл. 31.05.2017; опубл. 13.06.2018, Бюл. № 51.

26. Пластифицирующая добавка в строительные материалы, включающие минеральные вяжущие вещества: пат. 2382005 Рос. Федерация / Чулкова И.Л., Пастушенко И.В., Парфенов А.С., Беляев В.Б., Беляева Л.В.; заявл. 23.07.2008; 20.02.2010, Бюл. № 5.

27. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Влияние некоторых гиперпластификаторов на пористость, влажностные деформации и морозостойкость цементного камня // Строительные материалы. 2010. № 1. С. 44–46.

28. Несветаев Г.В. Гиперпластификаторы Melflux для сухих строительных смесей и бетонов // Строительные материалы. 2010. № 3. С. 2–3.

29. Смирнова П.В., Моргун Л.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование возможности управления величиной усадочных деформаций в пенобетонах неавтоклавного твердения // Строительные материалы. 2013. № 1. С. 96–97.

30. Сулейманова Л.А., Красникова И.Е. Выбор оптимального водотвердого отношения ячеистобетонных смесей при различных способах изготовления газобетонов // Технологии бетонов. 2013. № 12. С. 37–38.

31. Контроль органических водопонижающих добавок в вяжущих материалах и органоминеральных добавках / И.Е. Ковалева [и др.] // Сухие строительные смеси. 2011. № 5. С. 17–19.

32. Макридин Н.И., Максимова И.Н. Фактор времени в формировании конструкционной прочности модифицированной структуры цементного камня // Сухие строительные смеси. 2012. № 4. С. 37–40.

33. Добавка для бетонной смеси: пат. 2379242 Рос. Федерация / Сватовская Л.Б., Соловьева В.Я., Овчинникова В.П., Иванова В.Е., Сычева А.М., Павлович С.П., Мартышко В.М., Федотова Г.Н., Радиевский И.А., Седов С.И.; заявл. 24.07.1998; опубл. 27.09.2000, Бюл. № 5.

34. Сухая строительная смесь для приготовления ячеистого бетона: пат. 2392245 Рос. Федерация / Ефимов П.А., Пустовгар А.П.; заявл. 26.12.2008; опублик. 20.06.2010, Бюл. № 17.

35. Lin Yang, Yan Yun, Hu Zhihua. Utilization of phosphogypsum for the preparation of non-autoclaved aerated concrete // Construction and Building Materials. 2013. V. 44. P. 600–606.

36. Безусадочные цементно-золевые композиции / Г.И. Овчаренко [и др.] // Известия вузов. Строительство. 2010. № 9. С. 73–75.

37. Черноусенко Г.И., Гречман А.О. Неавтоклавный пенобетон в малоэтажном строительстве Подмосковья // Технологии бетонов. 2014. № 1. С. 11–13.

38. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Влияние некоторых гиперпластификаторов на пористость, влажностные деформации и морозостойкость цементного камня // Строительные материалы. 2010. № 1. С. 44–46.

39. Повышение эффективности вяжущих за счет использования наномодификаторов / В.В. Лесовик [и др.] // Строительные материалы. 2011. № 12. С. 60–62.

40. Андреева Н.А. Химия цемента и вяжущих веществ: учебное пособие. СПб.: СПбГАСУ, 2011. 67 с.

41. Ружинский С., Портник А., Савиных А. Дискуссия в Интернете по добавкам – компенсаторам усадки // Все о пенобетоне. 2-е изд., улучш. и доп. СПб.: Строй-бетон, 2006. 630 с.

42. Али Р.А., Белов В.В. Влияние волокнистых и пылевидных базальтовых отходов на характеристики ячеистого бетона // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции 1–10 октября 2018 г., Россия. Сочи. 2018. С. 621–625.

43. Аубакирова Б.М., Айтжанова Т.К. Вопросы получения силикатного материала ячеистой структуры на основе местного сырья // Технологии бетонов. 2016. № 5–6. С. 20–23.

44. Сагдатуллин Д.Г., Морозова Н.Н., Хозин В.Г. Реологические характеристики водных суспензий композиционного гипсового вяжущего и его композитов // Известия КГАСУ. 2009. № 2. С. 263–268.

45. Изотов В.С., Ибрагимов Р.А. Сравнение эффективности отечественных гиперпластификаторов в тяжелом бетоне // Бетон и железобетон. 2010. № 6. С. 18–20.

46. Гувалов А.А., Кузнецова Т.В. Влияние модификатора на свойства цементных суспензий // Строительные материалы. 2013. № 8. С. 86–88.

47. Сеськин И.Е., Баранов А.С. Влияние суперпластификатора С-3 на формирование прочности пресованного бетона // Строительные материалы. 2013. № 1. С. 32–33.

48. Рыбакова М.В. Интенсификация процессов твердения цементного камня на основе цементной суспензии и суперпластификатора // *Строительные материалы*. 2010. № 8. С. 55–57.
49. Несветаев Г.В., Кардумян Г.С. Модуль упругости цементного камня с суперпластификаторами и минеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении // *Бетон и железобетон*. 2013. № 6. С. 10–11.
50. Recycling of autoclaved aerated concrete in floor screeds: sulfate leaching reduction by ettringite formation / J. Bergmans [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 111. P. 9–14.
51. Панферова А.Ю., Гаркави М.С. Модифицирование гипсовых систем малыми добавками полимеров // *Строительные материалы*. 2011. № 6. С. 8–9.
52. Ружинский С., Портник А., Савиных А. Улучшение характеристик тяжелых и ячеистых бетонов минимизацией в них усадочных явлений // *Все о пенобетоне*. СПб.: Строй-бетон, 2006. С. 229.
53. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Гиперпластификаторы Melflux для сухих строительных смесей и бетонов // *Строительные материалы*. 2010. № 6. С. 38–39.
54. Особенности твердения объемно-гидрофобизированных бетонов / С.Н. Леонович [и др.] // *Технологии бетонов*. 2009. № 5. С. 64–66.
55. Траутвайн А.И., Ядыкина В.В., Гридчин А.М. Повышение реакционной способности наполнителей в результате помола // *Строительные материалы*. 2010. № 12. С. 81–83.
56. Макридин Н.И., Максимова И.Н., Овсюкова Ю.В. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. Часть 1 // *Строительные материалы*. 2010. № 10. С. 74–77.
57. Макридин Н.И., Максимова И.Н., Овсюкова Ю.В. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. Часть 2 // *Строительные материалы*. 2011. № 3. С. 72–75.
58. Логанина В.И. Тонкодисперсные наполнители на основе силикатов кальция для сухих строительных смесей // *Строительные материалы*. 2010. № 2. С. 44–42.
59. Прокин В.А. Угловский известковый комбинат // *Строительные материалы*. 2010. № 2. С. 32–33.
60. Перспективы применения наномодифицированного бетона / В.А. Езерский [и др.] // *Строительные материалы*. 2011. № 9. С. 70–71.
61. Ядыкина В.В., Лукаш Е.А. Повышение эффективности бетонов за счет модифицирования поверхности дисперсных минеральных наполнителей // *Технологии бетонов*. 2014. № 1. С. 16–18.
62. Ухова Т.А., Фискинд Е.С. Комплексное применение неавтоклавных поробетонов и порофоббетон в возведении малоэтажных жилых домов // *Технологии бетонов*. 2012. № 5–6. С. 71–72.

63. Баженов М.И. Исследование влияния мелкодисперсной добавки на физико-механические свойства бетонов // Сухие строительные смеси. 2013. № 3. С. 36–37.
64. Кастатика А.В., Соловьев Д.В., Степинова И.В. Гидрозащитные свойства цементсодержащего материала проникающего действия при использовании пористых оснований разной природы // Бетон и железобетон. 2013. № 1. С. 5–8.
65. Толмачев С.Н. Исследование механизма структурообразования пресованных цементно-песчаных бетонов с углеродными наночастицами // Строительные материалы. 2011. № 9. С. 61–63.
66. Никольский С.Г., Перцева О.Н., Иванова В.И. Обоснование экспресс-метода определения морозостойкости пористых материалов // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 8 (60). С. 7–19.
67. Никишкин В.А. Микроструктура цементного камня и ее влияние на водонепроницаемость и прочность бетона // Технологии бетонов. 2012. № 5–6. С. 6–9.
68. Расширение номенклатуры искусственных пористых заполнителей / С.А. Мизюряев [и др.] // Строительные материалы. 2011. № 7. С. 12–13.
69. Ружинский С., Портник А., Савиных А. Улучшение характеристик тяжелых и ячеистых бетонов с минимизацией в них усадочных явлений // Все о пенобетоне. СПб.: Строй-бетон, 2006. С. 229.
70. Hygric thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete / M. Jerman [et al.] // Construction and Building Materials. 2013. V. 41. P. 352–359.
71. Белов В.В. Сухие смеси для изготовления ячеистого бетона: современное состояние, проблемы, экспериментальные исследования, перспективы производства и применения // Сухие строительные смеси. 2010. № 3. С. 29.
72. Логанина В.И. Свойства известковых композитов с силикатсодержащими наполнителями // Строительные материалы. 2012. № 3. С. 30–31.
73. Повышение эффективности вяжущих за счет использования наномодификаторов / В.В. Лесовик [и др.] // Строительные материалы. 2011. № 12. С. 60–62.
74. Singha Kunal. A Short review on basalt Fiber // International Journal of Textile Science. 2012. № 1 (4). P. 19–28.
75. Properties of autoclaved aerated concrete with halloysite under industrial conditions / Z. Owsiak [et al.] // Procedia Engineering. 2015. V. 108. P. 214–219.
76. Логанина В.И., Фролов М.В. Составы с применением известкового композиционного вяжущего для отделки стен из газобетона // Сухие строительные смеси. 2016. № 3. С. 9–11.

77. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Адгезионная способность строительных растворов с пылевидным гранитным наполнителем // Сухие строительные смеси. 2016. № 3. С. 20–24.
78. Белов В.В., Али Р.А. Дисперсно-армированный газобетон с использованием базальтовых отходов // Цемент и его применение. 2016. № 3. С. 102–105.
79. Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Шукин Г.Л. Компенсация усадки пенобетона // Строительные материалы. 2015. № 3. С. 3–6.
80. Свиначев А.В., Глушков А.М., Куприна А.А. Технологический модуль ТМ-25 для производства неавтоклавных фибропенобетонных изделий // Строительные материалы. 2014. № 6. С. 4–6.
81. Езерский В.А. Улучшение свойств мелкозернистого бетона с помощью комплексных минеральных добавок // Строительные материалы. 2015. № 6. С. 4–6.
82. Курятников Ю.Ю., Коновалов Р.В. Неавтоклавный газобетон с применением гиперпластификаторов // Инновации и моделирование в строительном материаловедении и образовании: материалы Международной заочной научно-технической конференции. Тверь: ТвГТУ, 2014. С. 59–61.
83. Белов В.В., Али Р.А. Разработка оптимальных составов неавтоклавного газобетона марок со средней плотностью D500, D600, D800 // Путь науки. 2015. № 9 (19). С. 22–27.
84. Кузнецова Н.В., Стерхов И.И. Исследование составов газобетонов с заполнителем из отходов литейного производства // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2014. № 3. С. 24–30.
85. Пинскер В.А., Вылегжанин В.П. Пути экономии цемента при производстве ячеистых бетонов // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 43–44.
86. Али Р.А., Белов В.В. Разработка оптимальных составов неавтоклавного газобетона по средней плотности с использованием пылевидных базальтовых отходов // Инновации и моделирование в строительном материаловедении: сборник научных трудов. Тверь: ТвГТУ, 2015. С. 17–21.
87. Güneyisi E., Gesog̃lu M., Özbay E. Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures // Construction and Building Materials. 2010. V. 24. № 10. P. 1878–1887.
88. Itim A., Ezziane K., Kadri El-H. Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions // Construction and Building Materials. 2011. № 25. P. 3603–3609.
89. Ефименко А.З. Неавтоклавный газобетон на песке из отходов дробления бетона // Строительные материалы. 2009. № 1. С. 13.

90. Ласман И.А., Васюнина С.В. Эффективность применения пластифицирующих добавок при производстве бетонных смесей и бетонов // Технологии бетонов. 2012. № 1–2. С. 16–17.

91. Ma Bao-guo, Cai Li-xiong, Li Xiang-guo. Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products // Journal of Cleaner Production. 2016. V. 127. P. 162–171.

92. The effect of different fiber reinforcement on the thermal and mechanical properties of autoclaved aerated concrete / Zühtü Onur Pehlivanlı [et al.] // Construction and Building Materials. 2016. V. 112. P. 325–330.

93. Recycling of autoclaved aerated concrete in floor screeds: Sulfate leaching reduction by ettringite formation / J. Bergmans [et al.] // Construction and Building Materials. 2016. V. 111. P. 9–14.

94. Tkach E.V. Develop an Efficient Method for Improving Hydrophysical Properties of Aerated Concrete Using Industrial Waste // Procedia Engineering. 2016. V. 153. P. 761–765.

95. Гайфуллин А.Р., Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 7 (59). С. 66–73.

96. Барахтенко В.В. Оценка потребительских характеристик изделий из высоконаполненного полимерно-минерального композиционного материала на основе поливинилхлорида и отходов ТЭС // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 3 (47). С. 17–24.

97. Езерский В.А., Кузнецова Н.В., Барина О.С. Модификация цементных смесей с использованием отходов производства цементно-стружечных плит // Строительные материалы. 2016. № 6. С. 47–49.

98. Walczak P. Utilization of Waste Glass in Autoclaved Aerated Concrete // Procedia Engineering. 2015. V. 122. P. 302–309.

99. Paweł Walczak, Paweł Szymański, Agnieszka Różycka. Autoclaved Aerated Concrete based on Fly Ash in Density 350 kg/m³ as an Environmentally Friendly Material for Energy – Efficient Constructions // Procedia Engineering. 2015. V. 122. P. 39–46.

100. Sanita Rubene, Martins Vilnitis, Juris Noviks. Frequency Analysis for EIS Measurements in Autoclaved Aerated Concrete Constructions // Procedia Engineering. 2015. V. 108. P. 647–654.

101. Agnieszka Różycka, Waldemar Pichór. Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete // Construction and Building Materials. 2016. V. 120. P. 65–71.

102. Total shrinkage, oxygen permeability, and chloride ion penetration in concrete made with white Portland cement and blast-furnace slag / L.M. Dellinghausen [et al.] // Construction and Building Materials. 2012. V. 37. P. 652–659.

103. Franco Bisceglie, Elisa Gigante, Marco Bergonzoni. Utilization of waste Autoclaved Aerated Concrete as lighting material in the structure of a green roof // *Construction and Building Materials*. 2014. V. 69. P. 351–361.
104. The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes / Jadvyga Kerienė [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2013. V. 49. P. 527–535.
105. Impact of complex additive consisting of continuous basalt fibres and SiO₂ microdust on strength and heat resistance properties of autoclaved aerated concrete / Marijonas Sinica [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2014. V. 50. P. 718–726.
106. Yanqing Xia, Yun Yan, Zhihua Hu. Utilization of circulating fluidized bed fly ash in preparing non-autoclaved aerated concrete production // *Construction and Building Materials*. 2013. V. 47. P. 1461–1467.
107. Степанова В.Ф. Перспективы применения композитов в производстве бетона и железобетона // *Технологии бетонов*. 2016. № 9–10 (110–111). С. 8–9.
108. Моргун В.Н. Конструкционные возможности фибропенобетона неавтоклавного твердения // *Строительные материалы*. 2012. № 4. С. 14–16.
109. Белов В.В., Курятников Ю.Ю. Сухие смеси для изготовления газобетона неавтоклавного твердения. Тверь: ТГТУ, 2010. 100 с.
110. Ваганов В.Е. Структура и свойства ячеистого газобетона, модифицированного углеродными наноструктурами // *Строительные материалы*. 2010. № 9. С. 59–61.
111. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Яковлев Г.И. Наноструктурирование цементного камня при дисперсном армировании базальтовым волокном // *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 34–37.
112. Дидевич А. Фибробетоны: новый взгляд на традиционный композит // *Технологии бетонов*. 2011. № 11–12. С. 64–65.
113. Flexural impact response of textile-reinforced aerated concrete sandwich panels / V. Dey [et al.] // *Materials and Design*. 2015. V. 86. P. 187–197.
114. Низина Т.А., Бальков А.С. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. № 2 (62). С. 13–25.
115. Совместное действие стеклянной и полипропиленовой фибры на механические свойства самоуплотняющихся бетонов / А.Р. Тахери Фард [и др.] // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. № 2 (62). С. 26–31.

116. Структура и свойства текстильно-армированного бетона / А.А. Волкова [и др.] // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 7 (59). С. 50–56.
117. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Яковлев Г.И. Повышение коррозионной стойкости базальтового волокна в цементных бетонах // Строительные материалы. 2016. № 1–2. С. 27–31.
118. Фирсов В.В., Татаринцева О.С., Блазнов А.Н. Эффективность применения базальтоволокнистого утеплителя в пустотелых стеновых блоках // Строительные материалы. 2016. № 3. С. 76–78.
119. Низина Т.А., Пономарев А.Н., Балыков А.С. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок // Строительные материалы. 2016. № 9. С. 68–72.
120. Лесовик Р.В., Ключев С.В. Фибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках Курской магнитной аномалии для изгибаемых конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 3 (29). С. 41–47.
121. Эффективная дисперсно-армированная сухая кладочная смесь / В.С. Семенов [и др.] // Строительные материалы. 2016. № 7. С. 39–44.
122. Penna A., Mandirola M., Rota M. Experimental assessment of the in-plane lateral capacity of autoclaved aerated concrete (AAC) masonry walls with flat-truss bed-joint reinforcement // Construction and Building Materials. 2015. V. 82. P. 155–166.
123. Сумин А.В., Строкова В.В. Пеногазобетон с наноструктурированным модификатором // Строительные материалы. 2016. № 1–2. С. 27–30.
124. Белов В.В., Али Р.А. Влияние волокнистых базальтовых отходов на характеристики неавтоклавного газобетона // Научное обозрение. 2016. № 15. С. 48–54.
125. Белов В.В., Али Р.А. Малоусадочный газобетон с базальтовой фиброй из промышленных отходов // Инновации и инвестиции. 2020. № 8. С. 176–180.
126. Feasibility study on utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as aerating agent for the production of autoclaved aerated concrete / S. Yuanming [et al.] // Cement and Concrete Composites. 2015. V. 56. P. 51–58.
127. Kittipong K., Suwimol A., Kwannate S. Properties of autoclaved aerated concrete incorporating rice husk ash as partial replacement for fine aggregate // Cement and Concrete Composites. 2015. V. 55. P. 11–16.

IMPROVING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE

V.V. Belov, R.A. Ali

Abstract. *The possibility of preparing non-autoclaved aerated concrete using technogenic pulverized basalt waste, which is formed during the crushing of basalt in the production of mineral wool products and is deposited in electrofilters, as well as fibrous basalt waste (WBO), is shown. Dust-like basalt waste, which is a powder with a specific surface of 376 m²/kg, was used as a mineral microfiller. Fibrous basalt waste was used as a dispersed-reinforcing component of aerated concrete. With the introduction of WBO into aerated concrete, its strength increases and cracking decreases due to their good adhesion to cement stone and fibrous structure. It has been established that the introduction of basalt waste into concrete in the optimal amount contributes to an increase in the performance properties of non-autoclaved aerated concrete. As the results of the study of the microstructure of aerated concrete samples showed, the strength and crack resistance of the material increase due to the improvement in the structure of the interpore partitions of aerated concrete.*

Keywords: *aerated concrete of non-autoclave hardening, operational properties, man-made pulverized and fibrous basalt waste, microfiller, dispersed reinforcing component, chemical additives.*

Об авторах:

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, Тверь. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

АЛИ Рушди Ахмед Али – кандидат технических наук, ведущий инженер АО «Тверской ЖБИ-4», научный сотрудник кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, Тверь. E-mail: rushdiahmad@mail.ru

About the authors:

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

ALI Rushdi Ahmed Ali – Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer of Tverskoy ZHBI-4 JSC, Researcher at the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: rushdiahmad@mail.ru

РЕГУЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ПОМОЩЬЮ ДОБАВОК ПОЛИМЕРОВ

В.В. Белов, М.А. Смирнов

© Белов В.В., Смирнов М.А., 2022

***Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы модификации и регулирования сухих строительных цементно-песчаных смесей путем введения в их состав полимерных добавок различного происхождения. Полимерные добавки вводят в сухие смеси с пластификатором и молотым известняком в виде дисперсий и добавлением воды на стройплощадке, что, наряду с соблюдением высоких экологических стандартов, обеспечивает высокое качество строительных материалов, полученных из этих сухих смесей.*

***Ключевые слова:** сухие строительные цементно-песчаные смеси, полимерные добавки, поливиниловый спирт, молотый известняк, пластифицирующий эффект.*

Неотъемлемым компонентом современных сухих строительных смесей являются полимерные добавки, вводимые с целью повышения адгезии, деформативности, водонепроницаемости и других физико-механических характеристик [1]. Введение полимерных добавок в сухие строительные смеси в виде дисперсий с водой затворения непосредственно на строительном объекте существенно снижает эффективность сухих смесей. Работа с полимерными дисперсиями имеет важные преимущества (отсутствие токсичных компонентов, пожаровзрывобезопасность, высокая концентрация целевого компонента), но при этом требует соблюдения ряда условий. Это водные системы, и с ними можно работать при температуре не ниже 0 °С; для хранения и транспортировки необходима герметичная тара во избежание пролива или высыхания. В связи с этим в составах сухих строительных смесей получили распространение порошкообразные полимерные добавки.

В процессе введения пластифицирующих добавок в бетон или раствор при постоянном расходе цемента и равноподвижности сырьевой смеси можно уменьшить водоцементное отношение. При добавлении газообразователя материал приобретает повышенную прочность на растяжение, водонепроницаемость, морозостойкость и долговечность, в частности стойкость к солям, попеременному увлажнению и высушиванию [2, 3].

Гидрофобизирующие добавки ПАВ позволяют улучшить физико-механические и эксплуатационные свойства газобетона за счет стойкости к агрессивным веществам, находящимся в окружающей среде [2]. В процессе тепловлажностной обработки бетон с гидрофобизирующими добавками (например, с добавлением мылонафта) приобретает более высокую прочность, чем бетон с теми же характеристиками, но без добавок [2, 4]. Эффективность гидрофобизирующей добавки связана с уменьшением водопоглощения бетона [4–6]. Эффективность газообразующих и воздухововлекающих добавок оценивают по увеличению морозостойкости бетона контрольного состава, используя средства испытания и вспомогательные устройства согласно действующим стандартам [2, 4]. Применение химических добавок, кроме всего прочего, позволяет обеспечить рациональную упаковку частиц наполнителя [7], причем наибольшая компактность упаковки достигается при использовании полидисперсного наполнителя.

Исходя из многочисленных литературных источников, можно сказать, что в качестве отечественной полимерной добавки к растворным и бетонным смесям используется поливиниловый спирт. Он является водоудерживающей добавкой, пластификатором, добавкой, увеличивающей прочность раствора и влияющей на морозостойкость, пористость и другие физико-механические характеристики.

Для исследования влияния добавки поливинилового спирта на свойства цементно-песчаных смесей на первом этапе использовался не сухой поливиниловый спирт, а его водный раствор разной концентрации. Изготавливались образцы-кубы размером $70 \times 70 \times 70$ мм из цементно-песчаного раствора (цемент : песок – 1 : 3) нормальной консистенции (по расплыву конуса), количество добавки варьировалось в пределах 0–1,5 % от массы цемента, при этом сухой поливиниловый спирт вначале растворялся в воде затворения при температуре 20 °С в течение 20 мин. Формование образцов осуществлялось на лабораторной виброплощадке до появления цементного молока. Твердение образцов проходило при нормальных условиях в течение 28 сут, после чего образцы испытывались на прочность при сжатии.

Из графиков зависимостей предела прочности при сжатии цементно-песчаного раствора и водоцементного отношения растворной смеси от концентрации добавки поливинилового спирта видно, что поливиниловый спирт обладает значительным пластифицирующим эффектом (рис. 1). При концентрации добавки 1 % от массы цемента водоцементное отношение (при одной и той же консистенции по расплыву конуса) снижается более чем на 18 %. При концентрации добавки поливинилового спирта 1,2 % прирост предела прочности при сжатии образцов в возрасте 28 сут составил более 20 % по сравнению с бездобавочными смесями.

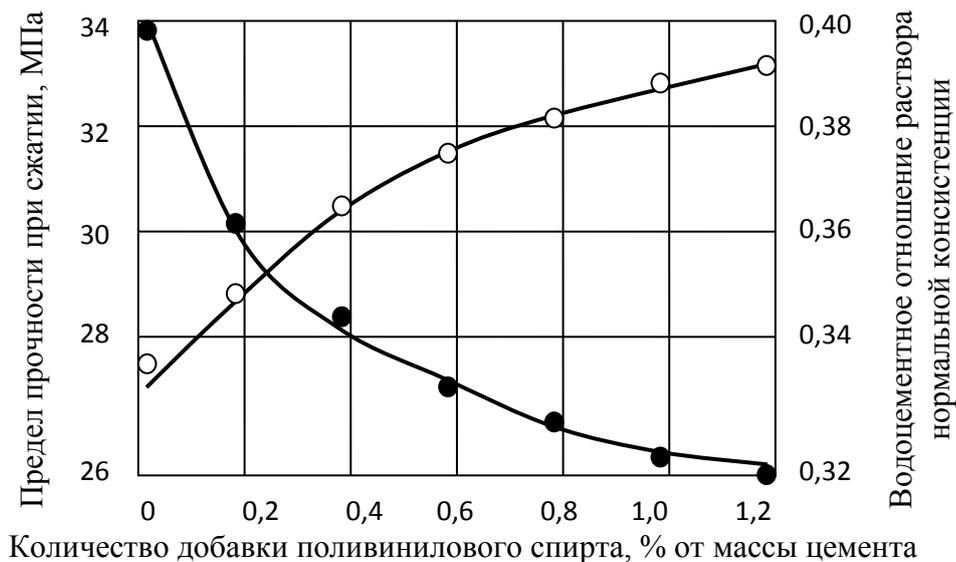


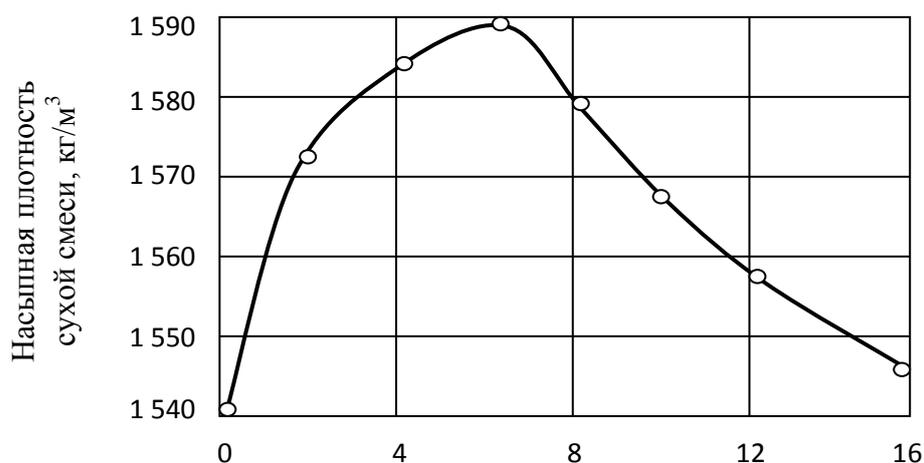
Рис. 1. Зависимости предела прочности при сжатии цементно-песчаного раствора и водоцементного отношения цементно-песчаной смеси от концентрации добавки поливинилового спирта марки ГФ:
 ○ – предел прочности при сжатии; ● – водоцементное отношение

Дальнейшие исследования проводились на сухом поливиниловом спирте. Его используют для регулирования свойств сухих строительных смесей. Сухой поливиниловый спирт первого сорта выпускается в виде порошка со средним диаметром гранул 2 мм. Для применения в составе сухой строительной смеси поливиниловый спирт необходимо измельчить до высокой удельной поверхности. Это ускорит его растворимость в воде и при приготовлении сухой строительной смеси непосредственно на стройплощадке. Однако при помоле в лабораторной шаровой мельнице гранулы поливинилового спирта размягчаются, комкуются, создавая крупные агрегаты, при этом повышается вязкость всей системы, что делает невозможным измельчение порошка.

Для получения поливинилового спирта высокой удельной поверхности его помол в шаровой мельнице осуществлялся совместно с известняковой крошкой. Во-первых, известняк при совместном помоле со спиртом сыграет роль абразивного материала и не даст гранулам поливинилового спирта слипаться друг с другом, т. е. позволит получить высокодисперсную смесь. Во-вторых, полученный тонкодисперсный карбонат кальция будет играть роль микронаполнителя в цементном вяжущем. Частицы карбоната кальция, выступая как микронаполнитель, образуют микрокаркас и создают микробетонную структуру материала [8]. В этом реализуется физическая составляющая возможной структурообразующей роли карбоната кальция. В цементных композициях

тонкомолотый известняк играет и физико-химическую роль, поскольку его частицы могут служить центрами кристаллизации, создавая условия для «зонирования» новообразований при их кристаллизации. В результате этого достигается соответствующая модификация структуры. Существенным в физико-химической составляющей структурообразующей роли является и действие карбонаткальциевых частиц как «подложки» для ориентированной кристаллизации гидросиликатов кальция на их поверхности с образованием контактов по механизму эпитаксии [9].

Для определения оптимальной добавки тонкомолотого известняка составляли зернисто-дисперсные системы, где зернистой частью выступал кварцевый песок, а дисперсной – молотый известняк. Интервал варьирования последнего составил 0–16 % от массы зернистой части. Зависимость насыпной плотности полученных зернисто-дисперсных систем от количества молотого известняка (рис. 2) показывает, что оптимальное количество добавки молотого известняка составляет 6 %. При этом наблюдается экстремум насыпной плотности, что объясняется максимально плотной упаковкой частиц зернисто-дисперсной системы.



Содержание добавки молотого известняка, % от массы заполнителя (кварцевый песок оптимальной гранулометрии)

Рис. 2. Зависимость насыпной плотности сухой зернисто-дисперсной смеси (кварцевый песок и тонкомолотый известняк) от содержания дисперсной части

Для исследования влияния добавки сухого поливинилового спирта на физико-механические свойства цементно-песчаных смесей вначале приготавливалась комплексная добавка. Производился помол известняковой крошки совместно с сухим поливиниловым спиртом до удельной поверхности $500 \text{ м}^2/\text{кг}$. Полученная комплексная добавка вводилась в сухом виде в цементно-песчаную смесь (цемент : песок – 1 : 3) и перемешивалась до получения однородной композиции. На основе

полученной таким образом сухой строительной смеси с добавкой тонкомолотого известняка и поливинилового спирта получали растворные смеси одинаковой консистенции (по расплыву конуса), из которых формовали образцы-кубы с размером ребра 70 мм по стандартной методике. После твердения в нормальных условиях в возрасте 28 сут определяли физико-механические свойства полученных образцов. Морозостойкость устанавливали ускоренным структурно-механическим методом.

Зависимости предела прочности при сжатии цементно-песчаного раствора (цемент : песок – 1 : 3) нормальной консистенции (по расплыву конуса), содержащего 6 % тонкомолотого известняка от массы песка, и водоцементного отношения цементно-песчаной смеси от концентрации добавки поливинилового спирта показывают, что последняя значительно уменьшает водопотребность цементно-песчаной смеси, оказывает пластифицирующий эффект на растворную смесь (рис. 3).

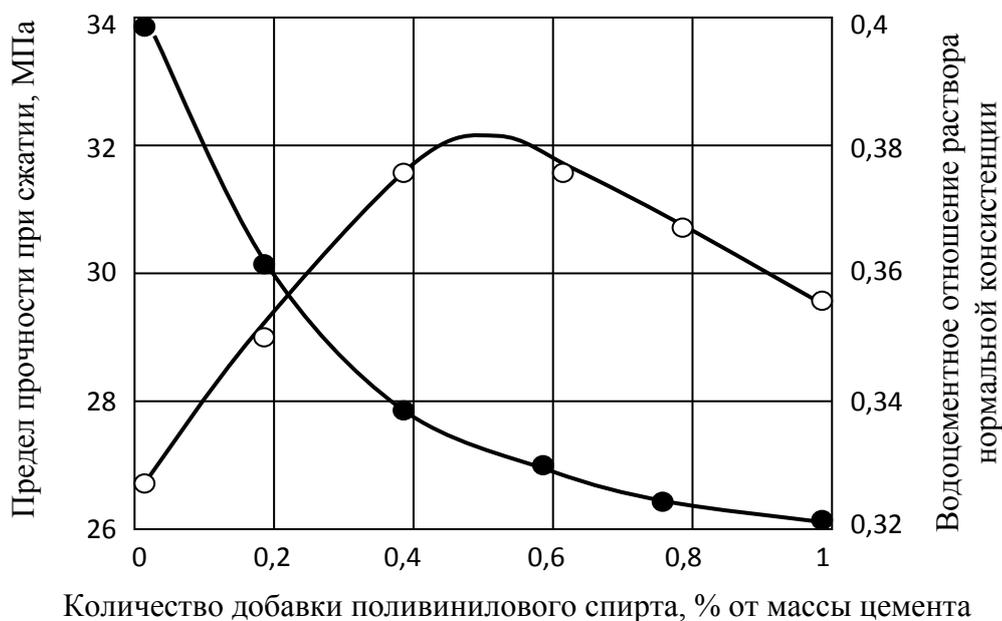


Рис. 3. Зависимости предела прочности при сжатии цементно-песчаного раствора (1 : 3) и водоцементного отношения цементно-песчаной смеси от концентрации добавки поливинилового спирта:

○ – предел прочности при сжатии; ● – водоцементное отношение

Наибольший пластифицирующий эффект наблюдается при дозировке добавки 0,2 % от массы цемента, затем пластифицирование замедляется. При увеличении концентрации добавки до 0,5 % от массы цемента наблюдается повышение прочности цементно-песчаного раствора по сравнению с раствором бездобавочным. Прирост предела прочности

при сжатии в случае концентрации добавки поливинилового спирта 0,5 % – 6 МПа, что составляет 22 % от прочности бездобавочного раствора. При увеличении концентрации поливинилового спирта более 0,5 % от массы цемента прирост прочности несколько снижается. Таким образом, оптимальная концентрация добавки спирта по показателю прочности образцов раствора составляет 0,5 % от массы цемента.

Следует отметить, что при увеличении концентрации добавки поливинилового спирта в цементно-песчаной смеси водопотребность непрерывно уменьшается, однако при количестве спирта более 0,5 % от массы цемента прочность образцов начинает снижаться. Данное обстоятельство объясняется некоторым воздухововлечением растворной смеси.

На рис. 4 представлены зависимости морозостойкости цементно-песчаного раствора (1 : 3) и показателя открытой капиллярной пористости от концентрации добавки поливинилового спирта. При концентрации добавки спирта 0,5 % от массы цемента наблюдаются экстремальные значения показателей открытой капиллярной пористости и морозостойкости, которые составляют 9 % и 190 циклов соответственно.

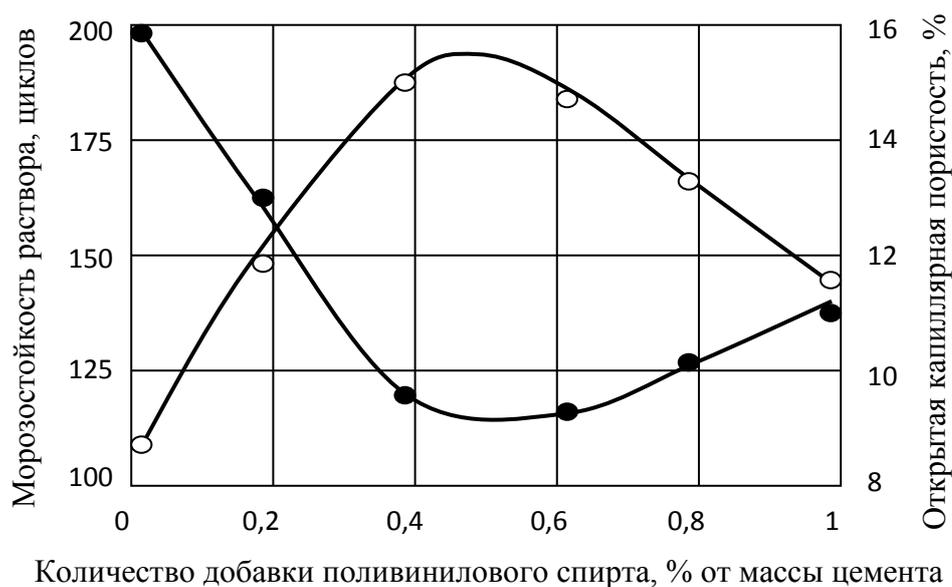


Рис. 4. Зависимости морозостойкости цементно-песчаного раствора (1 : 4) и показателя открытой капиллярной пористости от концентрации добавки поливинилового спирта марки ГФ:
○ – морозостойкость; ● – пористость

Существенное влияние небольших количеств поливинилового спирта на свойства цементно-песчаного раствора объясняется характером расположения полимера в матрице портландцемента. Спирт образует упругие прослойки между кристаллическими новообразованиями минерального вяжущего, адсорбируется на поверхности частиц заполнителя и

благодаря высоким адгезионным свойствам повышает прочность и деформативность материала. Часть поливинилового спирта закрывает поры, снижая водопоглощение раствора и повышая его морозостойкость и водонепроницаемость. Известно, что прочность на разрыв полимерных пленок и их сцепление с различными основаниями значительно превышают эти показатели для отвердевшего цемента. Вышеуказанным способом жесткий пространственный каркас из гидратированного цемента укрепляется в наиболее ослабленных местах (порах, микротрещинах) полимером.

Результаты работы показывают, что одним из способов модификации сухих цементно-песчаных смесей является введение в их состав полимерных добавок различного происхождения. Добавка поливинилового спирта имеет пластифицирующий эффект. При оптимальной концентрации добавки (0,5 % от массы цемента) снижение водопотребности цементно-песчаной составило 17,5 % по сравнению с бездобавочной смесью, прирост прочности при сжатии – 20,4 %, а морозостойкости – 73 %. Из полученных данных видно, что использование поливинилового спирта дает возможность управлять физико-механическими характеристиками сухих строительных смесей.

Библиографический список

1. Соломатов В.И., Бобрышев А.Н., Химмлер К.Г. Полимерные композиционные материалы в строительстве / под ред. В.И. Соломатова. М.: Стройиздат, 1988. 308 с.
2. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона. М.: Палеотип, 2006. 244 с.
3. Езерский В.А. Перспективы применения наномодифицированного бетона // Строительные материалы. 2011. № 9. С. 70–71.
4. Кастатика А.В., Соловьев Д.В., Степинова И.В. Гидрозащитные свойства цементсодержащего материала проникающего действия при использовании пористых оснований разной природы // Бетон и железобетон. 2013. № 1. С. 5–8.
5. Толмачев С.Н. Исследование механизма структурообразования пресованных цементно-песчаных бетонов с углеродными наночастицами // Строительные материалы. 2011. № 9. С. 61–63.
6. Никольский С.Г., Перцева О.Н., Иванова В.И. Обоснование экспресс-метода определения морозостойкости пористых материалов // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 8 (60). С. 7–19.
7. Jerman Miloš, Keppert Martin, Výborný Jaroslav, Černý Robert. Hygric Thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete // Construction and Building Materials. 2013. V. 41. P. 352–359.

8. Белов В.В., Куляев П.В. Эффективные мелкозернистые карбонатные бетоны. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 136 с.

9. Николаев А.Ф., Охрименко Г.И. Водорастворимые полимеры. Л.: Химия, 1979. 144 с.

REGULATION OF THE PROPERTIES OF DRY MIXES USING POLYMER ADDITIVES

V.V. Belov, M.A. Smirnov

Abstract. The paper deals with the modification and regulation of dry building cement-sand mixtures by introducing polymer additives of various origins into their composition. Polymer additives are introduced into dry mixes with plasticizer and ground limestone as dispersions with mixing water at the construction site, which along with meeting high ecological standards, make them widespread in the compositions of dry mixes.

Keywords: dry building cement-sand mixtures, polymer additives, polyvinyl alcohol, ground limestone, plasticizing effect.

Об авторах:

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, Тверь. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

СМИРНОВ Матвей Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, Тверь. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

About the authors:

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

SMIRNOV Matvey Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ ФИБРОБЕТОН ДЛЯ ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

К.А. Васючков, В.И. Трофимов

© Васючков К.А., Трофимов В.И., 2022

Аннотация. В статье представлен анализ литературных источников с целью проведения дальнейшего исследования в области применения фибры в бетонах. Рассмотрен вопрос повышения физико-механических характеристик бетона за счет вовлечения фибры в совместную работу фибробетона. Изучены основные свойства мелкозернистого заполнителя и базальтовой фибры. Подтверждена эффективность использования добавок и модификаторов в качестве материала для повышения морозостойкости бетонов в водопропускных сооружениях Арктической зоны.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, фибра, прочность, адгезия, морозостойкость.

Введение

В современном мире скорость и качество производства какого-либо экономического продукта играют ключевую роль в развитии экономики страны в целом и предприятия в частности. Совершенствование технологии производства – главная составляющая повышения производительности и, как следствие, увеличения прибыли. Специфическим сектором производства выступает отрасль проектных работ, где сырьем является человеческий интеллект, а продукцией – качественный проект. При проектировании автомобильных дорог часто возникает необходимость устройства искусственных сооружений, таких как мосты, путепроводы, водопропускные трубы. Любое искусственное сооружение является сложной конструкцией, требующей точности расчетов и работы с большими объемами данных. Основная задача систем автоматизированного проектирования – повышение качества выпускаемой документации и производительности инженеров-проектировщиков. Непродуманность технологии организации работы может привести к отрицательному результату и свести на нет все преимущества автоматизированных систем. К водопропускной трубе, как и к любому другому элементу автомобильной дороги, предъявляются требования, касающиеся обеспечения надежности, долговечности и бесперебойности эксплуатации, а также безопасности движения транспортных средств.

Выполнение вышеперечисленных требований в большей мере осуществляется на стадии проектирования при соблюдении необходимой технологии строительства. Таким образом, очевидна большая ответственность инженера при принятии проектных решений. По данным статистики, трубы являются наиболее распространенным искусственным сооружением, встречающимся в среднем через каждые 1–1,5 км дороги. Согласно транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года, в эксплуатацию должно быть введено более 80 тыс. км новых дорог, что увеличит суммарную протяженность автомобильных дорог общего пользования до 1 350 тыс. км.

Анализ состава мелкозернистого бетона для Арктической зоны

Качество заполнителей, их минералогический и фракционный состав определяют, наряду с маркой цемента, качество бетонов. В работе были использованы пластифицирующие добавки Д-5, С-3 МУ, а для повышения морозостойкости и трещиностойкости была разработана полифункциональная воздухововлекающая и пластифицирующая добавка в бетоны марки ЖККА (бетоны на основе жирных высокомолекулярных кислот, хлористого аммония и карбамида) [1].

Казалось бы, использование в составе бетона крупных заполнителей в максимальном количестве обеспечивает наиболее высокую морозостойкость бетонов. Однако путем исследований было установлено, что мелкозернистый бетон более морозостойкий, чем крупнозернистый (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические свойства щебня из гравия для дорожных бетонов [2]

Наименование показателей	Значение показателей свойств щебня из гравия карьеров					Требования по ГОСТ 8267-93, ГОСТ 26633-91, СНиП 2.05.02-85
	Добровольненского	Ивановского	Усть-Джегутинского	Чапаевского	Дегтяревского	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
Содержание фракций в крупном заполнителе, %						
От 5 до 10 мм	24	21	31	17	22	15–25
От 10 до 20 мм	30	24	21	19	34	20–35
От 20 до 40 мм	46	54	48	74	44	40–65

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Содержание дробленых зерен, %						
	91,0	93,1	94,0	90,1	93,1	Не ниже 80
Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, %						
	16,2	21,9	19,4	14,8	18,9	Не более 25
Содержание зерен слабых пород, %						
	1,9	2,6	6,9	4,0	2,2	Не более 10
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %						
	0,7	0,5	0,6	0,3	1,0	Не более 1,0
Содержание глины в комках, %						
	0	0	0	0	0	Не более 0,25
Марка щебня по истираемости	И-I	И-II	И-II	И-II	И-II	Не ниже И-II
Марка щебня по дробимости	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	Не ниже 1 000

Морозостойкость щебня крупной фракции изменяется более резко в зависимости от водопоглощения, если сравнивать с более мелкими фракциями. Установлено, что морозостойкость щебня фракций 20–40, 10–20 и 5–10 мм имеет практически одинаковые значения при обеспечении одинаковых значений их водопоглощения, чего нельзя достичь при водонасыщении по стандартному режиму. Как следует из табл. 1, марка щебня по морозостойкости не соответствует требованиям к заполнителям для дорожных бетонов. Одним из путей повышения морозостойкости бетонов является введение в бетонную смесь воздухововлекающих добавок. Для повышения прочности, морозостойкости, улучшения технологических свойств и ускорения твердения в бетоны вводят также комплексные добавки.

Важнейшим показателем, определяющим долговечность бетонных дорожных покрытий, является их трещиностойкость. Введение пластифицируемой добавки Д-5 практически не влияет на температуру растрескивания T_p и позволяет снизить расход цемента, несколько увеличить объем вовлеченного воздуха в бетонной смеси. Введение пластифицирующих добавок С-ЗМУ и ЖККА позволяет снизить расход цемента и увеличить объем вовлеченного воздуха в бетонной смеси. Особенно значительное понижение T_p бетонов наблюдается при введении разработанной воздухововлекающей и пластифицирующей добавки ЖККА [4, 5].

Снижение расхода цемента и прочности бетона, как и увеличение объема вовлеченного воздуха, приводит к снижению модуля упругости

бетона, что проявляется в снижении T_p . При замерзании вода увеличивается в объеме, коэффициент теплового расширения бетона снижается, вода переходит в твердое состояние, оказывает дополнительный омоноличивающий эффект и увеличивает прочность бетона. При водопоглощении бетона IV замерзающая вода из-за невозможности перемещения в свободные поры оказывает давление на стенки пор и приводит к образованию микротрещин в бетоне, снижающих его прочность (табл. 2).

Таблица 2

Свойства мелкозернистых бетонных смесей и бетонов [6]

№ составов	Осадка конуса, см	Жесткость, t, c	Прочность, МПа		Морозостойкость, циклы	$T_p, ^\circ C$	Объем вовлеченного воздуха в бетонной смеси, %
			При сжатии	При растяжении			
1	2	6	39,9	5,3	109	+2	1,8
2	3	7	40,2	5,5	114	+1	2,1
3	2	7	41,7	5,9	342	-4	3,8
4	3	3	42,0	5,9	461	-8	6,5
5	3	7	41,2	5,3	136	+2	1,9
6	3	8	42,4	5,3	140	+1	2,0
7	2	6	42,0	5,4	476	-4	3,7
8	3	6	42,8	5,4	509	-8	6,6
9	2	6	39,5	5,3	96	+2	1,8
10	3	7	40,4	5,4	109	0	2,9
11	3	7	41,0	5,5	338	-5	3,6
12	2	6	41,4	5,5	429	-8	6,5
13	4	7	40,4	5,3	120	+2	1,9
14	3	7	42,1	5,4	127	+1	2,0
15	3	7	42,6	5,4	409	-5	3,9
16	2	6	43,0	5,6	506	-8	6,2
17	2	6	40,4	5,3	117	+2	2,0
18	2	5	41,0	5,3	120	+1	2,3
19	3	6	42,6	5,4	392	-4	4,0
20	3	7	41,9	5,4	510	-8	6,7
Нормативные пределы по ГОСТ 25192, ГОСТ 26633, СНиП 2.05.02-85, ВСН 139-80							
–	2–4	5–8	Не менее В30	Не менее $R_{изг}$ 50	Не менее 150	–	2–7

Анализ применения базальтовой фибры в бетонах

Одним из перспективных способов повышения прочностных характеристик бетона является дисперсное армирование. В настоящее время используют широкий спектр армирующих компонентов. При этом эффективность дисперсного армирования бетона и строительных растворов напрямую зависит от правильного выбора вида волокон, который осуществляется в соответствии с функциональным назначением армируемого материала.

Получение эффективных строительных материалов и изделий, к которым сегодня предъявляются все более высокие требования, может быть достигнуто путем применения технологий, в которых используются композиционные материалы. Одним из перспективных конструкционных материалов являются дисперсно-армированные бетоны. В таких материалах сочетаются матрица, обладающая сравнительно небольшой прочностью при растяжении, и волокна, характеризующиеся значительным сопротивлением разрыву и более высоким (по сравнению с матрицей) модулем упругости.

Как правило, потенциал дисперсного армирования полностью не реализуется ввиду малой эффективности или из-за чрезвычайно высокой стоимости компонентов для микроармирования бетонов.

Так, стальная фибра имеет малую удельную поверхность, полипропиленовая фибра – невысокую адгезию к цементному камню, органические волокна – недостаточную прочность, а кевларовые и карбоновые волокна – завышенную стоимость. В данном случае очевидно, что наиболее эффективным компонентом для микроармирования цементных композитов может стать базальтовое волокно. Такой выбор связан с его природными свойствами, простотой производства и технологическими особенностями применения [7, 8].

Базальтовое волокно по прочности превосходит сталь и за счет малого диаметра (5–12 мкм) обладает гораздо большей поверхностью сцепления с цементным камнем, имея с ним химическое сродство. При этом относительное удлинение при разрыве базальтовой фибры в 2 раза ниже, чем при разрыве стальной, что позволяет ей более эффективно препятствовать образованию микротрещин в бетоне при нагружении.

Тем не менее недостаточная изученность вопросов стойкости волокон в цементных системах ограничивает область и объем применения фибробетона в строительстве. В ходе исследований, проведенных учеными из БГТУ им. В.Г. Шухова, было установлено, что высокие эксплуатационные характеристики фибробетонов на основе армирующих волокон различного происхождения позволяют рекомендовать данные материалы для устройства дорожных покрытий.

Для анализа щелочестойкости базальтового волокна в цементной системе волокно помещали в смоделированную среду протекания

гидратационных процессов. В качестве агрессивной среды использовали цементное молочко с рН 12,9. В указанный раствор вводили распущенное волокно. Концентрацию базальтового волокна в растворе выбирали с учетом предельного содержания фибры в цементных композитах (3–12 % массы вяжущего), установленного на основании анализа литературных данных. Концентрация составляла 7 %. Образцы подвергали выдержке при комнатной температуре в течение 7, 14, 28 и 72 сут [9–11].

После 28 сут выдержки в растворе потеря массы составила около 30 %. Длительное хранение фибры (72 сут) в растворе приводит к потере массы до 50 %. Изложенные факты согласуются с результатами микроструктурных исследований базальтовых волокон. Значительное выщелачивание исходных алюмосиликатных материалов после выдерживания в течение 28 сут в щелочной среде цементного молочка способствует появлению на поверхности характерных следов коррозии, что отрицательно сказывается на армирующей функции анизотропного компонента цементной матрицы.

Далее образцы проходили испытание на щелочестойкость путем выдержки волокна в растворе цемента, приготовленном по ранее описанной методике, в течение 3, 7, 14 и 28 сут (рис. 1).

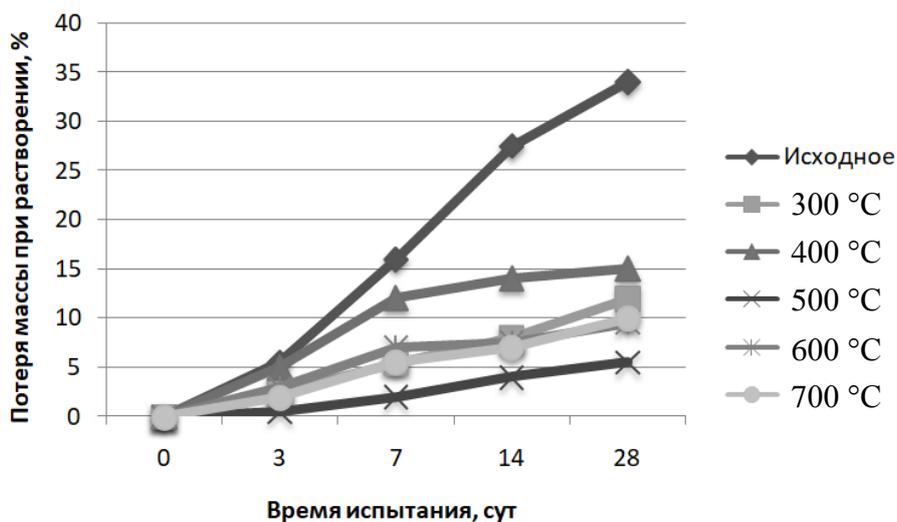


Рис. 1. Потеря массы волокна при растворении в зависимости от времени испытания [13]

В статье [13] установлено, что максимальной щелочестойкостью отличаются образцы, обработанные при температуре 500 °C. Потеря массы при выдержке в щелочном растворе после 28 сут в данном случае составляет около 5 %, тогда как исходное волокно за это время теряет более 30 % начальной массы [12–14]. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о существенном влиянии способа введения волокна и вида пластификатора на физико-механические свойства мелкозернистого бетона.

Предварительное распушение волокна в воде затворения в присутствии нафталинформальдегидного пластификатора (СП-1) (рис. 2, 2-й способ) приводит к повышению прочности при сжатии на 24 % и при изгибе на 30 % по сравнению с составами, полученными одновременным смешением всех компонентов (рис. 2, 1-й способ). Это обусловлено адсорбцией пластификатора на поверхности базальтового волокна и ее гидрофилизацией, что приводит к формированию сольватной оболочки на поверхности волокна и его равномерному распределению сначала в воде, а впоследствии и в растворяющей смеси.

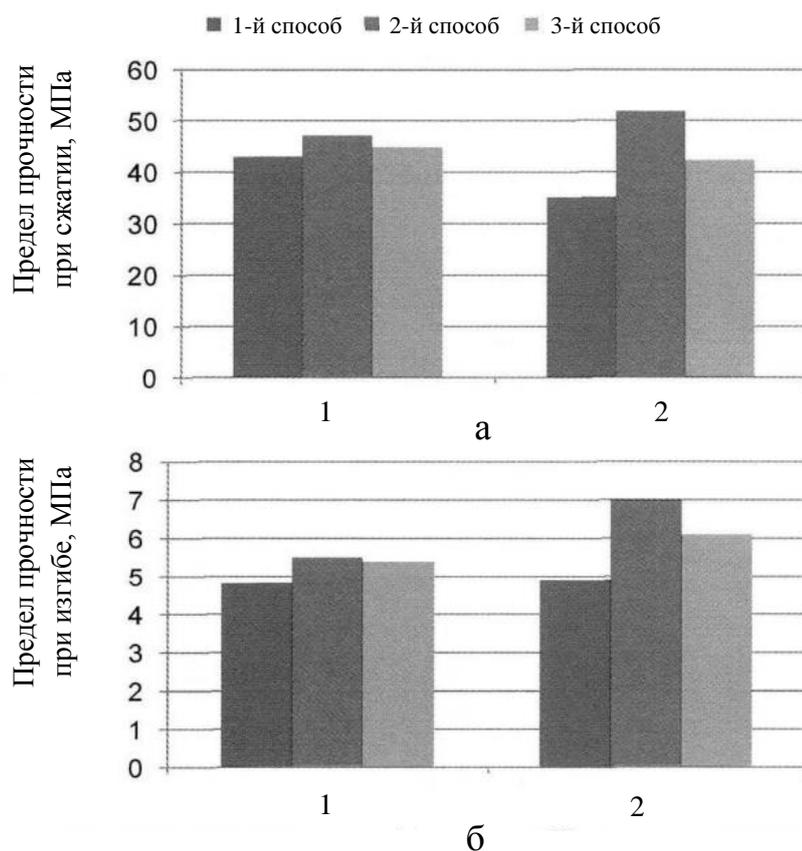


Рис. 2. Предел прочности при сжатии (а) и изгибе (б) в зависимости от способа введения волокна и вида пластификатора:
1 – Sika ViscoCrete; 2 – СП-1

При использовании поликарбоксилатного пластификатора (Sika ViscoCrete 125 Powder) наблюдается незначительное изменение прочностных характеристик бетона независимо от способа введения волокна. При этом использование нафталинформальдегидной добавки (СП-1 производства «Полипласт») позволяет увеличить прочности при сжатии на 10 % и при изгибе на 21 % по сравнению с составами на основе поликарбоксилатного пластификатора [15].

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что наиболее подходящим составом цементобетонного покрытия следует считать мелкозернистый заполнитель с воздухововлекающими и пластифицирующими добавками. Мелкозернистый заполнитель (щебень) обладает более однородной структурой, поверхность зерен заполнителя в котором равномерно покрывается цементным тестом при приготовлении бетонной смеси. Проблема повышения морозостойкости бетона на мелких заполнителях решена за счет применения воздухововлекающей и пластифицирующей добавки ЖККА. С-ЗМУ и ЖККА увеличивают объем вовлеченного воздуха в бетонной смеси и практически не влияют на T_p . Введение пластифицирующих добавок С-ЗМУ и ЖККА позволяет снизить расход цемента и увеличить объем вовлеченного воздуха в бетонной смеси.

Успешное использование минеральных волокон для армирования цементных бетонов невозможно без детального исследования процессов взаимодействия в системе «цементный камень – минеральное волокно» и способов защиты волокна от выщелачивания. Из этого можно сделать вывод, что вопросы, связанные с дисперсным армированием, требуют дальнейшего изучения.

В настоящее время на севере и северо-востоке страны (в Норильске, Новосибирске, а также близлежащих городах) расположено множество предприятий, имеющих реальную возможность строить дороги из цементобетонов повышенной морозостойкости и прочности.

Библиографический список

1. Трофимов Б.Я., Шулдяков К.В., Махмудов А.М. Влияние на долговечность бетона микроструктурных гидратных фаз // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 3. С. 8–11.

2. Середа О.А. Дорожные цементобетоны на некондиционных заполнителях Северного Кавказа: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05. Белгород, 2009. С. 7–15.

3. Любченко А.М., Карабанова У.С., Ермилов О.В. Проектирование автомобильных дорог в условиях вечной мерзлоты // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО «ГИПРОДОРНИИ». 2013. № 4. С. 20–27.

4. Ерохина Л.А., Майорова Н.С. Исследование структуры тяжелого бетона с целью повышения его морозостойкости // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. № 42 (61). С. 58–68.

5. Arosio V., Arrigoni A., Dotelli G. Reducing water footprint of building sector: concrete with seawater and marine aggregates // The International Conference in Sustainable Built Environment. 2019. V. 323. P. 323–334.

6. Ворожейник В.М. Проблемы повышения долговечности цементобетона // Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. 2017. № 4. С. 107–109.
7. Актуальность и перспективы применения цементобетона в дорожном строительстве / М.Я. Якобсон [и др.] // Системные технологии. 2016. № 18. С. 132–141.
8. Ким Н.Ж., Украинский И.С. Возведение водопропускных сооружений в районах с многолетней мерзлотой // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2020. № 1. С. 143–146.
9. Underwater abrasion of steel fiber-reinforced self-compacting concrete / S.R. Abid, A. Hilo, N.S. Ayoob, Y.H. Daek // Case Studies in Construction Materials. 2019. V. 11. P. 1–17.
10. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологий // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 6. С. 25–33.
11. Бабаев В.Б. Мелкозернистый цементобетон с использованием базальтового волокна для дорожного строительства; автореф. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук: 05.23.05. Белгород, 2013. 21 с.
12. Калгин Ю.И., Черкасов С.В., Строкин А.С. Выявление оптимальных способов формирования и твердения сырца мелкоштучных изделий из мелкозернистого цементобетона для устройства дорожных покрытий // Инженерные системы и сооружения. 2014. № 3–4 (17). С. 54.
13. Елин А.С. Техничко-экономическое сравнение строительства и эксплуатации дорожной одежды из асфальтобетона и цементобетона // Аспирант. Приложение к журналу «Вестник Забайкальского государственного университета». 2018. № 1 (23). С. 129–131.
14. Redaelli E., Carsana M., Lollini F. Sustainable concrete with seawater and corrosion resistant // Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures. West Yorkshire: University of Leeds, 2018. P. 382–389.
15. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н. Влияние минеральных микронаполнителей на свойства композиционных строительных материалов. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2013. 124 с.

FINE-GRAINED FIBER CONCRETE FOR CULVERTS IN THE ARTIC ZONE

K.A. Vasyuchkov, V.I. Trofimov

***Abstract.** The article provides an analysis of literary sources for the purpose of further research in the field of fiber application in concrete. The issue of increasing the physical and mechanical characteristics of concrete due to the involvement of fiber in the joint work of fiber-reinforced concrete is considered. The main properties of fine-grained aggregate and basalt fiber were studied. The*

effectiveness of the use of additives and modifiers as a material for increasing the frost resistance of concrete for culverts in the Arctic zone has been confirmed.

Keywords: *fine-grained concrete, fiber, strength, adhesion, frost resistance.*

Об авторах:

ВАСЮЧКОВ Константин Алексеевич – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: kostya-vasyuchkov@mail.ru

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: vitrofa@mail.ru

About the authors:

VASYUCHKOV Konstantin Alekseevich – Master Student of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: kostya-vasyuchkov@mail.ru

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vitrofa@mail.ru

УДК 699.844

САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ БЕТОН НА ОСНОВЕ РЕЦИКЛИНГА БЕТОННОГО ЛОМА

Д.С. Городничев, Ю.Ю. Курятников

© Городничев Д.С., Курятников Ю.Ю., 2022

Аннотация. *В статье рассмотрены основные аспекты получения эффективного состава самоуплотняющегося бетона (СУБ). Описано принципиальное отличие СУБ от тяжелого бетона, указаны преимущества и недостатки СУБ, область его применения. Сделан вывод о возможности получения СУБ, обладающего высокими прочностными и деформационными характеристиками, с содержанием вторичного щебня в качестве заполнителя.*

Ключевые слова: *бетонный лом, рециклинг, утилизация, вторичное сырье, переработка.*

Особенности свойств самоуплотняющегося бетона (СУБ)

Создание СУБ связано с разработкой японскими учеными и внедрением в практику нового поколения суперпластификаторов на основе полиакрилатов и поликарбоксилатов. Значительный вклад в развитие суперпластификаторов нового поколения (МАРЕИ) и бетонов на их основе внесли итальянские ученые научной школы Марио Коллепарди. Первая Международная конференция по изучению свойств СУБ прошла в 1998 году с участием 150 ученых и инженеров из 15 стран. Высокая эффективность нового материала способствовала созданию рабочей группы специалистов RILEM (1996 год) из 8 стран для разработки рекомендаций по использованию СУБ. В 2004 году был организован технический комитет 205-DSC «Долговечность самоуплотняющегося бетона», председателем которого стал профессор Д. Шуттер. В работе этого комитета задействовано 25 лабораторий из 14 стран [1].

Как показывает опыт использования СУБ на уникальных объектах в Японии, Индии, Объединенных Арабских Эмиратах, его класс составлял В60–В80, подвижность – П5, морозостойкость – не менее F400, водонепроницаемость – не менее W6, т. е. это особо прочный бетон с большим содержанием цемента высоких марок [2].

Основные компоненты СУБ те же, что и при производстве обычного бетона. Отличие лишь в их соотношении, а также в использовании тонкодисперсных добавок наполнителей, которые придают бетону способность к самоуплотнению. В то же время для достижения высоких технологических и эксплуатационных характеристик СУБ предъявляются более жесткие требования к производственным материалам. Самоуплотняющийся бетон включает компоненты:

- портландцемент;
- минеральную добавку – наполнитель;
- мелкий заполнитель;
- крупный заполнитель;
- добавку-гиперпластификатор;
- воду.

Определяющими особенностями подобных смесей является их высокая удобоукладываемость, сочетающая две противоположные по своей природе характеристики: низкое предельное напряжение сдвигу, которое предопределяет высокую текучесть смеси; повышенную вязкость, которая обеспечивает стабильность и связность смеси.

Структура цементного камня модифицированного СУБ представлена на рис. 1 и 2. В основной гелеподобной массе новообразований наблюдаются иглообразные кристаллы этtringита, заполняющие свободные полости. Этtringит образуется в свободных объемах цементирующего вещества. На электронных микрофотографиях образцов цементного камня с комплексным модификатором видно заполнение

пор гидросульфоалюминатом кальция. При этом формируются кристаллические новообразования значительно меньшей дисперсности, чем в составе без добавления комплексного модификатора. Увеличение концентрации гидросульфоалюмината кальция и удельной поверхности гидратных фаз как в общей структуре цементного камня, так и в дефектных областях пространственного скелета приводит к упрочнению материала [3].

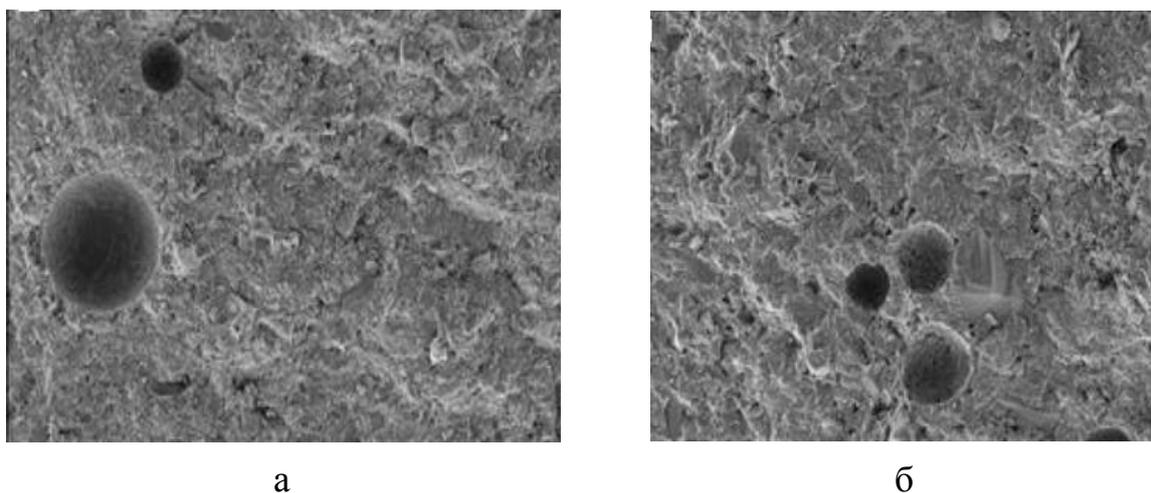


Рис. 1. Структура излома цементного камня нормального твердения (увеличение $\times 100$): а – без добавки; б – с комплексным модификатором [3]

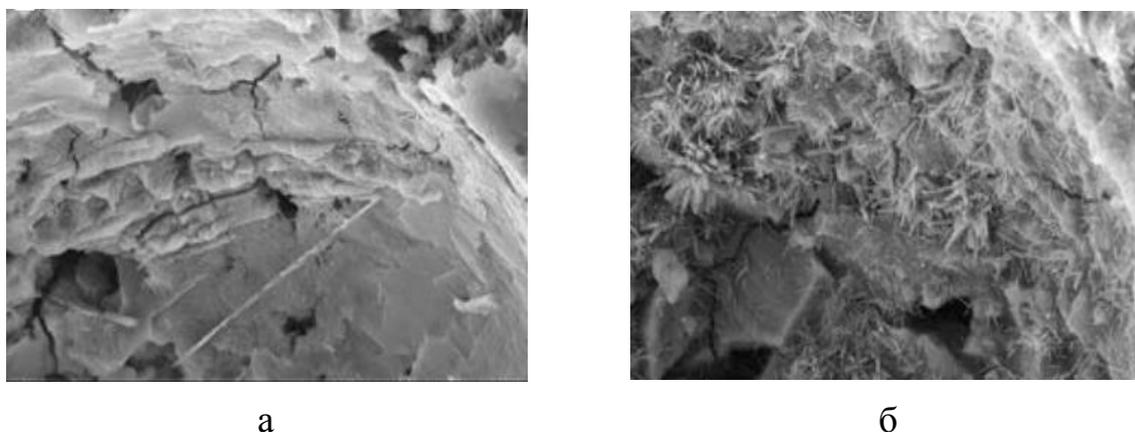


Рис. 2. Структура излома цементного камня нормального твердения (увеличение $\times 2\ 000$): а – скол образца без добавки; б – скол образца с комплексным модификатором [3]

К существенным преимуществам СУБ относят:
 способность самоуплотнения бетонной смеси под воздействием собственной массы;
 высокую подвижность бетонной смеси, которая сохраняется при ее длительной транспортировке;

отсутствие расслоения при соблюдении необходимых технологических требований и норм приготовления бетонных смесей.

Кроме того, СУБ (в отличие от вибрированного) обеспечивает более плотную структуру компонентов и большую прочность на сжатие. С экономической точки зрения использование СУБ приводит к сокращению трудовых затрат. Это обусловлено уменьшением времени на заливку и уплотнение бетона.

Недостатки СУБ:

повышенный коэффициент ползучести, но данный коэффициент находится в принятых допустимых пределах;

незначительно большая усадка, которая зависит от объема цементного вяжущего;

упругость ниже (до 10 %) обычного цементобетона, особенно мелкозернистого, что обусловлено повышенным содержанием сухих компонентов смеси мелкой фракции и малым количеством составляющих крупных фракций;

недостаточная изученность влияния гиперпластификаторов на цемент после затвердевания бетона с течением продолжительного времени эксплуатации;

сравнительно высокая стоимость.

Несмотря на недостатки, объекты, возведенные на основе СУБ, обладают повышенной прочностью и долговечностью [4].

Решаются указанные проблемы путем получения оптимального сочетания добавок-модификаторов, а при необходимости – совмещения с ними других органических и минеральных материалов, позволяющих управлять реологическими свойствами бетонных смесей и модифицировать структуру цементного камня на микроуровне так, чтобы придать бетону свойства, обеспечивающие эксплуатационную надежность и долговечность сооружений [5].

Помимо подбора оптимального содержания добавок и компонентов смеси, необходимо уделять внимание дисперсности мелкозернистых материалов. Анализ работ показывает, что наиболее эффективная тонкость помола наполнителя 550 м²/кг. Дальнейшее увеличение тонкости помола отрицательно влияет на структурообразование и не приводит к росту прочности. Максимальный прирост прочности порядка 25 %, в сравнении с чистым тонкомолотым портландцементом, достигается при введении наполнителя в количестве 10,5 %. Последующее увеличение содержания добавки в системе приводит к снижению прочности, что обусловлено разбавлением системы, а также увеличением водопотребности смеси [6].

Роль минерального наполнителя в цементном тесте и цементном камне для СУБ зависит от формы его частиц. Минеральный наполнитель округлой формы (песок) заметно повышает подвижность цементного теста, а пылевидная фракция гранитного отсева с частицами игловидной

формы сказывается на подвижности несущественно. Песчаные частицы образуют более плотную систему сложения, чем гранитные, и это сказывается на прочности затвердевшего цемента при сжатии. Однако при изгибе армирующее действие пылевидных частиц гранита положительно сказывается на прочности (при их содержании по массе 15 %). Установлена эффективность введения 10–20 % пылевидной фракции отсевов камнедробления гранита в качестве минерального наполнителя в состав вяжущего для изготовления строительных конструкций из СУБ, работающих на изгиб. Это обеспечит снижение себестоимости таких конструкций и решит проблему утилизации техногенного отхода [7].

На развитие и совершенствование технологического процесса производства бетонных смесей, формирования из них железобетонных конструкций оказывают влияние два ключевых фактора: с одной стороны, получение прочного и долговечного бетона, с другой – снижение трудовых и энергетических затрат при его производстве. На протяжении продолжительного периода эти два фактора оставались противоречивыми, поскольку для получения высокопрочных и долговечных бетонов их составы проектировали с низким значением водоцементного отношения, что обуславливает получение жестких бетонных смесей, требующих повышенных энергетических затрат как при перемешивании, так и при укладке и вибрационном уплотнении в формах. Последнее существенно повышает трудоемкость технологического процесса. В то же время возможность получения высокоподвижных бетонных смесей обеспечивалась в основном за счет увеличения расхода воды затворения, что приводит к снижению прочности и долговечности бетона. Эти противоречия в значительной степени были разрешены при разработке эффективных пластификаторов и суперпластификаторов в середине 70-х годов XX столетия.

В наши дни все большее применение в технологии бетонных работ находят химические добавки высокоэффективных гиперпластификаторов на поликарбоксилатной и полиакрилатных основах вследствие их более высокого пластифицирующе-водоредуцирующего действия в бетонных смесях по сравнению с обычными пластификаторами на основе лигносульфонатов, полиметиленафталинсульфонатов и полиметилена-меламинсульфонатов.

Преимущество гиперпластификаторов перед другими добавками заключается в водопонижающей способности, которая достигает 40 % в отличие от суперпластификаторов. За счет этого обеспечивается получение бетонов с высокими показателями прочности, морозостойкости, водонепроницаемости и долговечности. Данную способность можно использовать и для экономии цемента, и для получения высокоподвижных СУБ, появление которых вообще стало возможным только благодаря гиперпластификаторам. Как и у любых других добавок, у

них есть свои недостатки, прежде всего высокая стоимость. Она в пять раз выше, чем стоимость суперпластификаторов [7]. Однако даже при такой разнице применение гиперпластификаторов может быть экономически оправданным и иногда приводит к снижению стоимости бетонной смеси.

Организация переработки отходов бетонного лома

Истощение природных заполнителей стало широко распространенной проблемой. Появилась необходимость в поиске альтернативного заполнителя. В последние годы исследования бетона с содержанием в нем крупного заполнителя из бетонного лома получили значительное развитие. Экономические перспективы использования бетонного лома, а также устойчивый рост бетонных отходов способствовали продвижению исследований свойств крупного заполнителя, полученного при дроблении фрагментов разрушенных зданий и сооружений. После многолетних научных поисков полноценным признанием бетонного щебня в качестве полноправного строительного материала стал опубликованный в 2014 году ГОСТ 32495-2013 «Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона». Этим документом было введено определение бетонного щебня. Щебень из дробленого бетона – это неорганический зернистый сыпучий материал с зернами крупностью свыше 5 мм, получаемый из дробленого бетона при разрушении зданий и сооружений, мостовых конструкций, покрытий из бетона в дорожном строительстве, а также старых покрытий взлетно-посадочных полос и перронов аэродромов, бетонных плит различного назначения и применяемый в качестве крупного заполнителя для бетонов и изготовления песчано-щебеночных смесей. Область применения данного материала – для изготовления бетонов класса прочности В22,5 (М300) и ниже, растворов различного назначения; устройства оснований автомобильных дорог, оснований взлетно-посадочных полос, перронов аэродромов, обочин; благоустройства и планировки территорий. Положения стандарта практически уравнивают бетонный и природный щебень, поскольку распространяют действие ГОСТов о технических требованиях, правилах приемки, методах испытаний и химического анализа. Данный стандарт поставил точку в прениях ученых по вопросу применения бетонного щебня. Теперь его применение, а также использование песка и песчано-щебеночных смесей, полученных из бетонного и железобетонного боя, в строительной индустрии законодательно утверждено [8].

Отходы строительной промышленности дешевле природного сырья. Часто они почти сразу (после минимальной переработки) годятся для применения в качестве заполнителей. Чтобы перерабатывать отходы бетона и железобетона, используют дробильные установки, принцип действия которых достаточно прост. Установка, как правило, состоит из

двух или трех конструктивных элементов. В первом осуществляются приемка и первичная переработка поступающих отходов. Для этого используются приемный бункер, пластинчатый транспортер, пост предварительной сортировки. Затем отходы поступают в дробилку, где измельчаются, а потом отправляются в магнитный сепаратор (в нем извлекаются все металлические включения). Полученная масса поступает на грохот и разделяется на фракции. Количество фракций зависит от количества ярусов грохота. Крупные обломки, не прошедшие грохот, возвращаются обратно в дробилку или же подаются во вторую часть установки, которая по составу оборудования аналогична первой [9].

Рециклинговый (вторичный) щебень имеет более низкую прочность, а также истинную и насыпную плотность по сравнению с гранитным (контрольным) щебнем. Кроме этого, рециклинговый (вторичный) щебень характеризуется более высокой пористостью и пустотностью, а также более высоким водопоглощением по сравнению с гранитным (контрольным). Снижение прочности рециклингового (вторичного) щебня связано с присутствием в его составе цементно-песчаного камня [10]. Однако улучшить характеристики вторичного щебня позволяет его активация, которая состоит в разрушении слабых зерен щебня или удалении остатков цементного камня, что приводит к повышению технических характеристик бетонов за счет улучшения качества контактной зоны. В качестве методов активации в основном используются механические и химические. Механический метод заключается в самоизмельчении при перемешивании щебня в смесительных установках или его обработке в шаровых мельницах с металлическими шарами. Более высокие показатели были достигнуты в результате обработки дробленого бетона со стальными шарами после предварительного низкотемпературного обжига при температуре 600–800 °С. В этом случае был получен щебень, практически свободный от растворной составляющей с показателями (по дробимости, морозостойкости и т. п.), близкими к аналогичным показателям исходного натурального щебня. Удаление части ослабленных зерен, полученных в процессе дробления отходов из бетона и железобетона, может производиться предварительным интенсивным сухим перемешиванием крупного заполнителя в бетоносмесительных устройствах. Химический метод заключается в «вымывании» из вторичного щебня остатков цементного камня при помощи безводных и гидратированных оксидов, что также ведет к повышению качества щебня из дробленого бетона [11].

Замена природного щебня вторичным при одинаковых расходах цемента, параметрах бетонной смеси и условиях твердения приводит к снижению до 30 % средней плотности и прочности бетона после тепловлажностной обработки на 1-е сутки твердения, марочной прочности – до 15 % (в зависимости от класса бетона). Снижение средней

плотности и прочности свидетельствует о более пористой структуре вторичного щебня и подтверждается данными его водопоглощения. Тем не менее при использовании вторичного щебня фракции 5–20 мм и щебеночно-песчаной смеси фракции 0–60 мм для всех исследуемых составов обеспечивается требуемая марочная прочность бетона. Чтобы минимизировать отрицательное влияние на прочность бетона, проводили механоактивацию вторичного щебня путем подбора оптимальных режимов дозирования и перемешивания в смесителе. Механоактивация вторичного щебня дает рост прочности бетона до 23 % без дополнительных капиталовложений.

Механизм действия механоактивации вторичного щебня можно объяснить следующим образом. При предварительном перемешивании вторичного щебня в сухом виде от него отделяются слабые частицы, которые оказывают отрицательное влияние на процессы, происходящие в контактной зоне «цемент – заполнитель». При перемешивании вторичного щебня и воды мелкодисперсные пылевидные частицы переходят в водную фазу. При добавлении в смесь цемента и ее перемешивании частицы цемента находятся во взвешенном состоянии в воде. Далее происходит распределение мелкодисперсных пылевидных частиц между частицами цемента. Затем система «пылевидные частицы – цемент» осаждается на поверхность зерен заполнителя, т. е. мелкодисперсные пылевидные частицы включаются в цементную матрицу и не образуют прослойку между цементным камнем и зернами заполнителя, что ведет к повышению прочности бетона [12].

Вторичный щебень (или щебень из дробленого бетона) содержит значительное количество растворной составляющей. Кроме того, контактная зона между исходным зерном щебня и раствором, являющаяся наименее прочным и наиболее пористым звеном в бетоне, значительно снижает физико-механические показатели такого щебня. Получается, что вторичный щебень, который до дробления (во время эксплуатации) имел морозостойкость 200 циклов, изменяется до морозостойкости в 15 циклов.

Замена природного щебня вторичным дает заметный экономический эффект. Он достигается за счет низкой себестоимости вторичного щебня, которая складывается из оплаты труда рабочих, затрат на содержание и эксплуатацию оборудования для дробления. Средняя себестоимость вторичного щебня – 553,29 руб. на т. Цена природного щебня складывается из закупочной цены и доставки и в среднем составляет 1 046 руб. за т, что в 2 раза выше цены вторичного щебня. Себестоимость произведенного бетона на вторичном щебне дешевле аналогичного на природном. В среднем эта разница составила 588 руб. за куб бетона [14].

В целом рециклинговый (вторичный) щебень по основным нормируемым показателям соответствует требованиям ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ.

Технические условия (с Изменениями № 1–4)» и пригоден для изготовления тяжелых бетонов общестроительного назначения.

Заключение

Для проектирования составов СУБ важной является задача получения оптимального гранулометрического состава смеси с целью обеспечения наиболее плотной упаковки зерен. Кроме того, необходимо подобрать эффективный микронаполнитель в сочетании с гиперпластификатором для обеспечения требуемых физико-механических свойств СУБ. При использовании в качестве крупного заполнителя вторичного щебня, полученного при переработке бетонного лома, нужно определить оптимальный способ его подготовки, оптимальную крупность и содержание в составе бетона, чтобы минимизировать негативное влияние на свойства.

Библиографический список

1. Самоуплотняющиеся бетоны с применением отходов растениеводства / Р.С. Федюк [и др.] // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15. № 2. С. 294–301.

2. Николенко Ю.В., Сташевская Н.А., Окольников Г.Э. Применение самоуплотняющихся бетонов в монолитном домостроении // Системные технологии. 2017. № 23. С. 38–42.

3. Богданов Р.Р., Ибрагимов Р.А. Состав, свойства и микроструктура модифицированного самоуплотняющегося бетона для гидроизоляции плоских кровель зданий // Строительные материалы. 2017. № 7. С. 39–43.

4. Муртазаева Э.Д., Тутаев М.С., Умарова М.С. К вопросу получения самоуплотняющихся бетонов с использованием вторичного сырья // Молодежь, наука, инновации: сборник статей IX Все-российской научно-практической конференции. Грозный: АЛЕФ, 2020. С. 212–215.

5. Коваленко А.В., Юзюк А.Ю. Оптимизация состава самоуплотняющегося бетона для ремонта гидротехнических сооружений // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2017. № 2 (104). С. 66–68.

6. Zhu W., Bartos P.J.M. Permeation properties of self-compacting concrete // Cement and Concrete Research. 2003. V. 33. № 6. P. 921–926.

7. Беднев Д.С., Добродеева А.С., Макеев А.И. Применение пылевидной фракции отсевов камнедробления для самоуплотняющихся бетонов // Вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Студент и наука. 2020. № 1 (12). С. 99–105.

8. Красовский П.С., Ельцова Н.А., Сижук А.Т. Эффективность самоуплотняющихся бетонов путем использования гиперпластификаторов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2018. Т. 1. С. 377–380.

9. Гриценко Д.В. Анализ нормативно-технической базы для применения дробленого щебня из бетона в строительном производстве // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: материалы конференции. Белгород: БГТУ, 2021. С. 1386–1390.

10. Луканин А.В. Полная переработка бетонолома во вторичный щебень // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2018: сборник материалов конференции. Севастополь: СевГУ, 2018. С. 725–729.

11. Фахратов М.А., Кужин М.Ф. Организация переработки отходов бетона и вторичное использование бетонов в строительстве // Системные технологии. 2018. № 1 (26). С. 100–103.

12. Курятников Ю.Ю. Способы переработки бетонного лома для получения вторичного щебня в качестве минерального сырья // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2020. № 4 (8). С. 103–109.

13. Bordelon A., Cervantes V., Roesler J.R. Fracture properties of concrete containing recycled concrete aggregates // Magazine of Concrete Research. 2009. V. 61. № 9. P. 665–670.

14. Беппаев З.У., Вернигора С.А., Колодяжный С.А. Исследование основных физико-механических характеристик рециклингового щебня для его применения в качестве крупного заполнителя при производстве тяжелых бетонов общестроительного назначения // Вестник НИЦ «Строительство». 2018. № 4 (19). С. 18–32.

15. Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate / M.D. Safiuddin, U.J. Alengaram, M.A. Salam, M.Z. Jumaat, F.F. Jaafar, H.B. Saad // Materials Research. 2011. V. 14. № 2. P. 248–255.

SELF COMPACTING CONCRETE WITH RECYCLED COARSE AGGREGATE

D.S. Gorodnichev, Y.Y. Kuryatnikov

***Abstract.** This article discusses the main aspects of obtaining the characteristics of self-compacting concrete (SCC). The fundamental advantage of the SCC over the heavy concrete, the advantages and use of the SCC, the scope of its application are described. It is concluded that it is possible to obtain SCC, which has increased strength and deformation properties, with the content of recycled crushed stone as an aggregate.*

***Keywords:** concrete scrap, recycling, utilization, secondary raw materials, processing.*

Об авторах:

ГОРОДНИЧЕВ Дмитрий Сергеевич – магистрант 2-го курса, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: gorodnichev.m16@mail.ru

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: yuriy-@yandex.ru

About the authors:

GORODNICHEV Dmitry Sergeevich – 2nd year Undergraduate Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: gorodnichev.m16@mail.ru

KURYATNIKOV Yury Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

УДК 691.535

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИБРЫ ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

А.Р. Егоров, В.И. Трофимов

© Егоров А.Р., Трофимов В.И., 2022

***Аннотация.** В статье представлен литературный обзор статей по проблеме применения в бетонах фибры различного происхождения. Описаны разработки ученых в области повышения физико-механических характеристик фибробетона. Проанализирована возможность увеличения ударостойкости бетона за счет дисперсного армирования. Доказана эффективность армирования мелкозернистого бетона низко модульными полимерными волокнами. Рассмотрено преимущество аморфнометаллической фибры перед обычной фиброй из проволоки. Отмечено, что для повышения прочности следует применять высоко модульные волокна – стальные, углеродные, базальтовые, а для повышения деформируемости, снижения хрупкости использовать низко модульные – полипропиленовые волокна. Сформулированы направления для дальнейших исследований.*

***Ключевые слова:** бетон, фибра, прочность, адгезия, высоко модульная фибра, низко модульная фибра.*

Фибробетон – это бетон, армированный дисперсными волокнами (фибрами). Он обладает повышенной трещиностойкостью, прочностью на растяжение, ударной вязкостью, сопротивлением истиранию. В ряде случаев изделия и конструкции из фибробетона можно изготавливать без применения арматурных каркасов или сеток, и это в значительной степени упрощает производство [1].

Широко известно, что прочностные свойства фибробетона зависят от армирующих волокон, главным образом от их модулей упругостей. Кроме того, немаловажную роль играют геометрические размеры и формы волокон.

Повышение физико-механических характеристик фибробетона осуществляется за счет вовлечения фибры в совместную работу с бетонной матрицей при различных нагрузках. Это возможно путем сцепления фибры и цементного камня. Под сцеплением подразумевается способность фибры воспринимать напряжения при воздействии внешних нагрузок [2]. Сцепление между фиброй и цементным камнем по принципу действия можно разделить на два типа: адгезионное и механическое [3].

Адгезионным называется сцепление, образующееся при межмолекулярном взаимодействии в поверхностном слое между фиброй и бетонной матрицей. Оно в большей степени зависит от материала, из которого изготовлена фибра, и имеет максимальные значения для металлов [3].

Механическое сцепление возникает у фибры с непрямолинейной геометрической формой (выпуски, изгибы и т. п.), которая при внешней нагрузке перераспределяет усилие среза на бетонную матрицу. Механическое сцепление в значительно большей степени определяет эффективность работы фибры при нагружении [4].

Авторы статей [1–4] после исследований пришли к выводу, что низко модульная полипропиленовая фибра не способна повышать прочность бетона на сжатие, но может повышать прочность на растяжение при изгибе и предотвращать хрупкое разрушение фибробетона [5].

Высокая структурная вязкость фибробетонов, благодаря которой они приобретают значительную стойкость при динамических нагрузках, в том числе ударных, обусловила их применение в тяжелых эксплуатационных условиях, в которых первостепенными являются вопросы повышения функциональных характеристик и долговечности конструкций, а вопросы стоимости отходят на второй план. Таким образом, применение методов дисперсного армирования наиболее перспективно в области хрупких высокопористых материалов на минеральных вяжущих, таких как, например, ячеистый бетон, для которого фибровое армирование целесообразно во всех случаях [6]. В то же время исследования, проводимые в течение многих лет в России и за рубежом, убедительно показывают, что и в других случаях, независимо от средней плотности матрицы и вида применяемых волокон, ударостойкость бетона в

результате дисперсного армирования возрастает в несколько раз. При этом отмечается, что степень повышения сопротивляемости ударным и другим динамическим воздействиям определенным образом зависит от геометрических характеристик используемых волокон, их количества в смеси, дисперсности минеральных компонентов в составе матрицы, а также от технологии изготовления изделий [7]. Одновременно установлено, что при концентрации армирующих волокон в объеме тяжелого бетона в пределах $\mu = 1\text{--}3\%$ применение низко модульных полимерных волокон обеспечивает получение композита, не уступающего по ударостойкости сталефибробетону (при этом более экономичного). Тем не менее утверждается, что с точки зрения повышения ударостойкости бетона наиболее эффективны высоко модульные волокна. Данное положение отчасти подтверждается результатами наших исследований. Согласно им введение в состав плотного мелкозернистого бетона полимерных фибр с модулем упругости $E_b = 4\ 650$ МПа в количестве $1\text{--}2\%$ по объему приводит к увеличению его ударостойкости в $2\text{--}5$ раз, в то время как в ячеистом бетоне, по отношению к которому такие волокна являются высоко модульными, сопротивляемость продольному удару (при том же уровне армирования) может повышаться в 10 раз [8, 9].

Для более полного представления о влиянии вида, количества армирующих волокон и их физико-механических характеристик на ударостойкость мелкозернистого бетона были проведены экспериментальные исследования, которые позволили сделать выводы:

- 1) в пределах $\mu_0 = 1,5\text{--}3,0\%$ армирование мелкозернистого бетона низко модульными полимерными волокнами оказывается не менее эффективным, чем армирование стальной фиброй. При этом ударостойкость возрастает с увеличением относительной длины волокон;
- 2) при повышении концентрации фибр в смеси до $\mu_0 = 5\text{--}10\%$ значение их модуля упругости становится определяющим в обеспечении высокой ударостойкости фибробетона.

Недостаточное сцепление волокон в бетонной матрице является главной причиной неэффективной работы фибры. Волокна вырываются из бетонной матрицы и не воспринимают нагрузки.

Авторами настоящей статьи были исследованы фибробетоны, армированные аморфнометаллической и другими видами фибр. Аморфнометаллическая фибра имеет высокую прочность сцепления с бетонной матрицей и работает с ней до разрушения. Аморфнометаллическая фибра длиной 30 мм в виде пластины имеет боковую поверхность, в несколько раз превышающую поверхность обычной фибры из проволоки [12–14].

Вследствие армирования фибробетонов аморфнометаллической фиброй и стальной фиброй исследователи из лаборатории СПбГАСУ смогли повысить прочность на растяжение при изгибе в 2,7 раза [10].

Конкуренетоспособными аморфнометаллической фибре являются микросетки, многоанкерные и двухветвевые фибры [11]. Такие волокна не подвергаются коррозии в щелочной среде бетона, так как они изготовлены из полимера или композита. К тому же за счет повышенной прочности и повышенного сцепления они позволяют повысить прочность фибробетона.

Известно применение полиармирования фибробетона волокнами с высоким модулем упругости (стальными) и низким модулем упругости (полимерными). Такое армирование позволяет управлять комплексом физико-механических характеристик [10, 11].

В лаборатории СПбГАСУ проводились исследования по изучению эффективности полиармирования фибробетонов. В качестве высококомодульных волокон были использованы аморфнометаллические фибры, а в качестве низкокомодульных – полипропиленовые волокна. В результате такого соотношения был получен фибробетон с пониженным модулем упругости, обеспечивающим пониженную хрупкость материала, и с повышенной прочностью на растяжение при изгибе. Снижение модуля упругости обосновывается тем, что в состав смеси вводятся волокна с низким модулем упругости. Подобные исследования были выполнены в Австралии, где в качестве высококомодульного волокна применялась нейлоновая фибра, а в качестве низкокомодульного – полипропиленовая. Нейлоновая фибра повышала прочностные и деформационные свойства, а полипропиленовая защищала бетон от хрупкого разрушения [11].

Таким образом, при армировании бетона фиброй необходимо проводить исследования, касающиеся:

- 1) адгезионных свойств фибры с бетонами;
- 2) влияния фибры на физико-механические свойства фибробетонов;
- 3) подбора оптимальной концентрации фибры в бетоне.

Библиографический список

1. Борисюк А.П., Зятюк Ю.Ю. Исследование деформационных характеристик фибробетона со стальной фиброй // Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. № 3 (52). С. 160–168.
2. Фибробетонные конструкции с использованием полимерных волокон «ВСМ-БЕТОН» для объектов транспортного строительства / А.А. Савелев [и др.] // ЖБИ и конструкции. 2014. № 03. С. 94–99.
3. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 172–176.
4. Богданова Е.Р. Экспериментальные исследования бетона, дисперсно армированного синтетической полипропиленовой фиброй // Общетеchnические задачи и пути их решения. 2015. № 2. С. 91–98.

5. Пантелеев Д.А. Деформативные и прочностные характеристики полиармированного фибробетона // Известия КГАСУ. Строительные материалы и изделия. 2015. № 3 (33). С. 133–139.
6. Прочность и деформативность полиармированного фибробетона с применением аморфной металлической фибры / Ю.В. Пухаренко [и др.] // Строительные науки. 2016. № 1. С. 107–111.
7. Пухаренко Ю.В., Морозов В.И. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях // Вестник МГСУ. Строительное материаловедение. 2014. № 3. С. 189–196.
8. Толибова В.И. Полипропиленовая фибра – эффективная армирующая добавка // Научные исследования и разработки молодых ученых: сборник материалов XVII Международной молодежной научно-практической конференции. Новосибирск: ООО «Центр развития научного сотрудничества», 2017. С. 123–126.
9. Ключев С.В. К вопросу фибрового армирования бетонов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2018. № 3–4. С. 42–46.
10. Оценка долгосрочного изменения свойств сталефибробетонов с расширяющими добавками / М.С. Елсуфьева [и др.] // Строительные материалы. 2019. № 7. С. 21–23.
11. Прочностные характеристики фибробетона для тоннельных сооружений в условиях высоких температур / В.И. Голованов [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 2. С. 59–62.
12. Underwater abrasion of steel fiber-reinforced self-compacting concrete / S.R. Abid, A. Hilo, N.S. Ayoob, Y.H. Daek // Case Studies in Construction Materials. 2019. V. 11. P. 1–17.
13. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 77 (1). P. 90–100.
14. Water impact abrasion of self-compacting concrete / N.S. Ayoob, S.R. Abid, A.N. Hilo, T.H. Daek // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 4. P. 60–69.

USING FIBER AS REINFORCEMENT OF CONCRETE

A.R. Egorov, V.I. Trofimov

***Abstract.** The article presents a literary review of articles on the problem of the use of fibers of various origin in concrete. The developments of scientists in the field of improving the physical and mechanical characteristics of fiber concrete are presented. The possibility of increasing the impact resistance of concrete due to dispersed reinforcement analyze. Provides the effectiveness of*

the reinforcement of finegrained concrete with lowmodulus polymer fibers. The advantage of amorphous metal fiber over conventional wire fiber considers. Notice that to increase strength, use high-modulus fibers – steel, carbon, basalt, and to increase deformability – reduce brittleness, use lowmodulus – polypropylene fibers. Directions for further research formulates .

Keywords: concrete, fiber, strength, adhesion, highmodulus fiber, lowmodulus fiber.

Об авторах:

ЕГОРОВ Андрей Романович – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: akos1999@bk.ru

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: vitrofa@mail.ru

About the authors:

EGOROV Andrey Romanovich – Master Student of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: akos1999@bk.ru

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vitrofa@mail.ru

УДК 699.844

БАЗАЛЬТОВЫЙ ФИБРОБЕТОН С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ВОЗДУХОВОВЛЕЧЕНИЕМ

Н.А. Желев, М.А. Смирнов

© Желев Н.А., Смирнов М.А., 2022

***Аннотация.** В статье показаны влияние и характер вовлеченного воздуха и базальтовой фибры на свойства цементного бетона для дорожного покрытия. Проанализированы результаты различных исследований, связанных с вопросами влияния фиброволокна и воздухововлекающих добавок на долговечность и морозостойкость цементных композитов. Отмечены существующие противоречия. Приведены новые экспериментальные результаты, показывающие, что применение оптимального содержания базальтовой фибры в сочетании с*

воздухововлекающим агентом способствует повышению технико-эксплуатационных характеристик бетона. Установлено, что в поровой структуре бетонов с базальтовой фиброй и воздухововлекающей добавкой присутствуют более мелкие поры. Их распределение равномернее, а прочность бетона снижается меньше в сравнении со случаями, когда поры образованы за счет воздухововлекающей добавки без добавления дисперсно-армирующего волокна.

Ключевые слова: базальтовая фибра, воздухововлечение, дисперсное армирование, структурообразование, фибробетон, морозостойкость.

Введение

Автомобильные дороги составляют наиболее разветвленную часть транспортной инфраструктуры и выполняют самые разнообразные задачи (от обслуживания международных и межрегиональных перевозок до обеспечения подъезда к объектам, предприятиям, учреждениям, домам). Значительная часть малого и среднего бизнеса, занимающегося преимущественно перевозками небольших партий продукции или действующего в сфере услуг, тяготеет к использованию автомобильного транспорта.

На сегодняшний день количественные и качественные характеристики дорожной инфраструктуры не позволяют в полной мере удовлетворять спрос растущих сегментов национальной экономики, поддерживать должный уровень мобильности населения, обеспечивать конкурентоспособные позиции на мировом рынке транспортных услуг. Кроме того, в последние 5–7 лет около 40 % протяжения федеральных дорог имеют заметную колею, что является одним из признаков исчерпания несущей способности дорожной конструкции. Не обеспечена также и требуемая ровность дорожных одежд в продольном направлении. Постоянно растут объемы дополнительного ремонта автомобильных дорог.

Комплексной характеристикой качества дорожных материалов, которой в мировой практике дорожного строительства по-прежнему уделяется большое внимание, является долговечность – способность материала сопротивляться внешним и внутренним факторам в течение длительного времени и сохранять в эксплуатационный период времени на допустимом уровне структурные характеристики (параметры), которые сложились в технологический (предэксплуатационный) период.

Основные показатели качества бетона, влияющие на его долговечность:

- прочность,
- водопоглощение,
- износостойкость,
- морозостойкость.

Все показатели зависят не только от качества составляющих бетонной смеси, но и от формирующейся структуры, в первую очередь поровой. Управление характером поровой структуры бетона и его конечными качественными характеристиками можно эффективно осуществлять путем регулирования вида и количества применяемых химических добавок и дисперсно-армирующего волокна. Учитывая специфику базальтофибробетона, не менее важным критерием его долговечности следует считать сохранность армирующего волокна в цементной матрице.

Известно, что увеличение пористости бетона приводит к снижению его прочности, поэтому при подборе состава тяжелых бетонов стараются обеспечить максимальную плотность для затвердевших бетонов. Дорожные и аэродромные бетоны являются исключением из правил, поскольку в их состав вводят химические добавки, способствующие дополнительному воздухововлечению, что приводит к некоторому снижению прочности, но обеспечивает повышение морозостойкости. Принято считать, что увеличение содержания вовлеченного воздуха на 1 % приводит к снижению прочности бетона при сжатии на 4–5 % [1]. Следовательно, улучшить показатели можно за счет изменения свойств порового пространства. В статье [2], например, показано, что применение лигносульфонатных пластификаторов-модуляторов в комплексе с воздухововлекающей добавкой СНВ позволяет получать бетоны транспортного назначения с морозостойкостью выше, чем у бетонов, содержащих комплекс С-3+СНВ. Это, по предположению авторов, можно объяснить более мелкими и более равномерно распределенными пузырьками воздушной фазы.

Таким образом, важно не только вовлечение дополнительного количества воздуха, но и одновременная модификация поровой структуры с сохранением требований, предъявляемых к дорогам из бетонного покрытия, а именно показателей прочности при растяжении на изгиб и истираемости поверхностного слоя.

Говоря о повышении долговечности бетона, авторы исследования [3] отмечают, что не так много внимания уделяется влиянию структуры цементного камня на морозостойкость бетона, хотя и известно, что при естественном твердении сохраняется гелеобразная структура, более стойкая к морозной агрессии, чем более закристаллизованная структура, формирующаяся при пропаривании и автоклавировании. Аморфная структура обычного бетона сохраняется при снижении содержания свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ благодаря пуццоланизации и применению эффективного поликарбонатного пластификатора [3–4]. Авторы статьи [4] в своих исследованиях делают акцент на том, что долговечность бетона можно повысить за счет снижения капиллярных пор цементного камня путем пуццоланизации и, как следствие, повышения стабильности

тонкодисперсных гидратных фаз при циклическом замораживании. При этом авторы также ссылаются на то, что повышение химической стойкости бетона во многом может быть достигнуто при увеличении его плотности и введении пуццолановых добавок. Как показывают исследования С.Л. Исаченко и М.-Б.Х. Кодзоева [5], для получения бетонов с высокими показателями морозостойкости, которых невозможно добиться при плотных структурах бетона, необходимо применять либо гидрофобизирующие, либо воздухововлекающие добавки. Благодаря этому в бетоне образуется определенный резерв пор, который будет играть роль амортизатора при замерзании внутриспоровой жидкости. В то же время применение пуццолановых добавок, согласно статье [4], приведет лишь к снижению нижнего температурного порога бетона, которое в худшем случае повлечет за собой снижение показателей прочности и стойкости к агрессивным средам.

Целью исследований [5, 6] являлось изучение характера влияния воздухововлечения на свойства дисперсно-армированных бетонов. Для оценки влияния количества вовлеченного в бетонную смесь воздуха на прочность бетона рассматривались результаты проведенных ранее исследований. В них количество вовлеченного воздуха в бетонах регулировали с помощью изменения расхода воздухововлекающей добавки. Установлено [6], что к повышению содержания вовлеченного воздуха приводит также введение полипропиленовой фибры (до 4,2 %). Показано, что введение в состав бетонной смеси воздухововлекающих добавок приводит к снижению прочности бетонов. Экспериментально установлено и доказано, что уменьшение содержания вовлеченного воздуха с 5,6 до 3,5 % не снижает морозостойкости бетонов при 300 циклах испытаний, но повышает их прочность и снижает водопоглощение на 16 %. Выявлено, что применение полипропиленовой фибры вместо воздухововлекающей добавки позволяет обеспечить необходимое воздухововлечение при одновременном улучшении эксплуатационных свойств бетона.

Тем не менее авторы статьи [7] опровергают тезис, выдвинутый в статье [6], приводя в качестве доказательств экспериментальные данные зарубежных коллег. Анализируемые данные экспериментов дают наглядное представление о том, что введение синтетических волокон в бетонную матрицу не оказывает положительного влияния на прочность материала на растяжение, сжатие или изгиб при действии на него статической нагрузки.

В последнее время появились результаты исследований прочности бетонов, в составе которых, помимо пластифицирующей и воздухововлекающей добавок, имеется микронаполнитель [8]. Показано, что прочность бетонов с этими добавками из смесей с осадкой конуса, равной 1–3 см, и низким водоцементным соотношением ($V/C = 0,31–0,33$) при изменении

содержания вовлеченного воздуха меняется различным образом. Результаты исследования [8] вызывают сомнения, поскольку в них есть очевидные противоречия. Например, при увеличении содержания вовлеченного воздуха с 5 до 7,8 % прочность возрастает. С другой стороны, при меньшем увеличении воздухоудержания (5,8–6,6 %) прочность падает, причем очень существенно (на 32 %). Маловероятно, что эти противоречия можно объяснить различием в минеральном составе применяемых микронаполнителей.

Авторы исследований [9–13] рассматривают целесообразность применения базальтовой фибры в составе дисперсно-армированного бетона с точки зрения качественных показателей:

1. Увеличения срока службы материала в 2 раза по сравнению с синтетической фиброй.
2. Высокой устойчивости к мощным ударным и динамическим нагрузкам на материал.
3. Повышения коррозионной стойкости бетона.
4. Повышения морозостойкости материала.
5. Увеличения коэффициента истираемости бетона до 60 %.
6. Уменьшения трещинообразования и усадочных трещин во время критического момента высыхания бетона и в первые пару часов усадки.

В качестве решения актуальной на сегодняшний день задачи строительства федеральных дорог в России авторы исследований [14–17] предлагают модифицированные составы асфальтобетонных смесей с повышенными эксплуатационными характеристиками.

В статье [14] для контроля структурообразования асфальтового бетона предлагается применять активированные минеральные материалы, у которых в процессе активации происходит изменение энергетического состояния поверхности минерального наполнителя, что является основным фактором, определяющим процесс адгезионного и когезионного взаимодействия битумного вяжущего с минеральными заполнителями. При этом, как отмечают сами авторы, полученные в результате такого структурообразования повышенные показатели водо- и морозостойкости увеличивают эксплуатационную надежность дорожного покрытия только на 5–7 % при условии строгого контроля и соблюдения эксплуатационных условий материала, что на практике не всегда представляется возможным осуществить.

Наиболее перспективными являются исследования [15–17]. В ходе разработки технологии производства асфальтобетонных смесей с добавкой базальтового фиброволокна было установлено, что наиболее качественную смесь с лучшими показателями можно получить при вдувании базальтового фиброволокна в приготавливаемую смесь в момент перемешивания; благодаря этому можно получить композиционную дисперсно-армированную асфальтобетонную смесь с более стабильными и

высокими прочностными показателями при различной температуре, включая повышенные показатели сдвигоустойчивости по коэффициенту внутреннего трения. Авторы статьи [15] определили, что экспериментальные асфальтобетонные смеси лучше уплотняются и вследствие этого имеют более высокие показатели средней плотности, а при равномерном распределении базальтовой фибры в смеси наблюдается более низкое водонасыщение. Как уверяют авторы статьи [16], выпуск и применение асфальтобетонных смесей на основе данной технологии позволят увеличить физико-механические свойства асфальтобетонов, снизить колеобразование и скорость образования дефектов асфальтобетонных покрытий, а также значительно продлить межремонтный период дорожных покрытий. Не стоит забывать и об экономической целесообразности применяемых технических решений. Однако авторы статей [15–17] не гарантируют, а только предполагают, что разработанные составы смесей поспособствуют решению имеющихся на сегодняшний день проблем с дорогами на основе асфальтобетонного покрытия.

Наиболее эффективный метод повышения долговечности дорожных одежд в настоящий момент – применение жестких композиционных покрытий, состоящих из слоев асфальтобетона и цементобетона. Таким образом, разработка новых конструктивных покрытий дорожных систем с повышенными показателями морозостойкости и прочности при растяжении и сжатии, изгибе является актуальной задачей.

В настоящей научной статье предполагается, что при введении в состав бетонной смеси воздухововлекающей добавки и суперпластификатора будут неравномерно образовываться пузырьки воздуха разного диаметра. Для стабилизации размеров образующихся пузырьков воздуха при перемешивании будет использоваться базальтовое фиброволокно, которое оказывает удельное давление, достаточное для дополнительного разрушения крупных пузырьков вовлеченного воздуха, в силу того, что с увеличением радиуса пузырька происходит уменьшение величины капиллярного давления. Таким образом будет достигнута оптимальная структура внутренних пор, необходимая для получения материала с качественными показателями морозостойкости и прочности при растяжении на изгиб.

Чтобы получить качественный композит, в настоящем исследовании было решено разработать бетонную смесь для строительства пакета слоев дорожного покрытия с проектным классом по прочности на растяжение при изгибе не ниже $B_{cb} 4,0$, а также маркой по морозостойкости F_{2300} .

Методология экспериментов

Используемые сырьевые материалы

При проведении исследований были использованы портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-2020; песок строительный с модулем крупности $M_{кр} = 2,34$ по ГОСТ 8736-2014; щебень строительный из гравия фракции 5–20 мм по ГОСТ 32703-2014.

Для дисперсного армирования бетонов применялась базальтовая фибра компании Cemmix с эквивалентным диаметром 20–25 мкм и длиной волокон 25 мм; для регулирования подвижности бетонных смесей использовался суперпластификатор SikaPlast 2135 по ТУ 2493-008-13613997-2011 (это высокоэффективный пластификатор на основе полиэфиркарбоната).

В качестве воздухововлекающей применялась добавка «Аэро-850», отвечающая требованиям ГОСТ 24211-2008 для добавок, увеличивающих воздуходержание, а также требованиям ТУ 5745-030-58042865-2008.

Подготовка к контрольным испытаниям

Для выполнения поставленной задачи нам потребуется сделать по три образца для различной комбинации содержания добавок и, соответственно, серию образцов нормального состава (без добавок). Следовательно, необходимо изготовить 30 образцов. Далее по выбранному оптимальному составу будет изготовлено по серии образцов из 3 штук для испытаний на морозо- и износостойкость.

Все образцы, созданные в ходе исследований, имели одинаковый состав матрицы: Ц : П : Щ = 1 : 5 : 2,5 при В/Ц = 0,46 и расходе добавки суперпластификатора 0,7 % от массы цемента. Диапазон вариации количества вводимой базальтовой фибры составлял 1,5–2,5 % от содержания цемента. Диапазон вариации концентрации воздухововлекающей добавки – 0,10–0,20 % соответственно.

Для решения вопроса о равномерности распределения фиброволокна в результате перемешивания сухой смеси применялась технология изготовления фиброцементных гранул, описанная в исследовании [18].

Определение показателей морозостойкости осуществлялось на основе дилатометрического метода.

Применяемое оборудование

В ходе экспериментальной части научного исследования применялось испытательное оборудование: вибротумба лабораторная «СМЖ-739», предназначенная для уплотнения бетонных образцов; камера нормального хранения и тепловлажностной обработки КНТ-1; машина для испытания на сжатие и изгиб МС-500; установка «БЕТОН-ФРОСТ» для ускоренного определения морозостойкости бетона дилатометрическим методом при однократном замораживании водонасыщенных образцов-кубов с размерами 100 × 100 × 100 мм.

Анализ полученных результатов испытания

Из приведенных зависимостей (рис. 1) видно, что с увеличением концентрации базальтовой фибры до 1,5 % в контрольных образцах с воздухововлекающей добавкой происходит резкое увеличение закрытой пористости на 20 %, свидетельствующее о соответственном росте показателей морозостойкости. Однако при дальнейшем увеличении концентрации фиброволокна с 1,5 до 2,5 % в комплексе с воздухововлекающей добавкой увеличения закрытой пористости не наблюдается. Это объясняется тем, что высокое содержание фибры в составе смесей характеризуется уплотнением смеси, которое ведет к меньшей усадке и, как следствие, появлению препятствий для образования более пористой структуры.

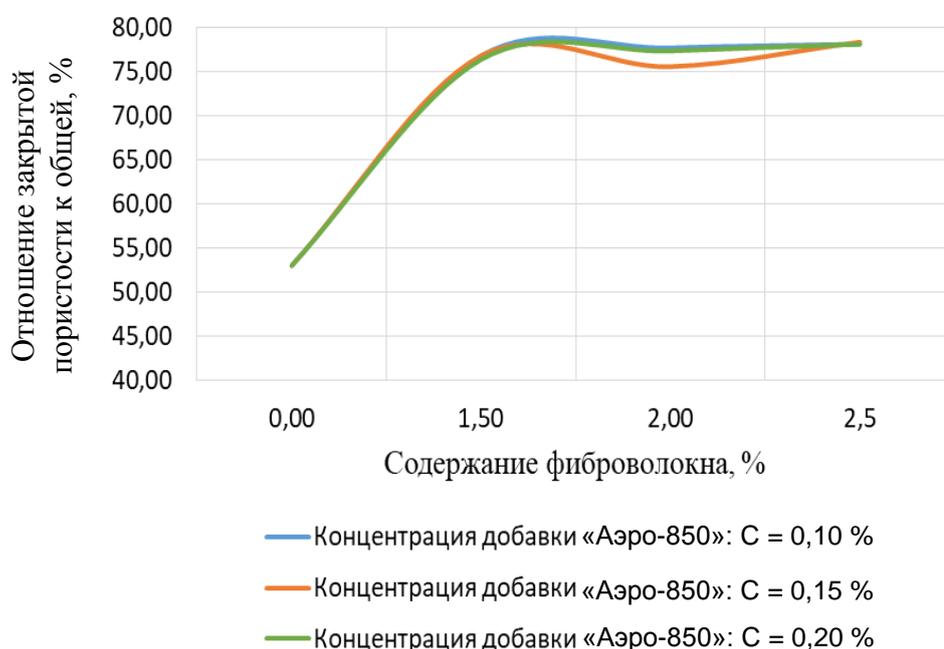


Рис. 1. График зависимости изменения отношения закрытой пористости к общей от содержания добавки «Аэро-850» и базальтовой фибры

Результаты, представленные на рис. 2, также подтверждают ранее выдвинутый тезис. Действительно, анализируя данную зависимость, можно проследить тенденцию увеличения предела прочности при растяжении на изгиб, что является следствием получения более плотного структурированного бетона. Помимо этого, при введении базальтового фиброволокна наблюдается повышение классовой прочности исследуемых составов – одного из основополагающих факторов высокого жизненного цикла материала.

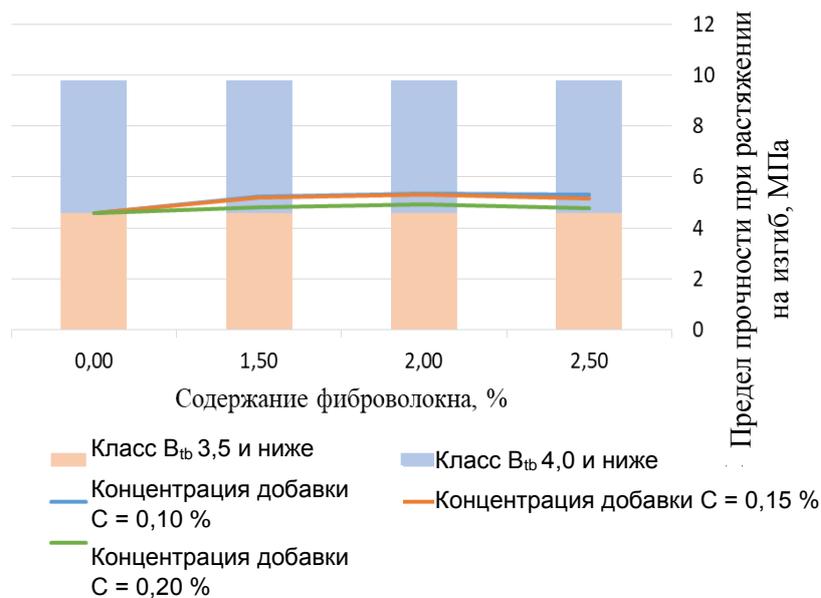


Рис. 2. График зависимости предела прочности при растяжении на изгиб от содержания базальтовой фибры

Самым важным было добиться получения достаточно высокого класса по морозостойкости F₂₃₀₀ при сохранении других качественных эксплуатационных показателей композита. По зависимости (рис. 3) можно убедиться в положительном результате проводимых опытов.

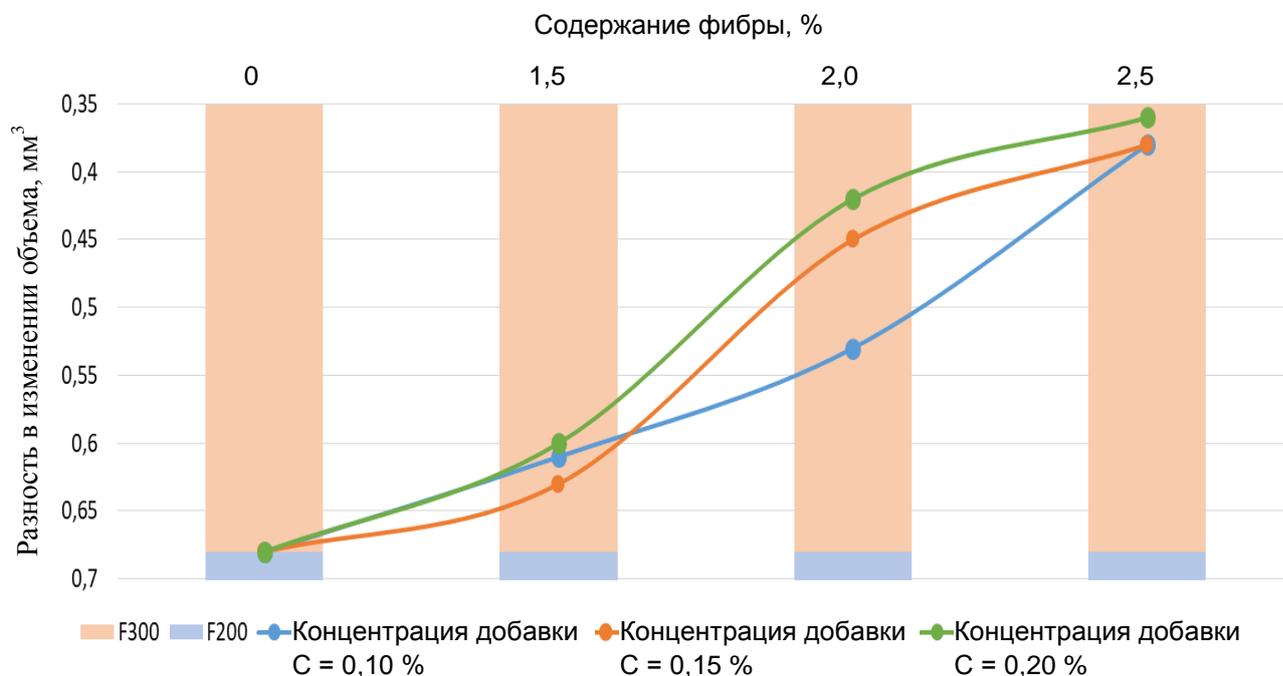


Рис. 3. График зависимости марки по морозостойкости от содержания добавки Аэро-850

Выводы

1. Показано, что введение в состав бетонной смеси воздухововлекающих добавок приводит к незначительному снижению прочности бетонов. При этом наблюдается рост показателей морозостойкости бетона.

2. Выявлено, что применение базальтовой фибры вместе с воздухововлекающей добавкой позволяет обеспечить необходимое воздухововлечение при одновременном улучшении эксплуатационных свойств бетона. Это обусловлено формированием более однородной и мелкопористой поровой структуры за счет действия введенной фибры.

3. Теоретически обосновано и на основе графического анализа доказано, что оптимальная концентрация воздухововлекающей добавки – 0,10 %, базальтовой фибры – 1,5 %.

Библиографический список

1. Толмачев С.Н., Бражник А.В. Снижение прочности бетона при введении воздухововлекающих добавок в бетонную смесь // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение: сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Амосова, 2014. С. 369–373.

2. Effect of Low Atmospheric Pressure on Air Entrainment in Cement-Based Materials: An On-Site Experimental Study at Different Elevations / Xin Chen, Xu Liu, Bo Tian, Yong Ge, Lihui Li // Materials. 2020. № 13. P. 830–838.

3. Шулдяков К.В., Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я. Структурный фактор долговечности бетона // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Т. 20. № 1. С. 46–51.

4. Hardened Cement Paste Microstructure as the Main Factor of Concrete Durability / K.V. Shuldyakov, A.A. Kirsanova, L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 143 (4). Article 02011. URL: https://www.researchgate.net/publication/322311943_Hardened_cement_paste_microstructure_as_the_main_factor_of_concrete_durability (дата обращения: 15.04.2022).

5. Исаченко С.Л., Кодзоев М.-Б.Х. Анализ методов повышения морозостойкости бетона // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. № 4. С. 291–294.

6. Толмачев С.Н., Беличенко Е.А. Влияние вовлеченного воздуха на свойства дорожных бетонов и фибробетонов // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 68–72.

7. Исследование физико-механических свойств дисперсно-армированных бетонов / Р.Ф. Серова, Г.М. Рахимова, Е.А. Стасилович, С.Ж. Айдабрекова // Эпоха науки. 2018. № 14. С. 192–200.

8. Оптимизация состава цементного бетона для аэродромных покрытий / Н.М. Красникова, Н.М. Морозов, О.В. Хохряков, В.Г. Хозин // Известия КГАСУ. 2014. № 2 (28). С. 166–172.

9. Бабаев В.Б., Строкова В.В., Нелюбова В.В. Базальтовое фиброволокно как компонент для микроармирования цементных композитов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 58–61.

10. Прогнозирование долговечности базальтофибробетона, модифицированного наноструктурными добавками / К.А. Сарайкина, В.А. Шамапов, В.А. Голубев, Г.И. Яковлев // Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 41–44.

11. Повышение коррозионной стойкости базальтового волокна в цементных бетонах / К.А. Сарайкина [и др.] // Строительные материалы. 2016. № 1–2. С. 27–31.

12. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Сеньков С.А. Наноструктурирование цементного камня при дисперсном армировании базальтовым волокном // Строительные материалы. 2015. № 3. С. 34–28.

13. Mechanical Properties Test and Strength Prediction on Basalt Fiber Reinforced Recycled Concrete / Min Huang, Yuru Zhao, Haonan Wang, Shihao Lin // Advances in Civil Engineering. 2021. № 3. P. 1–10.

14. Асфальтовый бетон повышенной водо- и морозостойкости / А.И. Чернышов [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1 (54). С. 180–189.

15. Андронов С.Ю. Исследование технологии производства композиционных дисперсно-армированных базальтовыми волокнами асфальтобетонных смесей с учетом влияния температурного режима // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 134–137.

16. Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кочетков А.В. Технология производства и применения дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей с базальтовой фиброй // Строительные материалы. 2020. № 3. С. 70–75.

17. Sayyedadi A., Mohammad S., Sayyed M.H. Fiber-Reinforced Asphalt-Concrete // Construction and Building Materials. 2012. V. 24. № 6. P. 871–877.

18. Трофимов В.И., Желев Н.А. Новый способ приготовления фибробетонной смеси // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: материалы VII Международной научно-практической конференции. Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2020. С. 316–320.

BASALT FIBER REINFORCED CONCRETE WITH CONTROLLED AIR ENTRAINMENT

N.A. Zhelev, M.A. Smirnov

***Abstract.** The influence and nature of entrained air and basalt fiber on the properties of cement concrete for road surfaces is shown. The results of a study by various authors on the effect of fiber and air-entraining additives on the durability and frost resistance of cement composites are analyzed. The contradictions existing in them are noted. New experimental results are presented, showing that the use of the optimal content of basalt fiber in combination with an air-entraining agent improves the technical and operational characteristics of concrete. It was found that in the pore structure of concretes with basalt fiber, together with an air-entraining additive, there are smaller pores. Their distribution is more uniform, and the strength of concrete decreases less than in the case of pores, which are formed due to air-entraining additives without the addition of dispersion-reinforcing fiber.*

***Keywords:** basalt fiber, air entrainment, dispersed reinforcement, structure formation, fiber concrete, frost resistance.*

Об авторах:

ЖЕЛЕВ Никита Александрович – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: zhelev.nekit@mail.ru

СМИРНОВ Матвей Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

About the authors:

ZHELEV Nikita Alexandrovich – Master Student of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: zhelev.nekit@mail.ru

SMIRNOV Matvey Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

ИНЪЕКЦИОННЫЕ СОСТАВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВ

А.В. Лебедев, В.Б. Петропавловская

© Лебедев А.В., Петропавловская В.Б., 2022

Аннотация. В статье рассмотрена возможность применения переработанного техногенного сырья при производстве строительных материалов. Проведен аналитический обзор информации, проанализирован вопрос использования вторичного сырья в производстве строительных материалов и, как следствие, его роли в сокращении отходов энергетической промышленности. Изучены основные свойства алюмосиликатного концентрата и возможность его применения в качестве добавки при производстве составов для цементации грунтов. Рассмотрены методы переработки отходов с получением алюмосиликатных микросфер. Определены перспективные направления применения алюмосиликатной добавки в инъекционных материалах для цементации грунтов. Алюмосиликатная добавка поможет добиться хорошей подвижности составов без потери их прочностных характеристик. Использование переработанного техногенного сырья в производстве строительных материалов позволит не только уменьшить количество накопленных отходов, но и снизить стоимость дорогих материалов.

Ключевые слова: техногенное сырье, алюмосиликатная добавка, цементация грунтов, утилизация отходов.

Введение

В настоящее время в России чрезвычайно актуален вопрос ресурсосбережения. Одним из эффективных способов решения данной проблемы является вовлечение в хозяйственный оборот отходов промышленности. Наиболее распространенные и в меньшей степени повторно используемые отходы промышленности – золошлаковые отходы теплоэлектростанций (ТЭС). Данные материалы представляют собой ценные ресурсы техногенного происхождения, которые могут успешно применяться в различных областях народного хозяйства России.

На территории России ежегодно образуется около 8 млрд т отходов, причем объем накопившихся только в твердом виде в отвалах и хранилищах составляет около 80 млрд т [1].

Утилизация золы и шлаков ТЭС является одной из важнейших экологических задач. Вблизи мощных ТЭС накопились сотни миллионов

тонн этих материалов. Это наносит существенный вред окружающей среде.

Одним из путей решения указанной задачи является использование так называемых лежалых зол и шлаков в строительстве как составляющих бетонов и строительных растворов [2].

Применение золошлаковых отходов в производстве строительных материалов – одно из наиболее перспективных направлений утилизации, поскольку промышленная деятельность ТЭС имеет огромную материалоемкость и может обеспечить вовлечение в производственный цикл высокого объема зол. Кроме того, золы и другие отходы промышленности и энергетики применяются в различных инъекционных материалах с целью сокращения расходов цемента и других материалов.

Золошлаковые отходы, образующиеся в результате сжигания твердого топлива, подвергнутые активации, благодаря своему индексу активности, малому размеру частиц, химическому, а также фазовому составу широко используются как добавки в технологии получения цементов и бетонов. Это позволяет корректировать их свойства в нужном направлении, а также значительно сокращать расход цемента в композиционных материалах [3].

Методы укрепления грунтов

Искусственное повышение несущей способности оснований зданий и сооружений, неспособных в естественном состоянии обеспечить требуемую прочность, устойчивость и водопроницаемость, является важным технологическим приемом в строительстве, обеспечивающим долговечность зданий и сооружений при их эксплуатации. В настоящее время существуют десятки способов повышения несущей способности грунтовых оснований: силикатизация, цементация, глинизация и т. д.

В отличие от методов уплотнения, при закреплении грунтов их структура существенно не изменяется, но благодаря инъектированию в них различных реагентов возникают прочные структурные связи, обеспечивающие увеличение прочности грунтов, снижение их сжимаемости, уменьшение водонепроницаемости и чувствительности к изменению внешней среды, особенности влажности [4].

Под инъекционным закреплением понимают напорное распространение закрепляющего раствора через скважины в грунтовый массив. Выбор типа инъекционного раствора определяется конкретными грунтовыми условиями и задачами. Требуется грамотно применять растворы различных видов и разные технологии ведения работ [4, 5].

Из всего многообразия цементационных технологий закрепления грунтов при освоении подземного пространства в условиях плотной городской застройки наибольшее распространение получили технологии:

1) инъекционная цементация в режиме пропитки поровой структуры грунта с использованием тонкодисперсных вяжущих (микроцементов) и манжетной технологии;

2) струйная цементация грунтов по одно- и двухкомпонентной технологии (Jet-1 и Jet-2);

3) компрессионно-разрывная цементация грунтового массива;

4) заполнительная цементация грунтов [1, 5, 6].

Технология цементации приобретает огромную значимость в строительной отрасли. До последнего времени основной областью ее применения считалось усиление оснований и фундаментов, а также закрепление стенок котлованов при возведении подземных частей зданий. В то же время известны примеры применения струйной технологии для опережающего закрепления глубоких подземных сооружений. С помощью такой технологии обеспечивается устойчивость стенок сооружения и уменьшается приток подземных вод в период строительства. Благодаря этому значительно снижается трудоемкость и сокращается продолжительность строительства, повышается безопасность работ.

Можно сделать вывод, что для упрочнения и уплотнения грунтов с помощью цементации эффективным является использование тонкодисперсных модифицированных вяжущих, в том числе зол, которые приводят к консолидации массива и образованию грунтобетона, обладающего однородной структурой и, как следствие, высокой прочностью, деформационной стойкостью и водонепроницаемостью [7].

Переработка и утилизация отходов

Ежегодно в России образуются десятки миллионов тонн золошлаковых отходов. Каждые сутки работы ТЭС накапливается до 1 тыс. т золы и шлаков. Подавляющая их часть направляется в отвалы, а в строительной индустрии утилизируется лишь 3–5 % отходов [3, 8]. Наиболее рациональным направлением утилизации промышленных отходов является их использование в качестве техногенного сырья при получении различного вида продукции (в первую очередь строительного назначения [4, 9, 10]). На рис. 1 показаны основные ценные компоненты, входящие в состав золошлаковых отходов, методы их переработки и последующего использования.



Рис. 1. Комплексное использование золошлаковых отходов [10]

Авторами работы [11] была разработана и предложена технология очистки и активации золошлаковой смеси, которая состоит из нескольких этапов (рис. 2).

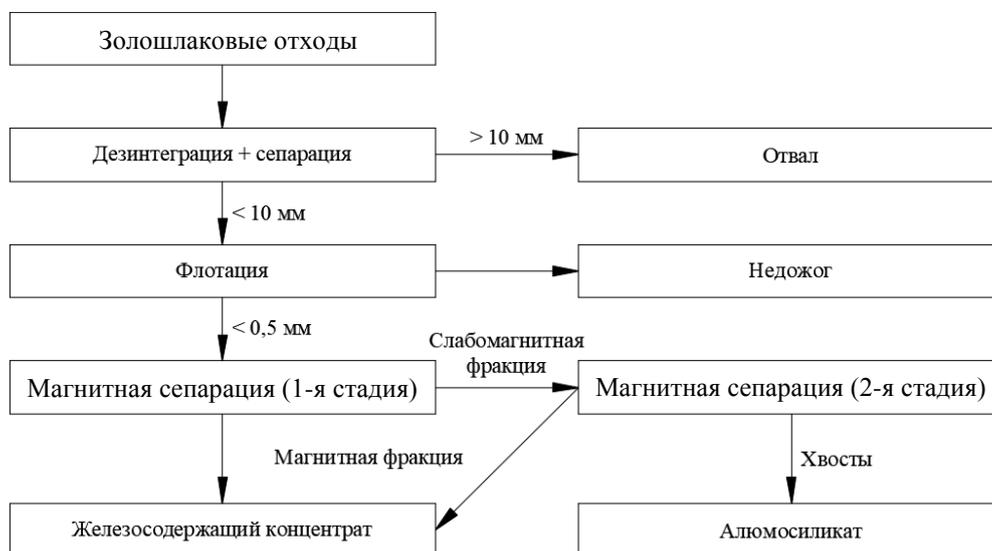


Рис. 2. Предложенная технология очистки золошлаковых смесей [11]

Первый этап подразумевает применение дезинтеграторов с попутным фракционированием (граничный размер 1 см). Фракции с размером более 10 мм исключаются из технологии, а более мелкие частицы переходят на следующий этап – флотацию, где несгоревшие компоненты угля всплывают, извлекаются и применяются при изготовлении топливных брикетов.

Важность второго этапа заключается в том, что извлечение остаточного угля позитивно влияет на свойства алюмосиликатной добавки. Данный факт объясняется тем, что углеродные включения образуют слабые области в композите, тем самым даже при минимальных дозировках сильно уменьшая прочностные свойства и характеристики долговечности цементного материала.

На следующих технологических этапах осуществляется удаление железосодержащих компонентов с применением двухстадийной магнитной сепарации. При этом сначала удаляется сильномагнитная фракция, а уже затем слабомагнитная за счет применения более мощного магнита.

Полученное сырье, оставшееся после магнитной сепарации, поступает в накопитель алюмосиликатного сырья. Дальнейшие технологические переделы заключаются в удалении воды и фракционировании полученных частиц [11].

Состав и свойства золошлаковых отходов

Зола является тонкодисперсным продуктом высокотемпературной обработки минеральной части углей. Значительное содержание карбонатов в минеральной доле исходного топлива в процессе горения обуславливает образование силикатов, алюминатов и ферритов кальция, способных к гидратации минералов. Такая зола при затворении способна схватываться и самостоятельно твердеть. В ней содержится окись магния, кальция в свободном состоянии [12].

Золошлаковые отходы в основном представляют собой высококальциевые золы. В их состав может входить клинкерный минерал, свободный оксид кальция, свободный оксид магния, сульфат кальция, стеклофаза и нерастворимый остаток [13]. Высокая дисперсность, соответствующий минералогический состав и гидравлическая активность золы делают ее одним из наиболее эффективных и удобных видов активной минеральной добавки при производстве цемента, местных вяжущих веществ, а также строительных растворов и бетонов [14].

В грунтах нарушенной структуры после инъектирования растворами с использованием зол прирост модуля деформации составил до 40 % от первоначальных показателей. В грунтах ненарушенной структуры после инъектирования суспензии буроугольной золы прирост модуля деформации составил до 50–55 % от первоначальных показателей [12].

Физические свойства золы обусловлены способом ее происхождения, который заключается в том, что расплавленные капли стеклофазы уносятся с печными газами и образуют микросферы. Они могут иметь как ровную поверхность, так и пещеристую, ребристую и т. п. Затем (вследствие технических операций или внутренних напряжений) какая-то часть разрушается и образуются микросферы обломочного характера.

Таким образом, зола представляет собой тонкодисперсный материал, состоящий из полых микросфер целого или обломочного характера и агрегатированных частиц [13].

Ниже представлено процентное содержание оксидов в алюмосиликатном концентрате [11]:

Диоксид кремния	Оксид алюминия	Оксид железа	Оксид кальция	Оксид магния	Оксид калия	Оксид натрия	Другие оксиды
57,44	25,03	1,24	11,02	1,93	1,59	0,21	1,54

Можно сказать, что использование особо тонкомолотого наполнителя из техногенного и некондиционного сырья позволит решать не только вопросы снижения себестоимости конечного продукта, но и вопросы экологической обстановки регионов, поскольку сырье в виде кремнезема, золошлаковых смесей, цементной пыли, очень мелких и тонких песков образуется в нашей стране, как и во всем мире, в огромных количествах [4].

Применение алюмосиликатного концентрата в качестве добавки

На основании результатов исследований, изложенных в статье [15] и связанных с химико-минералогическим составом отдельных фракций золы, их гидравлической активностью, могут быть намечены пути рационального использования золы, а именно ее вяжущих свойств, энергетического потенциала несгоревших частиц топлива, магнитных компонентов и т. д.

В ходе исследований в статье [13] было установлено, что применение зольного материала в качестве компонента смешанных композиций зольно-цементного вяжущего в количестве 30 % добавки к портландцементу обеспечивает стабильный рост прочности при сжатии и ускоряет процессы набора прочности.

При замене части цемента золой повышается нормальная плотность цементного теста. Зола является низкодисперсной, крупные фракции в ней представлены частицами несгоревшего топлива, которые адсорбируют большое количество воды. С этим и связана повышенная водопотребность золоцементного раствора. Введение в состав суперпластификатора позволяет уменьшить нормальную плотность, чего не происходит в золоцементном растворе без добавки [8, 16].

Авторы статьи [3] провели исследование замены 40 % цемента золой. В результате было установлено, что замена зольным остатком и золой ТЭС в составе вяжущего хотя и ведет к снижению прочности затвердевших цементно-зольно-песчаных растворов в различных возрастах твердения (и чем в большей степени проведена такая замена, тем сильнее), но одновременно с этим способствует повышению равномерности изменения объема цементно-зольного теста.

Таким образом, использование зол вместо импортных тонко-дисперсных минеральных добавок, применяемых для получения бетонов и строительных растворов, позволит значительно снизить их стоимость и повлияет на улучшение экологической ситуации.

Заключение

В современных условиях обостряются проблемы утилизации золошлаковых материалов, получаемых в результате сжигания углей ТЭС. Их накопление приводит к стремительному росту экологических, социальных и экономических издержек из-за крайне низкого уровня утилизации.

Применение золошлаковых отходов в строительной отрасли позволяет сэкономить на закупке основных дорогостоящих материалов, причем без ущерба качеству изделия, и вместе с этим решить проблему утилизации золошлаковых материалов. Большими потенциальными возможностями использования золошлаковых отходов располагают цементная промышленность, предприятия по производству строительных растворов и бетонов, легких заполнителей (аглопорита и глинозольного керамзита), строительной керамики, силикатного кирпича [14].

Приведенные физико-химические свойства золы ТЭС как заполнителя для бетонов показывают существенное отличие золы от обычных заполнителей и обосновывают химическую активность золы. Особые условия твердения цемента, при которых достигается значительное повышение прочности, в случае использования золы как заполнителя для бетонов доказывают ее преимущества перед традиционным заполнителем [2].

Практическая значимость исследований, приведенных в статье [12], заключается в подтверждении возможности замены дорогостоящих материалов, используемых для усиления оснований, имеющимся в огромных количествах материалом – золой.

Таким образом, применение зол в производстве строительных материалов, в частности при инъектировании грунтов, может поспособствовать росту утилизации золошлаковых отходов, снижению стоимости материалов и стабилизации экологической обстановки в стране. Можно обозначить научные направления развития:

1. Углубленное изучение влияния использования алюмосиликатной добавки на прочность получаемых строительных материалов и изделий.

2. Использование золошлаковых отходов в качестве как заполнителей, так и активной составляющей при производстве инъекционных материалов для цементации грунтов.

3. Применение тонкодисперсных компонентов с целью получения наиболее плотной упаковки системы и, следовательно, повышения прочности материала.

4. Замена традиционных материалов техногенным сырьем для получения наибольшей экономической выгоды.

Стоит отметить, что данная тема имеет большой потенциал для дальнейших научных исследований, которые должны проводиться с целью решения двух основных проблем:

1) улучшение экологической обстановки в стране за счет роста утилизации отходов;

2) получение экономической выгоды при производстве строительных материалов и изделий за счет замены дорогостоящих материалов золой.

Библиографический список

1. Применение шлакощелочных вяжущих в технологии струйной цементации для усиления грунтов / А.И. Харченко [и др.] // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 6. С. 680–689.

2. Сторожук Н.А., Павленко Т.М., Аббасова А.Р. Особенности золы тепловых электростанций как заполнителя для бетона // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2017. № 5. С. 149–157.

3. Использование золошлаковых отходов в качестве дополнительного цементирующего материала / В.Л. Танг [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 8. С. 19–27.

4. Составы ОТДВ для инъекционного закрепления грунтов с комплексным наполнителем различного генезиса / И.Я. Харченко [и др.] // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 3. С. 48–52.

5. Базаров Ж.В., Филиппова Е.В. Технологии цементационного закрепления грунтов // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сборник статей XXI Международной научно-технической конференции. Пенза: АНМО «Приволжский дом знаний», 2021. С. 14–22.

6. Современные технологии цементационного закрепления грунтов / И.Я. Харченко [и др.] // Вестник МГСУ. 2016. Т. 12. Вып. 5 (104). С. 552–558.

7. Танг В.Л., Булгаков Б.И., Гальцева Н.А. Применение тонкодисперсных вяжущих в струйной цементации грунтов // Научное обозрение. 2017. № 12. С. 52–57.

8. Рашупкина М.А., Явинский А.В., Чулкова И.Л. Влияние водоредуцирующих суперпластификаторов и золы гидроудаления на свойства цементного камня // Известия вузов. Строительство. 2021. № 3. С. 49–55.

9. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля / Ю.М. Баженов [и др.] // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 12 (111). С. 1385–1391.

10. Комплексное использование золошлаковых отходов / О.В. Афанасьева [и др.] // Проблемы энергетики. 2015. № 7–8. С. 26–36.

11. Федюк Р.Р. Цементные композиционные материалы для специальных сооружений: автореф. на соиск. ученой степ. д-ра. техн. наук: 2.1.5 Белгород, 2022. 39 с.

12. Носков И.В., Амосова Л.Н. Использование минерального негоряемого остатка бурого угля (зола-уноса) как материала для эффективного закрепления лессовых грунтовых оснований // Ползуновский вестник. 2018. № 1. С. 158–164.

13. Заика А.А. Зольно-цементные композиции // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXV Международного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета. Томск: ТПУ, 2021. Т. 2. С. 309–310.

14. Кошмамат У.К. Перспективы использования вторичного сырья угольной золы в рамках стратегии ресурсосбережения // NovaInfo. 2016. Т. 1. № 57. С. 110–115.

15. Головин К.А., Ковалев Р.А., Киреева А.С. К вопросу о разработке быстротвердеющих смесей для гидроструйной цементации плоскостных сооружений // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2021. Вып. 3. С. 153–162.

16. Влияние органоминеральных добавок на физико-механические свойства и коррозионную стойкость цементно-песчаных растворов / С.Х. Нго [и др.] // Строительство: наука и образование. 2020. Т. 10. Вып. 1. С. 1–23.

INJECTION COMPOSITIONS FOR SOIL CEMENTATION USING ALUMINOSILICATE ADDITIVE

A.V. Lebedev, V.B. Petropavlovskaya

Abstract. *The article considers the possibility of using recycled technogenic raw materials in the production of building materials. The work carried out an analytical review of information, which analyzed the issue of the use of secondary raw materials in building materials and, as a result, the reduction of waste from the energy industry. The main properties of the aluminosilicate concentrate and the possibility of its use as an additive in the production of compositions for soil cementation were studied. The methods of waste processing with the production of aluminosilicate microspheres are considered. Promising directions for the use of an aluminosilicate additive in injection materials for soil cementation were identified. The aluminosilicate additive will help to achieve good mobility of the compositions without losing their strength characteristics. The use of recycled technogenic raw materials in the production of building materials will not only reduce the amount of accumulated waste, but also reduce the cost of expensive materials.*

Keywords: *technogenic raw materials, aluminosilicate additive, soil cementation, waste disposal.*

Об авторах:

ЛЕБЕДЕВ Александр Валерьевич – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: justavlebedev@mail.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

About the authors:

LEBEDEV Alexander Valerievich – Master Student of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: justavlebedev@mail.ru

PETROPAVLOVSKAYA Victoria Borisovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
В РЕСТАВРАЦИОННЫХ СОСТАВАХ
ПЫЛЕВАТЫХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА
СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА
И ДОБАВКИ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА**

Д.М. Орлов, М.А. Смирнов

© Орлов Д.М., Смирнов М.А., 2022

***Аннотация.** В статье дан анализ литературных источников с целью проведения дальнейшего исследования в области реставрационных вяжущих материалов. Указаны актуальность разработки экономичных и доступных реставрационных составов и требования к ним. Проанализирована возможность использования в составе материала пылеватых отходов производства силикатного кирпича для решения проблем, связанных с их утилизацией и удешевлением реставрационно-строительных продуктов. Доказана необходимость повышения адгезии реставрационно-ремонтного состава. Рассмотрены положительные свойства поливинилового спирта (ПВС) как полимерной добавки в составе реставрационных смесей. Установлено, что ПВС способствует повышению прочности цементных систем. Отмечено, что ПВС хорошо сочетается с указанной выше пылью в плане достижения высоких физико-механических и адгезионных показателей в реставрационном растворе. Сформулированы направления для дальнейших исследований.*

***Ключевые слова:** реставрационный состав, адгезия, прочность, пыль производства силикатных кирпичей, поливиниловый спирт.*

Как показывает практика, в России стремительно растет тенденция к реставрации и реконструкции объектов строительной индустрии. Связано это с огромным строительным производством в период XIX–XX веков и резким спадом темпа не только строительства, но и обслуживания эксплуатируемых зданий и сооружений в начале 1990-х годов. Таким образом, намечаются масштабные работы, связанные с реконструкцией многих объектов капитального строительства, в том числе работы по сохранению объектов культурного наследия.

Реставрация и реконструкция объектов культурного наследия всегда являлись важнейшими, ключевыми задачами (в том числе на уровне интересов государства). Можно выделить проблему финансирования реставрационной деятельности и неадекватность цен на реставрационные материалы, из-за чего многие памятники разрушаются раньше, чем

начинается их восстановление. Таким образом, разработка доступных реставрационных материалов – один из путей решения проблемы, связанной с восстановлением культурного наследия страны. Основной задачей является точный подбор реставрационных составов. Они должны быть очень близкими по физико-механическим свойствам к материалам реставрируемых конструкций, а также удовлетворять эстетическим требованиям.

На сегодняшний день большое внимание в научных исследованиях уделяется использованию отходов производства в строительных композитах, в том числе для их рециклинга на строительных предприятиях. Возможность вовлечения отходов в производство стройматериалов позволяет решить проблемы ресурсосбережения, экологической обстановки, стоимости строительных материалов и конструкций и т. д.

Применение отходов в реставрационных составах – первая и необходимая предпосылка для решения задачи по удешевлению реставрационных материалов.

Реставрационные материалы относятся к группе материалов особого назначения, т. е. к ним предъявляются специальные требования, например требования долговечности, прочности (не выше, чем у реставрируемого материала, и не сильно ниже), адгезии. Кроме того, использование материалов не должно исказить первоначальный замысел архитектора или препятствовать повторной реставрации. Важными также являются требования декоративности и цветопередачи (преимущественно белые окраски). Учитывая дороговизну и возможную несовместимость пигментов с составляющими реставрационного состава, важно предусматривать наличие нужных пигментированных веществ в структуре одного или нескольких компонентов реставрационного материала.

П.И. Мешков приводит требования к крупности зерен наполнителя для реставрационных составов. Предельные размеры зерен: в штукатурных 2,5 мм, отделочных 1,25 мм. Помимо этого, чтобы обеспечить адгезионные и прочностные свойства состава, наполнитель не должен содержать вредных примесей. К примеру, содержание глины в объеме 1–1,5 % способствует снижению прочности сцепления с основанием в 2 раза [1].

Для исследования в качестве отхода, который можно включить в состав реставрационной смеси, были выбраны пылеватые отходы производства силикатного кирпича.

Применение пылеватых отходов в ремонтных смесях является наиболее рациональным вариантом, поскольку тонкость и развитая поверхность частиц позволяют достичь наиболее плотной упаковки зерен в составе, что положительно сказывается на прочностных свойствах материала [2].

В силикатной промышленности производство сопровождается обильным пылевыделением. Основные источники образования пыли – шаровые мельницы и ленточные конвейеры загрузки бункеров мельниц. В соответствии с требованиями техники безопасности подобные участки производственного цикла оборудованы аспирационными системами. Отсасываемая пыль подается на очистные установки, где и производится ее отделение от запыленного воздуха. Накапливающиеся объемы тонкодисперсного материала представляют серьезную проблему для производства, поскольку предприятия в большинстве своем не имеют ни лишних площадей для их размещения, ни возможности для их утилизации. Если принять во внимание ужесточение требований к защите атмосферы от вредных выбросов, то задача вовлечения пыли в промышленное производство приобретает особую актуальность.

В статье Э.Р. Бариевой [3] было проведено изучение пылеватого материала, образующегося на одном из предприятий по изготовлению силикатного кирпича. Визуально пыль имеет белесую окраску, что свидетельствует о наличии карбонатов и негашеной извести. Стоит отметить, что данные компоненты используются при создании белых пигментов. Таким образом, можно предположить, что пыль сыграет ключевую роль в обеспечении декоративных требований к реставрационному материалу. Агрегация у пыли отсутствует, дисперсность частиц варьируется от 0,005 до 0,1 мм.

Рентгенографические исследования показали наличие в составе пыли портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), кварца (SiO_2), оксида кальция (CaO), известняка (CaCO_3) и альбита ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) [3, 4].

В статье [3] также говорится о присутствии гидроксида кальция, который является продуктом гидратации CaO и во многом определяет гидравлическую активность пылеватого материала.

Исследования А. Мюллера [4] показали, что пыль не влияет на усадку состава. При испытании было достигнуто снижение плотности материала, а кроме того, было отмечено, что при добавлении пыли увеличивается открытая пористость.

Все вышеперечисленные данные свидетельствуют о потенциально положительной возможности использования пыли в реставрационном составе.

Теперь рассмотрим реставрационный материал с позиции ремонтного состава. Одной из наиболее актуальных задач является обеспечение долговечности и экономичности ремонтных составов.

Наряду с другими факторами (низкой прочностью, недостаточной подвижностью и т. д.), основными причинами потери эксплуатационных свойств и сокращения срока службы реставрационных составов являются снижение адгезии и возникновение усадочных деформаций [5]. В связи с этим ремонтно-реставрационные составы, используемые для заделки

трещин в стенах и перегородках зданий, а также для ремонта штукатурки изделий декора, должны обладать высокими адгезионными свойствами.

Как показано в статье [5], на адгезию ремонтных составов влияет множество факторов. Прежде всего стоит отметить усадку, поскольку очень часто при строительстве возникает необходимость заделывать дефекты после снятия опалубки. Положительное влияние на адгезию оказывают правильная подготовка основания (очистка от примесей и грязи, обезжиривание), шероховатость поверхности, а также сродство структур двух материалов. Негативное воздействие на адгезию оказывает влага, содержащаяся в ремонтируемой конструкции. Лишняя вода, образуемая в контактной зоне, заполняет поры на поверхности и не дает возможность ей скрепиться с ремонтным составом [5, 6].

Сцепление старых (длительно работавших) и новых строительных растворов на цементном вяжущем невелико. Конструкция усиления и поврежденный элемент сооружения совместно работают совсем не так, как это предполагается расчетом, поскольку в расчеты не вводятся реологические показатели, учитывающие старение материала [7].

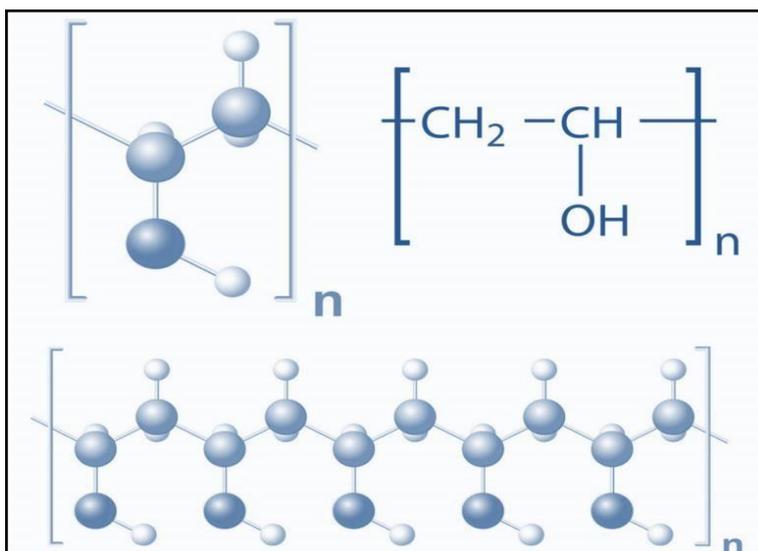
Как правило, строительные растворы, не содержащие добавок, не применяются при ремонтных работах, так как они склонны к трещинообразованию и в большинстве случаев имеют недостаточную прочность сцепления с основанием.

Чаще всего ремонтные составы модифицируют полимерными добавками. Обычно их вводят до 1 % в вяжущее вещество [7]. Введение полимерных веществ в состав цементных материалов заметно модифицирует структуру материала. Полимер образует упругие прослойки между кристаллическими новообразованиями минерального вяжущего, адсорбируется на поверхности частиц заполнителя, а также заполняет поры раствора. Это способствует повышению прочности, величины адгезии и снижению водопоглощения материала [1, 8, 9].

Еще одним положительным свойством полимеров является воздухововлечение, способствующее образованию однородной структуры смеси. Кроме того, было отмечено, что полимерные компоненты сравнительно дешевые (наряду с другими добавками органического и минерального происхождения) [9].

В настоящее время в сухих смесях и бетонах в небольших дозировках широко используется поливиниловый спирт (ПВС), основной эффект которого заключается в повышении водоудерживающей способности и клеящих свойств цементных систем.

Поливиниловый спирт является одним из немногих термопластичных полимеров, используемых для производства полимерных водных клеев (рисунки). Применение ПВС в качестве основы клеев обусловлено хорошими адгезионными свойствами полимера, что, в свою очередь, связано с наличием в молекуле ПВС полярных гидроксильных групп [6, 10].



Химическое строение ПВС

Пленки ПВС имеют тенденцию к образованию высокоэластичных структур с клеточной структурой, что обеспечивает сильное повышение трещиностойкости и паропроницаемости цементных материалов. Пленки, таким образом, препятствуют попаданию лишней влаги в материал. В связи с этим добавка ПВС отлично подходит для смесей, используемых при наружных работах [10]. Кроме того, автор статьи [10] приводит доказательства того, что повышение водопотребности смеси из-за введения добавки ПВС не играет роли в понижении прочностных характеристик ремонтного состава.

В иностранных источниках [11, 12] можно выделить несколько достоинств ПВС. В статьях говорится о снижении усадки в зависимости от количества введенной добавки.

Было отмечено, что ПВС снижает pH раствора, тем самым препятствуя раннему осаждению продуктов гидратации. Поливиниловый спирт повышает способность обрабатывания материала после его затвердевания, что согласуется с требованием обратимости в отношении реставрационных материалов.

Поливиниловый спирт вводят в состав в виде водной дисперсии. Данный процесс усиливает взаимодействия структурных элементов цемента с молекулами ПВС и способствует образованию однородной структуры [7, 11].

В источнике [8] указывается, что известняк (содержание CaCO_3 в пыли достигает до 40 % [3]) является важным структурообразующим компонентом для обеспечения процессов конденсации и полимеризации макромолекул ПВС на поверхности частиц с соответствующим переходом в псевдотвердое или твердофазное состояние в контактной зоне. Вследствие этого ПВС образует упругие прослойки между кристаллическими новообразованиями минерального вяжущего, адсорбируется на

поверхности частиц песка и за счет высоких адгезионных свойств повышает прочность и деформативность материала.

Данные статьи [12] подтверждают, что гидроксильная группа ПВС может соединяться с ионами Ca^{2+} и Al^{3+} с образованием химических связей С-О-Са и С-О-Аl (ионы алюминия присутствуют в соединениях альбита, который входит в состав исследуемой пыли, также ионы Ca^{2+} и Al^{3+} присутствуют в цементном вяжущем). Эти химические связи могут соединять полимерную пленку и продукты гидратации, что приводит к более плотному сочетанию продуктов гидратации и улучшает механическую прочность. Стоит подчеркнуть: более положительным эффектом при реставрации старой штукатурки и глиняных кирпичей обладает связь С-О-Аl, которая, помимо высокой прочности состава, демонстрирует прекрасную адгезию и способствует удалению трещин конструкции под телом раствора.

Из вышеуказанного следует, что в данном составе целесообразно в качестве полимерной добавки использовать именно ПВС, поскольку он оказывает положительное влияние на компоненты пыли силикатного производства и цементное вяжущее.

Таким образом, при разработке составов для реставрации объектов культурного наследия необходимо проводить исследования, связанные:

с влиянием пыли на эстетические и прочностные свойства ремонтно-реставрационной смеси;

влиянием добавки ПВС на прочность сцепления реставрационных составов с основанием (адгезию) и прочность при сжатии;

прочностными и адгезионными параметрами системы при разном содержании песка;

подбором оптимального состава реставрационного раствора;

определением комплекса физико-механических свойств полученного материала.

Библиографический список

1. Мешков П.И., Мокин В.А. Способы оптимизации составов сухих строительных смесей // Строительные материалы. 2000. № 5. С. 12–15.

2. Суховская К.Ю., Мечай А.А. Получение силикатного кирпича с использованием отходов производства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 5. С. 324–326.

3. Бариева Э.Р., Фасхутдинова А.Р., Королев Э.А. Пылеватые отходы производства силикатного кирпича и возможности их рециклинга // Науки о Земле и смежные экологические науки. 2020. № 5. С. 21–22.

4. Müller A., Leydolph B., Stanelle K. Production residue from the calcium silicate industry as a poreformer in masonry bricks // ZI, Ziegelindustrie International/Brick and Tile Industry International. 2007. № 1. P. 34–45.

5. Чихрадзе Г.К. Изучение влияния усадки и адгезии ремонтных составов на долговечность // Инновации и инвестиции. 2020. № 6. С. 254–257.

6. Труфакина Л.М. Свойства полимерных композитов на основе поливинилового спирта // Известия Томского политехнического университета. Химия и химические технологии. 2014. Т. 325. № 3. С. 92–97.

7. Узаева А.А. Комплексные ремонтные составы на основе полимерных вяжущих // Современные технологии. 2017. № 5. С. 134–137.

8. Сухая строительная смесь: пат. 2302398 Рос. Федерация / Белов В.В., Смирнов М.А.; заявл. 13.02.2006; опубл. 10.07.2007, Бюл. № 19. 5 с.

9. Пустовгар А.П., Соловьев В.Н., Матузов А.В. Ремонтные составы для строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2015. № 5. С. 223–229.

10. Вавренюк С.В. Структурообразование цементных систем в присутствии добавок поливинилового спирта // Вестник ВолгГАСУ. Строительные науки. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. С. 101–104.

11. Effect of Polyvinyl Alcohol on the Rheological Properties of Cement Mortar / Fang Liu, Baomin Wang, Yunqing Xing, Kunkun Zhang, Wei Jiang // Molecules. 2020. № 25 (3). 10 p.

12. Polyvinyl-Alcohol-Modified Calcium Sulphoaluminate Cement Repair Mortar: Hydration and Properties / Yongjie Bian, Yongbo Huang, Fuxin Li, Dong Dong, Honggen Zhao, Piqi Zhao, Lingchao Lu // Materials. 2021. № 14. 18 p.

THEORETICAL PREREQUISITES FOR THE USE OF PULVERIZED SILICATE BRICK PRODUCTION WASTE AND POLYVINYL ALCOHOL ADDITIVES IN RESTORATION COMPOSITIONS

D.M. Orlov, M.A. Smirnov

***Abstract.** The article provides an analysis of literary sources for the purpose of further research in the field of restoration binders. The relevance of the development of economical and affordable restoration compositions and the requirements for them are indicated. The possibility of using powdery waste from the production of silicate bricks in the composition of the material is analyzed, in order to solve problems of their disposal and to reduce the cost of restoration and construction products. The need for adhesion of the restoration and repair composition is proved. The positive properties of polyvinyl alcohol as a polymer additive in the composition of restoration mixtures are considered. It has been established that PVS contributes to increasing the strength of cement systems. It is noted that PVS is well combined with the above-mentioned dust in*

terms of achieving high physico-mechanical and adhesive properties in the restoration solution. Directions for further research are formulated.

Keywords: *restoration composition, adhesion, strength, silicate brick production dust, polyvinyl alcohol.*

Об авторах:

ОРЛОВ Денис Михайлович – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: den.orlov.2018@inbox.ru

СМИРНОВ Матвей Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

About the authors:

ORLOV Denis Mikhailovich – Master Student of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: den.orlov.2018@inbox.ru

SMIRNOV Matvey Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

УДК 666.972

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГИПСОВЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ КОНТАКТНО-КОНДЕНСАЦИОННОГО ТВЕРДЕНИЯ

**В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новиченкова,
К.С. Петропавловский, М.Ю. Завадько**

© Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б.,
Петропавловский К.С., Завадько М.Ю., 2022

***Аннотация.** Работа посвящена вопросу регулирования свойств материалов на основе гипсовых полифракционных дисперсных систем путем формирования оптимальной внутренней структуры. Подобрано оптимальное соотношение крупной и мелкой фракции в составе смеси, отвечающее принятой физико-химической модели негидратационного твердения.*

***Ключевые слова:** двухводный гипс, негидратационное твердение, зерновой состав.*

Вяжущие контактно-конденсационного твердения, получаемые на основе двуводного гипса, требуют поддержания в системе некоторых обязательных условий, обеспечивающих формирование структуры [1]. Одним из таких условий, определяющим характер образующейся структуры прессованного гипсового камня, является оптимизация зернового состава [2]. Установлено, что дисперсность и гранулометрия вяжущего определяют строение порового пространства материала, а значит, основные эксплуатационные показатели гипсовых композиций [3, 4]. Получение более плотной упаковки в дисперсной системе связано с использованием смесей разных фракций, что позволяет повысить прочность структуры гидратационного типа [5]. В то же время установлено, что прочность дисперсных систем определяется также и прочностью частиц, образующих материал, и числом контактов между частицами твердой фазы, и средней прочностью отдельного контакта [3]. Число контактов, в свою очередь, зависит от размера частиц и способа их упаковки. Это устанавливается характеристиками сырьевой смеси, зависящими от характера измельчения материала.

Математическим описанием распределения частиц по размерам в составе порошков занимались многие исследователи. Были предложены различные уравнения для функций распределения [2]. Знание закона распределения размеров частиц в составе сырьевых гипсовых порошков позволяет решать разнообразные теоретические и прикладные задачи:

- 1) обоснованно экстраполировать дисперсный состав по всему необходимому диапазону размеров частиц (главным образом в самых мелких фракциях);
- 2) на основе данных о весовом распределении вычислять распределение частиц по их поверхности, числу, объему и пр.;
- 3) обоснованно выбирать средние показатели, характеризующие порошки;
- 4) более точно производить технические расчеты;
- 5) упрощать исследование на моделях.

Наиболее широкое распространение как за рубежом, так и в нашей стране получила формула Розина – Раммлера – Шперлинга – Беннета (сокращенно звучит как формула Розина – Раммлера) [4]. При этом во многих работах теоретически и экспериментально доказывается, что уравнения Розина – Раммлера к высокодисперсным составам применять нельзя. Логарифмически нормальный закон распределения А.Н. Колмогорова имеет, если сравнивать с законом Розина – Раммлера, большие преимущества для описания распределения гипсовых дисперсных систем [2].

Гипсовые высокодисперсные порошки могут состоять не только из отдельных минеральных первичных частиц, но и из агрегатов, образующихся в процессе помола. Влияние таких агрегатов и собственно

частиц на свойства порошков, в том числе на способность к уплотнению, далеко не одинаково. Эти различия должны еще более отчетливо проявляться при многофракционности системы [6], образуемой в случае смешения порошков с различной удельной поверхностью для получения наиболее плотной упаковки материала после прессования (тут требуется использование численных методов для математического описания формирования структуры дисперсной системы).

В связи с тем, что формирование структуры контактно-конденсационного твердения имеет свои особенности [2, 7], прочность гипсового камня «квазибазального» типа (рис. 1), согласно теории контактно-конденсационного твердения, определяется в первую очередь количеством контактов в системе, которые образуются между частицами разного размера [7]. Кроме того, для получения эффективного композита на основе отходов фосфогипсового дигидрата необходимо, по мнению О.Б. Кукиной, учитывать принципы теории агрегативной устойчивости [4], что также обеспечивается подбором гранулометрического состава дисперсных систем.

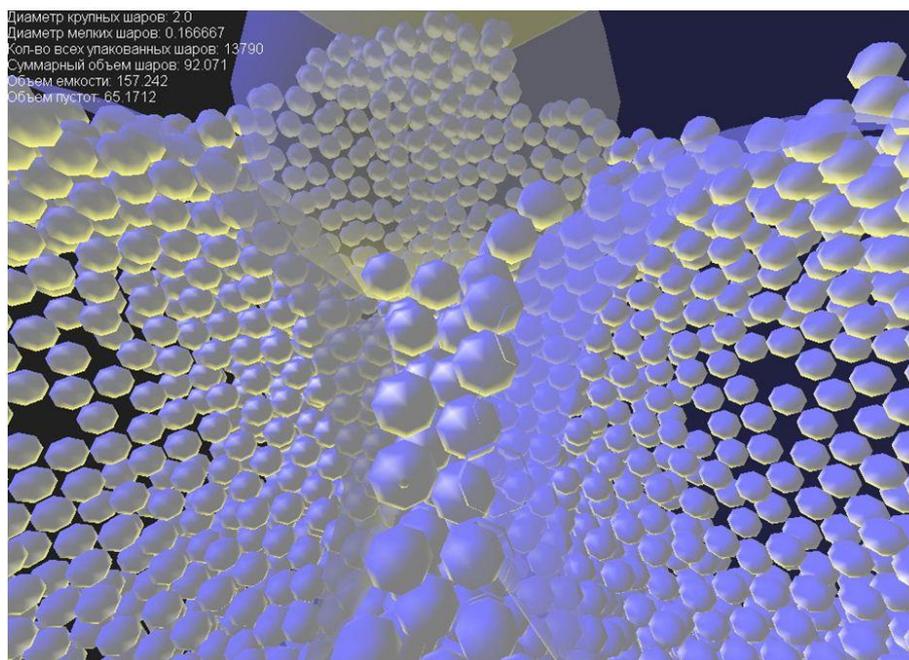


Рис. 1. Фрагмент внутренней структуры дисперсной системы контактно-конденсационного твердения в разрезе

Исследования структуры полифракционных дисперсных систем проводились с использованием порошков грубого и тонкого помола двуводного гипса, соответствующих ГОСТ 125, а также с использованием бидисперсных смесей безобжигового гипсового вяжущего.

Проведенными исследованиями подтверждено положительное влияние увеличения дисперсности двуводного гипса на физико-механические характеристики получаемого порошка двуводного гипса и материалов на его основе (рис. 2, 3).

Согласно исследованиям зернового состава порошков двуводного гипса, проведенным с использованием лазерного анализатора частиц, в составе тонкодисперсного порошка присутствует достаточное количество частиц, отвечающих наноразмерам (рис. 2). Гистограмма распределения частиц в целом соответствует нормальному закону (имеется один максимум, кривая с обеих сторон асимптотически приближается к оси абсцисс), однако она несимметрична относительно центра, смещена в сторону мелких частиц. Максимальное количество частиц составляет 18 % с размером, равным 20 мкм (μm). Средний размер частиц в составе сырьевой смеси – 3,051 мкм (μm). Диапазон разброса частиц по размерам (рис. 2) достаточно широк – от 0,3 до 100 мкм (μm).

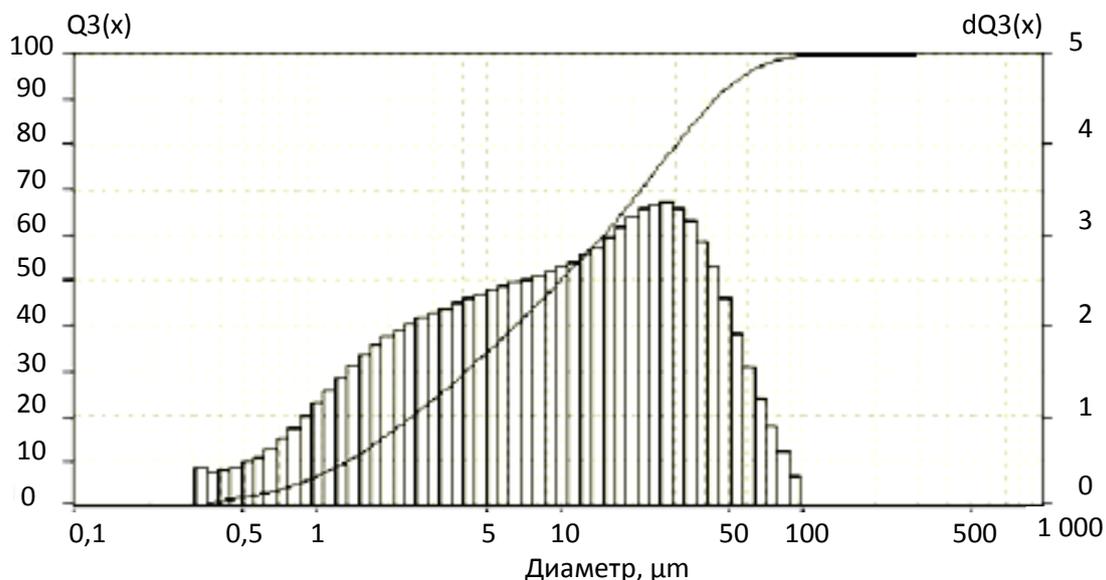


Рис. 2. Зерновой состав тонкодисперсного порошка двуводного техногенного гипса

Гистограмма распределения частиц грубодисперсного порошка подобна гистограмме частиц тонкодисперсного порошка, однако интегральная кривая более пологая, оптимум выражен неявно, в пределах диапазона распределения от 3 до 10 мкм процентное содержание частиц достаточно постоянно. Максимальное количество частиц (19,24 %) соответствует размеру 20 мкм (μm). Диапазон разброса частиц по размерам достаточно широк – от 0,3 до 70 μm .

Ввиду того, что с точки зрения плотности упаковки оптимальной является бидисперсная система, составленная из двух полифракционных составляющих, в работе были исследованы характеристики сырьевых

смесей двухводного техногенного гипса, полученные при смешивании грубо- и тонкодисперсных порошков в различных сочетаниях.

Установлено, что бидисперсная система, образованная при смешивании порошков грубого и тонкого помола двухводного техногенного гипса в соотношении 45 : 55 соответственно, в большей степени отвечает требованиям получения оптимальной структуры негидратационного твердения (рис. 3). В бидисперсной системе, согласно проведенным исследованиям, присутствует достаточное количество как крупных, так и высокодисперсных частиц, состав варьируется от 0,3 до 300 мкм. Пологость интегральной кривой распределения частиц по размерам в составе бидисперсной системы подтверждает наличие достаточно широкого диапазона распределения частиц. На гистограмме (рис. 3) имеются два выраженных пика, соответствующих максимуму в области мелких и крупных частиц. Соотношение размеров высоко- и грубодисперсных частиц, характеризующих пики, отвечает принятой физико-химической модели негидратационного твердения.

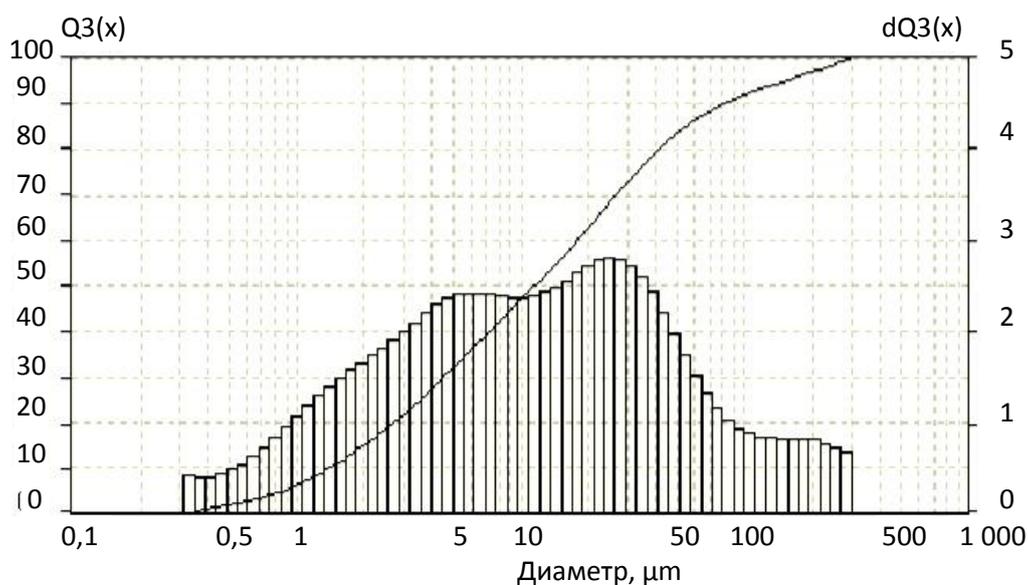


Рис. 3. Зерновой состав дисперсной системы на основе двухводного техногенного гипса, полученной из порошков грубого и тонкого помола

Регулирование состава гипсовых бинарных дисперсных систем, состоящих из порошков двухводного гипса грубого и тонкого помола, позволяет повысить прочность композита за счет оптимизации числа контактов между частицами разного размера. Это подтверждается высокими показателями прочности.

Библиографический список

1. Петропавловская В.Б., Белов В.В., Бурьянов А.Ф. Твердеющие кристаллизационные системы на основе порошков двуводного гипса // Строительные материалы. 2007. № 12. С. 46–47.
2. Петропавловская В.Б. Использование минеральных ультрадисперсных модификаторов на основе отходов промышленности в гипсовых композитах // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 18–23.
3. Никольский В.М. Улучшение технологических характеристик гипса с помощью иминодиянтарной кислоты // Строительные материалы. 2004. № 7. С. 62–64.
4. Условия выполнения принципов теории агрегативной устойчивости дисперсных систем в строительных материалах / О.Б. Кукина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 7 (739). С. 102–110.
5. Лукьянова А.Н., Старостина И.В. Строительные композиционные материалы на основе модифицированных гипсовых вяжущих, полученных из отходов производства // Фундаментальные исследования. 2013. № 4–4. С. 818–822.
6. Galtseva N., Bogdanova A. Effective binder based on the artificial anhydrite for manufacturing of filling mixtures // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 193. P. 03048. URL: <https://doaj.org/article/c52ba2bea3ce4c0cb0e4dc261f7b25ed> (дата обращения: 15.04.2022).
7. Амелина Е.А., Щукин Е.Д. Изучение некоторых закономерностей формирования контактов в пористых дисперсных структурах // Коллоидный журнал. 1970. Т. 32. № 6. С. 795–799.

FORMATION OF THE STRUCTURE OF GYPSUM DISPERSED SYSTEMS CONTACT-CONDENSATION HARDENING

**V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova,
K.S. Petropavlovskii, M.Y. Zavadko**

***Abstract.** The work is devoted to the regulation of the properties of materials based on gypsum polyfraction dispersed systems by forming an optimal internal structure. The optimal ratio of large and small fractions in the composition of the mixture was selected, corresponding to the accepted physico-chemical model of non-hydration hardening.*

***Keywords:** dihydrate gypsum, non-hydration hardening, grain composition.*

Об авторах:

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

НОВИЧЕНКОВА Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: tanovi.69@mail.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник института нано- и биотехнологий, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: ekrioro@gmail.com

ЗАВАДЬКО Мария Юрьевна – аспирант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: 79043517876@yandex.ru

About the authors:

PETROPAVLOVSKAYA Victoria Borisovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: tanovi.69@mail.ru

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Institute of Nano- and Biotechnologies, Tver State Technical University, Tver. E-mail: ekrioro@gmail.com

ZAVADKO Maria Yurievna – Postgraduate Student of the Department of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: 79043517876@yandex.ru

УДК 699.844

БЕТОН С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ИЗ СТЕКОЛЬНОГО БОЯ

Д.И. Тихомиров, В.В. Белов

© Тихомиров Д.И., Белов В.В., 2022

Аннотация. Показано влияние заполнителя из стекольного боя на свойства цементного бетона. Исследованы свойства бетонных смесей, получаемых на основе стекольного заполнителя. Проанализированы

результаты различных исследований, затрагивающих вопрос о влиянии стекла в составе бетона на прочность, жаростойкость и долговечность. Приведены новые экспериментальные результаты, показывающие, что использование оптимального содержания стекла позволяет применять бетон с неприродным заполнителем в строительстве. Установлено, что при оптимально подобранном водоцементном отношении в бетоне с заполнителем из стекла можно получить прочность, близкую к прочности бетона на природном заполнителе. Выявлено, что бетон на стекольном заполнителе имеет более низкую плотность.

Ключевые слова: *стекло, стеклобетон, отходы стекла, заполнитель, свойства.*

Введение

В настоящее время одним из перспективных направлений считается разработка энергоресурсосберегающих технологий, в которых вместо первичных применяются вторичные сырьевые материалы, что позволяет сократить объемы отходов в окружающей среде и вовлечь их в ресурсный цикл, уменьшив при этом объемы использования первичных природных ресурсов.

Основными отходами являются стеклянные, они представляют собой трудноутилизируемый материал, имеющий различный дисперсный состав, который практически не используется повторно.

В строительстве бетон может использоваться как в любых конструкциях, несущих и самонесущих, так и в декоративных и отделочных изделиях. В настоящее время товароборот бетона снижается из-за кризиса, пандемии и нехватки ресурсов. Встает вопрос о внедрении новых энергоресурсосберегающих технологий, которые позволят увеличить объемы производства и уменьшить потребность в первичных природных ресурсах.

Отличным сырьем для заполнителя бетона может послужить стекольный бой, удельный вес которого будет ниже традиционных заполнителей. Производство бетона на традиционных заполнителях с каждым годом требует все больших затрат на добычу природных ресурсов и энергии для их переработки.

В статьях [1, 2] приведены примеры того, как использование вторичных видов сырья помогает сократить затраты на добычу и обработку необходимых ресурсов. Во-первых, использование отходов в 2–3 раза дешевле использования природного сырья, во-вторых, расход энергии уменьшается на 10–40 %.

Исследования [3] показали, что каждая тонна переработанного стекла экономит более тонны природного сырья, в том числе около 650 кг песка, 186 кг соды и около 200 кг известняка; данная экономия распространяется на всю сырьевую цепочку, включая добычу сырья и его

перевозку. Авторы статьи [4] столкнулись с проблемой вторичного использования стеклобоя в нашей стране, которая заключается в неорганизованности сбора стеклянного боя, сложности и трудоемкости процесса сбора, очистки, сортировки стеклянного сырья.

В статье [5] подчеркнута, что использование стеклобоя позволяет получить бетоны с характеристиками, превосходящими по прочности обычные бетоны на песчаном заполнителе. Такое увеличение прочности будет достигаться за счет поверхностной кристаллизации крупного заполнителя. В статье [5] также говорится о возможности использования тонкодисперсного стекла, но уже в виде вяжущего или с учетом дальнейшей переработки в пеностекло. Экспериментально установлено [1], что мелкие и крупные фракции стекла применять нецелесообразно по причине большой вероятности протекания силикатно-щелочной реакции, однако ее можно подавить использованием добавок или предварительной термообработкой.

Авторы статей [1, 2] считают наиболее эффективным использование пеностекла в качестве заполнителя. Это позволит получить широкий диапазон свойств.

Разумеется, существуют не только плюсы применения стекла в бетоне, но и минусы. Взаимодействие натрий-кальциевого стекла с цементным камнем создает серьезную проблему при использовании стеклобоя в качестве наполнителя. В результате этой реакции образуется силикатный гель, накопление которого может привести к увеличению осмотического давления внутри затвердевшего бетона и его растрескиванию [1, 3, 6–8]. Больше всего подвержены коррозионному разрушению бетоны с использованием естественного и смешанного фракционного состава [1, 6].

Исследования [1] показали, что избежать возникновения щелочесиликатной реакции при использовании стеклобоя в качестве мелкого заполнителя без дополнительных обработок и добавок невозможно.

В статье [6] рассмотрена проблема внутренней коррозии, связанной с протеканием щелочесиликатной реакции между частицами наполнителя. Авторы предлагают решить проблему следующим образом: 1) использовать низкощелочные цементные вяжущие; 2) применить заполнители, не содержащие реакционноспособного диоксида кремния. Кроме того, предлагается использовать минимальное количество цемента или изготавливать бетон на цементах, содержащих небольшое количество щелочей, применять добавки к цементу, которые позволяют уменьшить в нем количество щелочей, или вводить гидрофобизирующие и газовыделяющие добавки.

Применение типового ряда модификаторов бетона может существенно затормозить проявление щелочной коррозии. К такому выводу пришли авторы статьи [7]. Они предлагают использовать в

качестве подавителя деформаций расширения при щелочной коррозии «Лигнопан Б-4», УПД-1, МЛ-2 и (особенно эффективно) суперпластификатор С-3.

В статье [8] авторы использовали активную минеральную добавку, имеющую кислый характер, что привело к уменьшению основности вяжущего и понижению активности щелочи за счет ее химического поглощения активными компонентами смешанного вяжущего. Гидравлически активными компонентами смешанного вяжущего являются аморфный кремнезем цеолитсодержащей породы и стеклофаза золы теплоэлектроцентрали.

Альтернативой добавкам стали методы, описанные в статьях [1, 5]. Авторы пришли к выводу о том, что необходима кристаллизация стекла на поверхности заполнителя, которая приведет к подавлению силикатно-щелочной реакции. Для этого необходимо провести термообработку стекла в печи, после чего на поверхности стекла образуется кристаллическая пленка, которая в дальнейшем и предотвратит начало коррозии.

Авторы статьи [5] рассмотрели полное подавление щелочно-силикатной реакции путем добавления высокодисперсного оксида кремнезема (0,5–5 %), а также использовали ионно-модифицированное стекло с заменой Na^+ на H^+ .

Для эффективного использования стекольного заполнителя необходимо определиться с фракционным составом. В статье [1] были рассмотрены различные фракционные составы стеклобоя в бетоне и проанализировано их влияние на итоговую прочность. В результате было выяснено, что предпочтительная фракция – 1,2 мм и выше. Самый минимум прочности достигается на фракции 0,1–0,3 мм. Существенное расширение образцов (вследствие силикатно-щелочной реакции) достигается на заполнителе 1,25 мм. При размере частиц меньше 50 мкм происходит аномальный рост прочности, что обусловлено высокой удельной поверхностью. Чтобы использовать крупные фракции от 5 до 20 мм, необходимы две добавки: суперпластификатор и замедлитель схватывания. Это позволит уменьшить воздействие щелочесиликатной реакции на бетон [9].

Авторы статьи [4] получили данные, в которых описывается применение различного вида стеклобоя в бетоне (в зависимости от назначения конструкции). Таким образом, для изделий автоклавного твердения добавка стеклобоя в количестве 1,2 % позволяет получить материал с объемной массой $1\,230\text{ кг/м}^3$. Молотое стекло в составе 25–30 % с различными добавками дает возможность изготовить кислотостойкие ячеистые бетоны. Тонкомолотый стеклобой (2–5 % в бетоне) используется для получения жаростойкого бетона.

По результатам статьи [9] выявлено, что использование стеклобоя в количестве 30 % от общего заполнителя наиболее эффективно, а минимальное эффективное количество составило 10 %.

Цели настоящего исследования заключались в изучении влияния стекольного заполнителя на основные характеристики бетона, такие как прочность и плотность; получении бетона с минимальной потерей прочности и сокращением расхода обычного заполнителя.

Материалы и методы исследования

При проведении исследований был использован портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (Евроцемент 500 Экстра) по ГОСТ 31108-2020; песок строительный с модулем крупности $M_{кр} = 2,34$ по ГОСТ 8736-2014; смешанный стекольный бой фракции 3–6 мм. Для регулирования подвижности бетонных смесей использовался суперпластификатор С-3 по ТУ 6-36-0204229-625-90.

Чтобы решить поставленную задачу, потребовалось сделать по три образца для разного процентного содержания стекольного заполнителя, а также серию образцов нормального состава (без стекла). Следовательно, необходимо было изготовить 12 образцов.

Все образцы, изготовленные в ходе исследований, имели одинаковый состав матрицы: Ц : П = 1 : 6 при В/Ц = 0,56 и расходе добавки суперпластификатора 1 % от массы цемента. Диапазон вариации количества вводимого стекла составлял 10–30 % от содержания песка. Производилась замена части песка стеклом.

Подготовка стекла осуществлялась помолом в щековой дробилке и отсеиванием на сите. Процедура повторялась несколько раз, пока не было набрано необходимое количество стекла нужной фракции.

В ходе экспериментальной части научного исследования применялось испытательное оборудование: щековая дробилка, камера нормального хранения и тепловлажностной обработки КНТ-1; машина для испытания на сжатие и изгиб МС-500.

Приготовление смеси исследуемых составов для образцов осуществлялось в лаборатории (в емкостях для смешивания). Цементно-песчаную смесь получали путем перемешивания сухих компонентов в течение 1 мин до достижения визуального равномерного распределения частиц цемента в массе песка; к сухой цементно-песчаной смеси добавлялось стекло, после чего происходило перемешивание в течение 2 мин. Заранее подготовленная растворная часть из воды и добавок добавлялась в сухую смесь порционно по 1/3 части и активно перемешивалась в течение 1 мин. Общее время перемешивания должно составлять не менее 5 мин. Смесь укладывалась в металлическую форму в три слоя. После каждого уложенного слоя смесь штыковалась 30 раз. Поверхность образцов заглаживалась строительным мастерком.

Температура внутри помещения в процессе приготовления образцов составляла 20 ± 2 °С, а влажность – не менее 45 %.

Образцы твердели в нормальных условиях (влажность – 60–100 %; $t = 20 \pm 2$ °С) в течение 7 сут.

В табл. 1 приведены расходы материалов на 1 м^2 .

Таблица 1

Расходы материалов на 1 м^2

Маркировка	Доля С, %	Ц, кг	П, кг	С, кг
Б0	0	520	1 560	0
Б1	10	520	1 404	156
Б2	20	520	1 248	342
Б3	30	520	1 092	468

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные значения плотности и прочности на сжатие в возрасте 7 сут стандартных образцов-кубов размером $7 \times 7 \times 7$ см приведены на рис. 1 и 2. Сводные данные приведены в табл. 2.

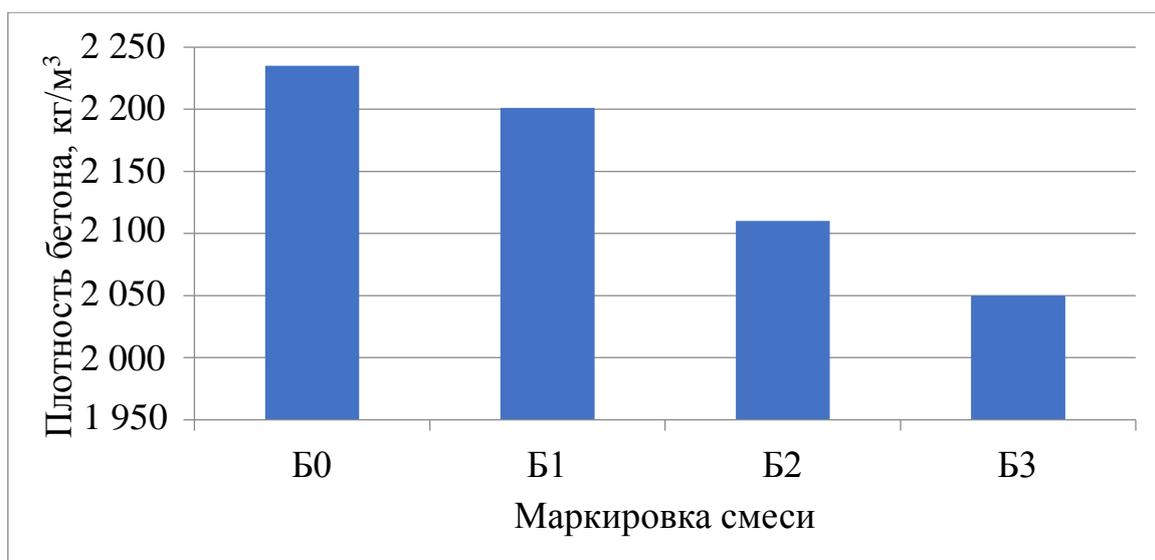


Рис. 1. Сравнительный анализ плотности образцов

Анализ результатов показал, что все кубы с заполнителем из стекла имеют среднюю плотность в диапазоне $2\,050\text{--}2\,201 \text{ кг/м}^3$. Все образцы, содержащие стекольные заполнители, имеют плотность ниже, чем у контрольных образцов. Образцы, не содержащие стекло, имеют самую высокую прочность при сжатии – 13 МПа. Образцы, содержащие разный процент стекла, характеризуются следующей прочностью: смесь Б1 – 8,5 МПа; смесь Б2 – 8,8 МПа; смесь Б3 – 9 МПа. Потери прочности при

сжатии, по сравнению с контрольными образцами, составили 34,6; 32,3 и 30,8 % соответственно.

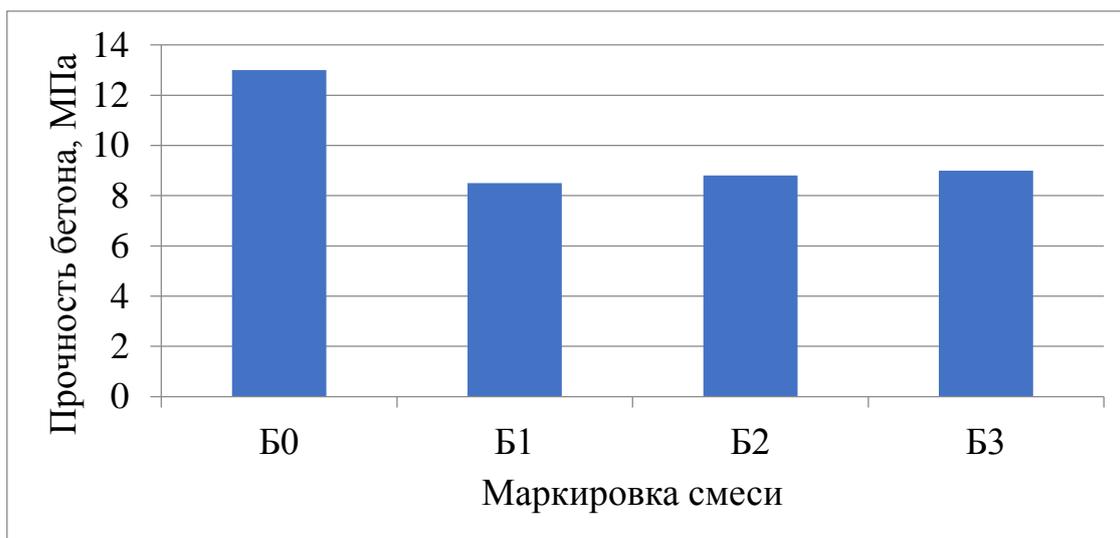


Рис. 2. Сравнительный анализ прочности на сжатие

Таблица 2

Сводные данные

Маркировка	Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа
Б0	2 235	13
Б1	2 201	8,5
Б2	2 110	8,8
Б3	2 050	9

Подобные исследования проводили авторы статьи [9]. В ходе их исследования были получены аналогичные зависимости, однако потери прочности при максимальном содержании стекла составили 25 %. Скорее всего, это связано с тем, что авторы использовали более крупный заполнитель фракции 6–12 мм. Их исследования показали возможность использования стекольного боя для получения бетона. Замена 30 % природного заполнителя стеклом снижает прочность на 30 %. Используя различные комбинации заполнителя из стекла для замены природных заполнителей, можно производить бетон с прочностью, близкой к прочности бетона на обычном заполнителе. Однако необходимо провести дополнительные исследования влияния различных добавок и найти способ избежать потери прочности.

Выводы и заключение

1. Показано, что введение в состав бетонной смеси заполнителя из стекла приводит к снижению прочности бетона. Кроме того, наблюдается снижение плотности бетона.

2. Выявлено, что применение стекольного заполнителя может уменьшить расход природного заполнителя – песка.

3. Полученные данные показывают необходимость дальнейших исследований в этом направлении, а также разработки состава с дополнительными добавками для уменьшения потери прочности.

На основе выполненных предварительных лабораторных испытаний можно сделать вывод о том, что применение заполнителя из стекла возможно, однако не позволяет получить требуемую прочность бетона. Необходимы дополнительные исследования в этой области и поиск добавок, которые помогут избежать потери прочности.

Библиографический список

1. Пузанов С.И. Особенности использования материалов на основе стеклобоя как заполнителей портландцементного бетона // Строительные материалы. 2007. № 7. С. 12–15.

2. Пузанов С.И., Кетов А.А. Комплексная переработка стеклобоя в производстве строительных материалов // Экология и промышленность России. 2009. № 12. С. 4–7.

3. Баратов С.Э. Вторичная переработка стекла в России: взгляд изнутри // Наука, техника и образование. 2015. № 3 (9). С. 33–35.

4. Шелковникова Т.И., Баранов Е.В., Черкасов С.В. Проблемы и перспективы сбора и переработки боя стекла и применение изделий на его основе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. Т. 4. № 9. С. 14–20.

5. Минько Н.И., Калатоzi В.В. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // Вестник БГТУ. 2018. № 1. С. 82–88.

6. Саулин Д.В. Исследование щелочесиликатного взаимодействия пеностекольных наполнителей с цементным вяжущим // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2017. № 1. С. 89–104.

7. Морозова Н.Н., Хозин В.Г. Проблема щелочной коррозии бетонов в республике Татарстан и пути ее решения // Строительные материалы и технологии. Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2005. № 2 (4). С. 58–63.

8. Изотов В.С. Особенности щелочной коррозии и высолообразования в бетонах на смешанных вяжущих // Строительные материалы и технологии. Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2003. № 1. С. 68–69.

9. Пустотелые стеновые бетонные блоки с рециклированными заполнителями и стеклом / П.Ю. Матар [и др.] // Строительные материалы. 2016. № 3. С. 69–75.

10. Семенюк С.Д., Ржевуцкая В.А. Влияние компонентов легкого бетона на прочностные и деформативные характеристики // Вестник Белорусско-Российского университета. 2018. № 4 (61). С. 102–109.
11. Ярмаковский В.Н., Семченков А.С. Конструкционные легкие бетоны новых модификаций в ресурсоэнергосберегающих строительных системах зданий // Строительные материалы. 2016. № 3. С. 31–39.
12. Трамбовецкий В.П. Новые подходы к технологии бетона и перспективы ее развития // Технологии бетонов. 2013. № 4. С. 37–39.
13. Studies on concrete containing ground waste glass / Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez // Cement and Concrete Research. 2000. V. 30. № 1. P. 91–100.
14. Liang H., Zhu H., Byars E.A. Use of waste glass as aggregate in concrete // 7th UK Care Annual General Meeting. UK Chinese Association of Resources and Environment. Greenwich, 2007. P. 1–7.
15. Ucol-Ganiron T.Jr. Recycled window glass for non-load bearing walls // International Journal of Innovation, Management and Technology. 2012. V. 3. № 6. P. 725–730.

CONCRETE WITH GLASS AGGREGATE

D.I. Tikhomirov, V.V. Belov

***Abstract.** The influence of the filler from the glass fight on the properties of cement concrete was shown, the properties of concrete mixtures obtained on the basis of glass filler were investigated. The results of a study by various authors on the influence of glass in the composition of concrete on strength, heat resistance and durability are analyzed. New experimental results are presented, showing that the use of optimal glass content allows the use of concrete with non-natural aggregate in construction. It has been established that with an optimally selected water-cement ratio in concrete with a glass filler, it is possible to obtain a strength close to the strength of concrete on a natural aggregate. It is also established that the concrete on the glass filler has a lower density.*

***Keywords:** glass, glass concrete, glass waste, aggregate, properties.*

Об авторах:

ТИХОМИРОВ Дмитрий Игоревич – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: get4nice@gmail.com

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

About the authors:

TIKHOMIROV Dmitry Igorevich – Master Student of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: get4nice@gmail.com

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

УДК 332(98)+338.24(470+571)

АРКТИЧЕСКИЙ ОТВЕТ: НОВАЯ СТРАТЕГИЯ ОСВОЕНИЯ АРКТИКИ

В.И. Трофимов

© Трофимов В.И., 2022

***Аннотация.** В статье рассмотрена концепция ускоренного развития Арктической зоны, а также Сибири и Дальнего Востока России. Выявлены основные проблемы, препятствующие эффективному экономическому развитию страны. Показано, что ускоренное и эффективное освоение Арктических регионов представляет собой сложную стратегическую задачу, решение которой требует привлечения огромных инвестиций. Указано, что без международного участия решить такую задачу будет сложно. Доказано, что эффективный подъем экономики возможен только на основе комплексного освоения с использованием инновационных решений, технологий и с учетом необходимых согласований при реализации взаимовыгодных международных проектов России и, в частности, Китая. При этом должна быть выработана новая объединяющая концепция экономического развития не только для Арктики, но и для Сибири и Дальнего Востока. С учетом выявленных проблем предложена концепция мегапроекта, в основе которого лежит идея синхронизации функционирования существующих и проектируемых транспортных систем, строящихся промышленных кластеров в Арктической зоне, Сибири, на Дальнем Востоке и работы Северного морского пути, а также Транссибирской железнодорожной магистрали. В данную концепцию мог бы вписаться и китайский проект, имеющий название «Новый шелковый путь».*

***Ключевые слова:** транспорт, Арктические зоны, экономика, промышленные кластеры, инвестиции, проект.*

Современный высокотехнологичный военный потенциал России, а также стабильная политическая система позволяют уверенно смотреть в будущее, дают возможность заниматься крупными экономическими проектами.

В последние годы в связи с сокращением запасов добываемого развитыми странами (США, Канадой, Великобританией, Китаем, Японией и др.) энергетического сырья возрастает интерес к Арктике и Антарктике, где были обнаружены крупнейшие месторождения нефти, газа и прочего стратегического сырья. Однако если в Антарктиде разрешена только научная деятельность (объявлена свободной зоной), то в Арктике в настоящее время активизируются исследовательские и разведочные работы.

Понимая стратегическую важность скорого вовлечения месторождений в народно-хозяйственную деятельность, а также учитывая защиту российских интересов в Арктике, Правительство РФ приняло государственную программу «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года» (Постановление № 366 от 21.04.2014) с последующим ее продлением до 2025 года. В рамках программы в период с 2015 до 2020 года запланировано финансирование в размере 160 млрд руб., а в период 2021–2025 годов – еще больше! Для решения стратегических задач, в том числе и оборонных, связанных с обустройством арктических территорий, привлекаются крупнейшие российские и зарубежные корпорации, проектные и научно-исследовательские институты.

Одной из важных задач, записанных в программе, является обеспечение реализации проектов по развитию транспортной, энергетической и иной инфраструктуры, необходимой для формирования и обеспечения функционирования опорных зон развития Арктической зоны Российской Федерации.

Эффективное освоение уникальных и стратегически важных для страны месторождений, а также надежная их защита требуют развитой и надежной транспортной сети: автомобильных и железных дорог, аэродромов и т. п. При этом создание сети невозможно без применения новых технологических и конструктивных решений при сооружении объектов в удаленных районах Арктики.

Хотя программа и имеет целостную концепцию реализации, в которой предусматривается вовлечение крупных российских и зарубежных компаний, в то же время она включает и разрозненные проекты.

Строительство высокочрезвычайно затратных транспортных систем по перекачке сырьевых материалов (подобных газопроводу «Сила Сибири» и нефтепроводу, которые построены в Китае для переработки нефти и газа), позволяет существенно формировать бюджет России, но не способствует

созданию промышленной инфраструктуры в Сибири и на Дальнем Востоке.

Создание таких промышленных мегакластеров, как Ямальский, позволяет России быть крупнейшим игроком на нефтегазовом рынке. В то же время Дальний Восток и Сибирь со своими промышленными комплексами остаются практически невстроенными в общую концепцию ускоренного развития страны. Одной из причин является отсутствие в стране разветвленной транспортной системы.

В статье [1] показано и обосновано, что перспективы развития Арктических зон напрямую связаны с реализацией транспортных и инфраструктурных проектов.

В статье [2] указан важный момент: любой проект в Арктике должен иметь комплексный характер, чтобы обеспечивать взаимосвязь создания арктической транспортной системы и развития энергетической инфраструктуры и объектов промышленности.

При освоении разведанных месторождений цель заключается в максимально возможной переработке сырья на месте, сокращении огромных затрат, связанных с его транспортировкой в различные районы страны и за рубеж. Для этого проектируются предприятия и привлекаются крупные инвесторы (например, при создании производства ценного материала – синтетического каучука).

В статье [3] рассматриваются возможности реализации арктических проектов по освоению минерально-сырьевой базы при использовании системы минерально-сырьевых центров. Однако такие объекты инфраструктурного характера не встроены в общую концепцию освоения Арктических зон.

Авторы статьи [4] предлагают рассматривать международное сотрудничество в рамках китайского проекта – Арктического пояса Шелкового пути, являющегося частью проекта «Один пояс – один путь», в качестве новой самостоятельной формы экономического партнерства.

Совместная работа России и Китая в Арктике воспринимается как составная часть сопряжения инициативы «Большое евразийское партнерство» и китайской инициативы «Один пояс – один путь» с учетом российских экономических интересов. Стратегическим сотрудничеством здесь предлагается считать обустройство Северного морского пути и налаживание на нем грузовых перевозок, чтобы он стал глобальной конкурентоспособной транспортной артерией. При этом указывается, что его реализация позволит России ускоренно совершенствовать инфраструктуру в северных регионах, обеспечивать поступательную динамику развития всего национального хозяйства в долгосрочной перспективе.

На карте представлены два варианта прохождения «Нового шелкового пути» по территории России. Однако если проанализировать их возможное влияние на экономическое развитие территорий России, то видно, что ни тот ни другой маршруты практически не затрагивают Сибирь и Дальний Восток (рис. 1) [5].



Рис. 1. Карта предполагаемых транспортных коридоров «Нового шелкового пути»

Авторы статьи [2] правильно считают, что «...сложившаяся политическая ситуация не содействует развитию сотрудничества России с другими членами Арктического Совета, перед Россией стоит широкомасштабная задача ускоренного технологического прорыва, в том числе применительно к Арктике».

Участие в китайском проекте «Один пояс – один путь» выгодно России, однако не решает главной задачи по обеспечению, как сказал президент В.В. Путин, «рывка» в экономике. По сути, идет разговор об обслуживании китайского проекта «Новый шелковый путь». Эту мысль подтверждает в своей работе С. Уянаев, делая вывод, что возможности выгодного для России инвестиционного сотрудничества в рамках сопряжения – строительства Евразийского экономического союза и Экономического пояса Шелкового пути – пока остаются в основном потенциальными [6].

Можно констатировать, что при реализации проекта «Новый шелковый путь» Россия не слишком заинтересована в достижении его целей по следующим причинам:

1) проект решает только тактические задачи сегодняшнего дня, а не стратегические (в плане решительного подъема экономики России);

2) проект нацелен в большей степени на решение стратегических задач КНР;

3) проект еще больше связывает страны Средней Азии с экономикой КНР, вовлекая их в свою политическую орбиту и отдаляя от России;

4) в стороне от проекта остаются Сибирь и Дальний Восток, которые, по сути, не вписываются в него;

5) реализация проекта приведет к тому, что Северный морской путь не будет загружен в полную силу, снизится его прогнозируемая эффективность.

В такой неоднозначной ситуации Россия обязана предложить более выгодный мегапроект для Европы и Азии, имеющий не только логистическую составляющую (транспортный коридор), но и экономико-промышленную. Данный проект должен включать и «Новый шелковый путь».

В каждой из рассмотренных выше работ предлагаются решения лишь частных задач, которые способствуют развитию экономики России даже с учетом стратегического партнерства с Китаем в определенных рамках. При этом в них нет объединяющей идеи – концепции возрождения экономики России. В сложившихся условиях Россия обязана предложить новую концепцию, в основе которой должен быть инновационный проект, направленный на возрождение российской экономической мощи и не учитывающий лишь интересы Китая и других стран.

Авторы настоящей статьи полагают, что нужен комплексный мегапроект, в основе которого должна лежать идея объединения и синхронизации функционирования существующих и проектируемых транспортных систем, строящихся промышленных кластеров в Арктической зоне, Сибири, на Дальнем Востоке и работы Северного морского пути и Транссибирской железнодорожной магистрали (ТЖМ). В него мог бы вписаться и «Новый шелковый путь». Реализация подобного мегапроекта позволила бы дать толчок интенсивному экономическому развитию России. В связи с этим предлагается, чтобы Северный морской путь функционировал синхронно с ТЖМ. Для этого необходимо создание Трансарктической автомобильной магистрали (ТАМ), которая бы дополняла Северный морской путь и соединяла его с мегапромышленными кластерами в свободных экономических зонах, образуя Арктический промышленно-логистический пояс. В свою очередь, Арктический промышленно-логистический пояс, связанный с ТЖМ, в комплексе с Северным морским путем образует новую единую промышленно-транспортную мегасистему Российской Федерации (рис. 2).



Рис. 2. Схема транспортных магистралей России.

Условные обозначения: — действующие железные дороги;
 --- предлагаемый вариант ТАМ; - - - - железные дороги сопряжения

Учитывая важность принимаемых Правительством РФ решений, основанных на обеспечении экономической безопасности страны, авторы предлагают вариант концепции мегапроекта под названием «Арктический ответ: новая стратегия освоения Арктики». Его реализация может стать одним из основных локомотивов всей экономики России. Цель мегапроекта – создание высокотехнологичного Арктического промышленно-логистического пояса от Мурманска до Анадыря, включающего взаимосвязанные между собой мегапромышленные кластеры (соединенные высокотехнологичными транспортными коммуникациями (коридорами)), а также функционирующие ТЖМ и Северный морской путь и позволяющего в условиях промышленно-логистического пояса синхронизировать добычу полезных ископаемых и развертывание производства востребованных на международном рынке полуфабрикатов и изделий, высокотехнологичного оборудования и роботизированных комплексов (с минимальными транспортными расходами).

Реализацию мегапроекта предлагается разделить на три этапа. Продолжительность каждого – примерно 10 лет, общий период – 30 лет.

Этап 1

В основе данного этапа должно лежать создание арктической многофункциональной автодорожной транспортной системы протяженностью от Мурманска до Анадыря, т. е. ТАМ, с ответвлениями на север к морским портам и на юг к основным промышленным зонам до ТЖМ (см. рис. 2). При этом в отличие от автодорожной магистрали строить

столь протяженную железнодорожную магистраль в Арктической зоне (такие предложения есть) было бы невыгодно по трем причинам: из-за более высокой стоимости строительства (в 4–5 раз дороже); более длительных сроков строительства; более низкой надежности эксплуатации дороги. Таким образом, экономически целесообразно строить железные дороги только для сопряжения ТАМ с Транссибирской железной дорогой в местах расположения промышленных мегакластеров. В то же время важными составляющими проекта могут стать строительство новых и модернизация старых аэродромов военного и гражданского назначений.

Безусловно, при реализации мегапроекта должны использоваться как мировые, так и отечественные прогрессивные технологии. В частности, при осуществлении первого этапа может быть задействована высокоэффективная отечественная разработка ТвГТУ «Быстровозводимые дороги для Арктических зон», которая была высоко оценена на Международной выставке «Архимед-2019», получила золотую медаль, а также третью премию на Международном конкурсе научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа (2020 год) [7, 8].

Продолжительность первого этапа: 2021–2030 годы (2026–2035 годы). Ориентировочная стоимость реализации: 1–15 млрд долл.

Такая стоимость принята из условия, что если средняя стоимость 1 км асфальтобетонной дороги на Севере будет составлять 100 млн руб., то ориентировочные затраты на строительство 10 000 км (примерное расстояние с запада на восток страны) составят (с учетом текущего курса доллара) примерно 14,3 млрд долл. [9]. Это очень большие деньги, но надо иметь в виду, что с началом строительства дороги (ТАМ) начнется и поэтапная ее эксплуатация, соответственно, дорога будет приносить доход, частично покрывая затраты на ее строительство в течение 10 лет.

Этап 2

В основе данного этапа должно лежать сопряжение ТАМ с ТЖМ и транспортной системой «Нового шелкового пути» Китая отдельными железными дорогами (см. рис. 2).

Продолжительность этапа: 2031–2040 годы (2036–2045 годы). Ориентировочная стоимость реализации: 15 млрд долл.

За основу расчета взята стоимость строительства 170 км железной дороги Бованенково – Сабетта на Ямале, и стоимость эта составляет примерно 115 млрд руб. [10]. Один километр дороги стоит примерно 0,676 млрд руб. Если принять среднюю протяженность от ТАМ до ТЖД (например, протяженность Якутск – ТЖД составляет 1 239 км [11]) или взять протяженность действующей магистрали Москва – Воркута, которая составляет 1 885 км, то можно принять среднюю протяженность линий сопряжения ТАМ с ТЖД равной 1 500 км. Тогда стоимость строительства

одной линии сопряжения составит 1 014 млрд руб. (или примерно 16,56 млрд долл.). Если строить, например, три линии, то общая стоимость составит 45 млрд долл. При этом надо учесть, что две линии сопряжения уже действуют. Это линии Москва – Воркута и Москва – Мурманск.

Этап 3

Успешное осуществление первых двух этапов обеспечит транспортную доступность к стратегическим сырьевым регионам и откроет реальную возможность начать новую промышленную революцию в России с привлечением западных и восточных инвестиций.

В основе третьего этапа должно лежать создание для промышленных зон полностью роботизированных производственных комплексов, осуществляющих добычу, транспортирование, начальную переработку природных ресурсов, создание мегапромышленных комплексов, химическую переработку, производство высокотехнологичной строительной техники и эффективных строительных материалов и др.

Продолжительность этапа: 2041–2050 годы (2046–2055 годы). Стоимость реализации третьего этапа будет зависеть от количества и важности для экономики страны формируемых промышленных кластеров.

По своей значимости и затратам мегапроект можно сравнить с проектом освоения Луны, однако рисков у лунного проекта больше, а отдача от реализации меньше. Это, безусловно, говорит о том, что по эффективности мегапроект «Арктический ответ: новая стратегия освоения Арктики» в большей степени отвечает нуждам экономического развития России на данном этапе ее развития.

Для реализации проекта, безусловно, необходима поддержка Государственной Думы Российской Федерации. Следует разработать новые законопроекты, обеспечивающие реальное исполнение принципа наибольшего благоприятствования для инвестиций, включая в первую очередь иностранные, на весь период реализации проекта и период дальнейшего его функционирования.

Понятно, что одной России этот мегапроект не осилить. Нужно искать заинтересованных и надежных партнеров. В настоящее время только одна страна, а именно КНР, которая в наибольшей степени заинтересована в освоении Арктики и продвижении своей экономики в Европе, может согласиться принять участие на паритетных началах в реализации мегапроекта (независимо от политических систем в России и КНР).

Попробуем спрогнозировать размер вклада в реализацию проекта по этапам при участии только двух стран (России и Китая) с учетом необходимого обеспеченного роста ВВП России на 6–10 % в год:

этап 1: КНР – 80 %, РФ – 20 %;

этап 2: КНР – 60 %, РФ – 40 %;

этап 3: КНР – 20 %, РФ – 80 %.

Понятно, что к реализации мегапроекта должны быть привлечены и другие заинтересованные страны Европы и Азии. В этом случае, безусловно, резко снизится финансовая нагрузка на Россию. В то же время реализация проекта должна стать всенародным делом. Важную роль в этом деле могут сыграть студенческие строительные отряды. Для вовлечения граждан России в реализацию мегапроекта целесообразно выпустить облигации федерального займа. Кроме того, должна быть обеспечена политическая и юридическая защита мегапроекта «Арктический ответ: новая стратегия освоения Арктики».

Учитывая особенности применения международного права при освоении Арктической зоны, надо иметь в виду, что Китай и Россия являются членами Совета безопасности ООН, поэтому могут в сложные моменты межгосударственных отношений наложить вето на негативные предложения других стран, ущемляющие права КНР и РФ в этом вопросе. В то же время применительно к международному праву, которое в целом регулирует взаимоотношения стран по вопросу освоения Арктики, есть необходимость в разработке дополнений к российским законам, которые бы защищали интересы как России, так и всех участников мегапроекта во время его реализации.

Для усиления безопасности мегапроекта было бы разумно использовать технологию противовесов. Например, учитывая политическую составляющую и противоречия между КНР и Индией, а также имея хорошие отношения России с двумя государствами, логично было бы предложить и Индии поучаствовать в реализации проекта. Последняя, обладая значительными финансовыми средствами, могла бы вложить их в проект и в то же время выполнить функцию противовеса. Кстати, в настоящее время Индия участвует в реализации ряда проектов в Арктических зонах России [12]. Помимо Индии, для полной нормализации отношений с Японией было бы выгодно привлечь и ее. В настоящее время Япония активно проявляет интерес к участию в различных проектах, реализуемых в Арктической зоне, Сибири и на Дальнем Востоке России [13].

Чтобы обезопасить экономическую составляющую проекта в случае осложнения межгосударственных отношений России с другими странами, проявляющими интерес к Арктике (как это, например, произошло с реализацией проекта «Северный поток – 2»), необходимо заручиться поддержкой международных организаций, входящих в зону ответственности ООН, чтобы Северный морской путь был всегда открыт для мореплавания и торговли.

Чтобы реализовать мегапроект, нужно привлечь основные министерства и ведомства России, а также пригласить крупнейшие российские компании. В частности, в системе Минвуза можно выделить

возможных участников мегапроекта, привлекаемых к его проработке и реализации, с учетом основных его составляющих:

для политического и экономического сопровождения МГИМО, МГУ, ВАВТ, ВШЭ, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова;

юридического и экологического сопровождения МГИМО, МГУ, ВАВТ;

технологического сопровождения МИИТ, НИУ МГСУ, СибАДИ, ТвГТУ, СФУ, МАДИ.

Важными условиями являются обеспечение реализации мегапроекта на долгосрочной основе и создание выгоды для его участников.

В заключение можно сказать, что пока предложена лишь концепция мегапроекта «Арктический ответ: новая стратегия освоения Арктики», реализация которого потребует огромных финансовых затрат, материальных ресурсов и времени, а также значительных усилий в плане повышения уровня международных отношений со странами-участниками. В то же время реализация масштабного мегапроекта поможет развить практически все отрасли народного хозяйства России, привлечь необходимое количество западных и восточных инвестиций для освоения Арктической зоны России и оживления экономики Сибири и Дальнего Востока, повысить уровень межгосударственных отношений со странами Азии и Европы, играющими большую роль на международной арене. Если учитывать важность экономической составляющей проекта, то можно прогнозировать, что после осуществления первого и второго этапов в бюджет России начнут поступать дополнительные средства, что в конечном счете приведет к снижению общей стоимости реализации мегапроекта.

Библиографический список

1. Сорокина Н.Ю. Приморские регионы арктического направления: проблемы и перспективы социально-экономического развития в Российской Федерации // Материалы Научно-практической конференции Совета по изучению производительных сил ВАВТ Минэкономразвития России: стратегические перспективы развития Арктического региона: сборник научных статей. М.: ВАВТ, 2018. С. 45–49.

2. Смирнова О.О., Прохоров В.Н. О методических подходах к отбору инвестиционных проектов при формировании «опорных зон» Арктики // Материалы Научно-практической конференции Совета по изучению производительных сил ВАВТ Минэкономразвития России: стратегические перспективы развития Арктического региона: сборник научных статей. М.: ВАВТ, 2018. С. 50–55.

3. Евсеева О.О., Череповицын А.Е. Возможности реализации арктических проектов по освоению минерально-сырьевой базы через систему минерально-сырьевых центров и особенности их оценки

// Материалы Научно-практической конференции Совета по изучению производительных сил ВАВТ Минэкономразвития России: стратегические перспективы развития Арктического региона: сборник научных статей. М.: ВАВТ. 2018. С. 23-29.

4. Перская В.В., Ремыга В.Н., Ревенко Н.С. Институциональные аспекты сотрудничества в рамках Арктического пояса Шелкового пути // Вопросы регулирования экономики. 2018. Т. 9. № 4. С. 6–21.

5. Ассоциация «Шелковый путь». URL: <https://rus-asia.com/ru?page=20> (дата обращения: 12.03.2022).

6. Уянаев С. «Пояс и путь» сомнет ЕАЭС? URL: <https://dzen.ru/media/freeconomy/poias-i-put-somnet-eaes-5c6dac6e7a2ca100b3c46db4> (дата обращения: 12.03.2022).

7. Трофимов В.И. Повышение эффективности транспортного строительства в Арктических зонах // Научный Вестник Арктики. 2018. № 3. С. 31–39.

8. Трофимов В.И. Инновационная технология строительства железных дорог в условиях Крайнего Севера // Научный Вестник Арктики. 2019. № 5. С. 20–25.

9. Администрация города Муравленко. URL: http://muravlenko.yanao.ru/novosti/novosti_yanao/12510-srednyaya-stoimost-odnogo-kilometra-asfaltov-ou-dorogi-na-yamale-sootvetstvuet.html (дата обращения: 12.03.2022).

10. Прорыв: железную дорогу за 115 млрд руб. построят в Арктике. URL: <https://kurer-sreda.ru/2019/02/28/409747-proryv-zheleznuyu-dorogu-za-115-mlrd-rub-postroyat-v-arktike> (дата обращения: 12.03.2022).

11. Амуро-Якутская железнодорожная магистраль вступает в строй в 2019 году. URL: <https://777hawk.livejournal.com/2186936.html> (дата обращения: 12.03.2022).

12. Ивановский Денис. Хождение за три моря: путь Индии в Арктику. URL: <https://goarctic.ru/work/khozhdenie-za-tri-morya-put-indii-v-arktiku/> (дата обращения: 12.03.2022).

13. Япония примет участие в развитии Северного морского пути. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5e4f86544208631185474d28/iaponiia-primet-uchastie-v-razvitii-severnogo-morskogo-puti-600910d9da2b00697363fc1c> (дата обращения: 12.03.2022).

ARCTIC ANSWER: A NEW STRATEGY DEVELOPMENT OF THE ARCTIC

V.I. Trofimov

***Abstract.** The paper considers the concept of accelerated development of the Arctic zone, as well as Siberia and the Russian Far East. The main problems that impede the effective economic development of the country are identified. It*

is shown that the accelerated and efficient development of the Arctic regions is a complex strategic task, the solution of which requires the attraction of huge investments. It is stated that without international participation it will be difficult to solve such a problem. It has been proved that only on the basis of integrated development, using innovative solutions and technologies, taking into account the coordination of the implementation of mutually beneficial international projects of Russia and, in particular, China, an effective economic recovery is possible. At the same time, a new unifying concept of economic development should be developed not only for the Arctic, but also for Siberia and the Far East. Taking into account the identified problems, a new concept of the mega project is proposed, which is based on the idea of combining and synchronizing the functioning of existing and planned transport systems and industrial clusters under construction in the Arctic zone, Siberia and the Far East with the operation of the Northern Sea Route and the Trans-Siberian Railway, which could fit in and the Chinese project – the New Silk Road.

Keywords: *transport, Arctic zones, economics, industrial clusters, investments, project.*

Об авторе:

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, Тверь. E-mail: vitrofa@mail.ru

About the author:

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vitrofa@mail.ru

УДК 691

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛЕЦ

Г.А. Хитрич, В.И. Трофимов, Д.И. Васильев

© Хитрич Г.А., Трофимов В.И.,
Васильев Д.И., 2022

Аннотация. *В статье рассмотрено современное производство железобетонных колец колодцев для промышленного и гражданского строительства и реконструкции.*

Ключевые слова: *железобетон, кольца, оборудование.*

В современном мире изделие из железобетона – незаменимое составляющее практически в любом виде строительства. При возведении зданий и сооружений используют колонны, сваи, ригели и подкрановые балки, плиты покрытия и перекрытия, стеновые панели. При строительстве дорог и аэродромов применяют плиты дорожные и аэродромные. Для сооружения колодезных систем – кольца и крышки колодцев, плиты днищ. Номенклатура железобетонных изделий очень широкая, она охватывает практически все области современного строительства [2].

Преимуществами железобетонных колец являются:

а) возможность изготовления элементов конструкции посредством вибропрессования. Данный метод обеспечивает долговечность и необходимую прочность всех элементов конструкции;

б) целостность конструкции благодаря наличию специальных выступов. За счет устойчивости против подвижки грунта увеличивается водонепроницаемость конструкции;

в) простота монтажа. Для минимизации монтажа в конструкции имеются отверстия диаметром 6 см. Все элементы канализационных железобетонных колец для колодцев изготавливаются с соблюдением ГОСТов и других стандартов. При создании используется специальный мелкозернистый бетон. Для усиления конструкции применяются металлические стержни и арматурная проволока, которые позволяют равномерно распределять нагрузку [1].

В настоящее время железобетонные кольца широко используются в строительстве. При помощи железобетонных колец возводят колодцы и скважины в частном секторе. В связи с большой нагрузкой на стенки колодезные кольца должны быть изготовлены с использованием арматуры и иметь достаточные прочностные характеристики. Железобетонные кольца применяются также для монтажа различных систем коммуникаций (это, например, канализационные, газопроводные, дренажные, сетевые и водопроводные колодцы) [3].

Вибропресс КС20 с бетоноукладчиком (рисунок) Златоустовского завода бетоносмесительного оборудования ZZBO (Россия) – оборудование для производства колодезных колец (по ГОСТ 8020-2016) типоразмеров КС7, КС10, КС13 и КС15, КС20 (разной высоты со «стыковочным замком»). Вибропресс работает по технологии вибропрессования жесткой бетонной смеси с последующей распалубкой. Вибропресс КС20 может работать как отдельным узлом, так и в составе полностью автоматизированной линии [4].

Основное отличие от базового вибропресса КС20 заключается в установке дополнительно бетоноукладчика для равномерной загрузки пресс-формы готовой смесью [4].



Вибропресс КС20 с бетоноукладчиком

Производительность вибропресса в ручном режиме – 10–15 колец за 1 ч работы, в составе автоматизированной линии – до 20 колец за 1 ч. Вибропресс универсален, он позволяет переходить с одного типоразмера на другой с минимальной перенастройкой оборудования [4].

Поворотная балка с затирочным пуансоном перемещается по радиусу на 90 градусов по рельсовому пути. В рабочий момент изготовления пуансон находится над формой, а при распалубке отодвигается вбок. Затирочное кольцо позволяет получить ровную верхнюю поверхность кольца, а также формирует «стыковочный замок» [4].

Вибростол собран на базе итальянских вибраторов OLI суммарной мощностью 4 кВт. Он снабжен опцией разночастотной вибрации: при производстве изделий КС7 и КС10 оператор перенастраивает работу вибростола на другую возмущающую силу и частоту. Вибростол устанавливается на ровную площадку и не требует изготовления прямка [4].

На основании вышеприведенного можно констатировать, что современное оборудование, такое как вибропресс КС20, позволяет получать востребованные железобетонные изделия, отличающиеся повышенными физико-механическими характеристиками, по оптимальной цене.

Библиографический список

1. ЖБИ кольца для колодцев: виды, особенности, применение. URL: <https://xn----7sbeckp0a2al.xn--p1ai/articles/zhbi-koltsa-dlya-kolodtsev-vidy-osobennosti-primenenie/> (дата обращения: 24.05.2022).
2. Кольца ЖБИ по низкой цене. URL: <http://www.ooouralteh.ru/kolsa-zhbi/> (дата обращения: 25.05.2022).

3. Преимущества и свойства сборных железобетонных колец для колодцев. URL: <https://izhprofibur.ru/drugoe/preimushhestva-i-svoystvah-sbornyh-zhelezobetonnyh-kolets-dlya-kolodtsev.html> (дата обращения: 25.05.2022).

4. Вибропресс КС20 с бетоноукладчиком. URL: <https://zzbo.ru/product/vibropress-ks20-s-betonoukladchikom-kopirovat/> (дата обращения: 24.05.2022).

ANALYSIS OF MODERN EQUIPMENT FOR THE PRODUCTION OF REINFORCED CONCRETE RINGS

G.A. Khitrich, V.I. Trofimov, D.I. Vasiliev

Abstract. This article discusses the modern production of reinforced concrete well rings for industrial and civil construction and reconstruction.

Keywords: reinforced concrete, rings, equipment.

Об авторах:

ХИТРИЧ Григорий Алексеевич – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: griny201@mail.ru

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: vitrofa@mail.ru

ВАСИЛЬЕВ Данил Игоревич – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: donilvasilek@gmail.com

About the authors:

KHITRICH Grigory Alekseevich – Master Student of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: griny201@mail.ru

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vitrofa@mail.ru

VASILIEV Danil Igorevich – Master Student of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: donilvasilek@gmail.com

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ МЕЖКВАРТИРНЫХ ПЕРЕГОРОДОК

В.А. Ясюкович, В.И. Трофимов

© Ясюкович В.А., Трофимов В.И., 2022

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос разработки практических методов и конструктивных решений для улучшения звукоизоляции межквартирных перегородок. Представлен анализ существующих методов борьбы с шумом в жилых и гражданских зданиях за счет применения звукоизоляционных и звукопоглощающих ограждающих конструкций, в частности межквартирных перегородок и междуэтажных перекрытий. Оценена эффективность этих конструкций, установлено, что наибольший эффект достигается при комбинировании звукоизолирующих и звукопоглощающих свойств материалов. Отдельно отмечена эффективность технологии облегченных плит перекрытия Sobiax с применением неизвлекаемых пустотообразователей. Предложено новое техническое решение, направленное на улучшение звукоизоляционных свойств перегородочных плит за счет внедрения пустотелых, неизвлекаемых вкладышей. Научно-практически обоснована технология изготовления облегченных перегородочных плит с применением дискретных трубчатых пустотообразователей. Представлены результаты исследований, подтверждающие эффективность предлагаемых решений, отмечены и имеющиеся недостатки.

Ключевые слова: звукоизоляция, воздушный шум, индекс изоляции воздушного шума, ограждающие конструкции, пустотообразователи, перегородочный камень, шумоизоляция.

Введение

Когда о жилом доме говорят как об элитном объекте, подразумевается, что его потребительские свойства по основным критериям, характерным для жилого здания, существенно выше аналогичных параметров типового жилья. Вместо невзрачных и небрежно покрашенных рам – красивые и герметичные окна, вместо тонких промерзающих стен и холодных перекрытий – толстые сэндвич-панели из современных энергосберегающих материалов с вентилируемым фасадом, теплые полы, а также качественное отопление помещений. Наличие всех этих факторов гарантирует комфортные жилищные условия.

Только в одном факторе, без которого невозможно представить себе действительно комфортабельное жилище, нельзя быть полностью уверенным. Данный фактор – звукоизоляция. Особенно актуально это сейчас, в эпоху технологического прогресса, когда сложно представить общественное или жилое здание без инженерных систем и различного технологического оборудования. Кроме того, для экономии энергоресурсов все чаще появляются многоквартирные жилые дома со встроенными помещениями на первых этажах: магазинами, кафе, офисными помещениями и др. Все они являются источниками шума, который оказывает негативное воздействие на нервную систему [1]. Если за стенкой находятся шумные соседи и шум идет буквально со всех сторон, такие условия вряд ли можно назвать комфортными.

Создание необходимого акустического комфорта, т. е. защита от внутреннего шума в жилых помещениях и гражданских зданиях, является одной из актуальных задач. Наиболее эффективным методом снижения уровня шума в зданиях является применение звукоизолирующих ограждающих конструкций, в частности межквартирных перегородок и междуэтажных перекрытий. Снижение к минимуму негативного воздействия шума на человека предполагает необходимость разработки практических методов и конструктивных решений для улучшения звукоизоляции межквартирных перегородок и междуэтажных перекрытий жилых и гражданских зданий.

Значительный вклад в теорию и практику борьбы с шумом в зданиях и сооружениях методами акустического благоустройства внесли такие русские исследователи, как С.П. Алексеев, Л.А. Борисов, В.И. Заборов, а также зарубежные ученые К. Гезеле, Л. Кремер, М. Крокер и др. Были разработаны методы расчета и проектирования различных типов звукоизолирующих ограждений, предложены новые конструктивные решения на основе использования новых материалов и изделий. Однако решение вопроса повышения эффективности звукоизоляции (с учетом повышенных требований к комфортности и экологии) до сих пор остается актуальным.

Чтобы добиться качественной звукоизоляции межквартирных перегородок и/или междуэтажных перекрытий, необходимо разобраться в том, с каким видом шума предстоит иметь дело, как его снизить или полностью устранить. В книгах и учебных пособиях по архитектурно-строительной акустике [2, 3] выделяют несколько видов шума:

ударный – возникает, когда конструкция помещения принимает удар и рождаемые при этом колебания передаются на стены или перекрытия (например, при ударах об пол тяжелых предметов, перемещении мебели, звуке шагов);

воздушный – распространяется по воздуху (человеческая речь, музыка, лай собаки, шум от телевизора и т. д.);

структурный – возникает при передаче вибраций трубами, шахтами вентиляции и другими элементами коммуникаций;

акустический – чаще всего возникает в необустроенных помещениях и проявляется в виде эха.

Из данной классификации очевидно, что в изолируемых помещениях стены и перегородки должны обеспечивать необходимую изоляцию воздушного шума, а перекрытия – ударного. Согласно СП 51.13330.2011 Защита от шума, стены и перегородки между квартирами должны иметь индекс изоляции воздушного шума (для комфортной жизнедеятельности) не менее $R_w = 52$ дБ.

Чтобы добиться данного показателя, необходимо понимать, что звук – это волна и при попадании волн на границу двух сред часть звуковой энергии отражается, часть поглощается и еще одна часть проходит сквозь границу согласно закону сохранения энергии:

$$E_{\text{пад}} = E_{\text{отр}} + E_{\text{погл}} + E_{\text{прош}},$$

где $E_{\text{пад}}$ – энергия падающего звука; $E_{\text{отр}}$ – энергия, отраженная от поверхности; $E_{\text{погл}}$ – энергия, поглощенная поверхностью; $E_{\text{прош}}$ – энергия, прошедшая сквозь поверхность.

На рис. 1 показан типичный процесс взаимодействия между звуковыми волнами и веществом [4].

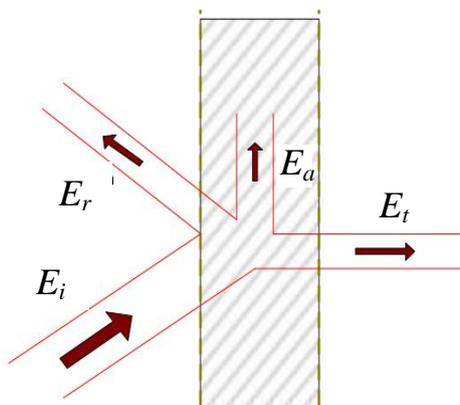


Рис. 1. Процесс взаимодействия между звуковыми волнами и веществом: E_i – падающая звуковая энергия; E_r – отраженная звуковая энергия; E_a – звуковая энергия, поглощенная материалом; E_t – энергия, прошедшая сквозь материал

Основываясь на принципе шумоподавления, можно подразделить материалы для шумоподавления на звукоизоляционные и шумопоглощающие [4].

Из литературы по строительной акустике известно, что лучше всего отражают звуковую энергию массивные и плотные конструкции. Прекрасным подтверждением данного тезиса является статья [5], в

которой был проведен анализ типовых перегородочных камней и графически представлена зависимость индекса изоляции воздушного шума R_w от толщины конструкции.

Вполне очевидно, что на практике нельзя просто взять и сделать перегородки как можно толще, при этом еще и изготовить их из максимально плотного тяжелого бетона, потому что это приводит:

к повышенному расходу материалов и, как следствие, дополнительным денежным расходам;

большой нагрузке на фундамент и перекрытия;
трудоемкому монтажу.

В связи с вышесказанным перегородки часто выполняются из полнотелых или пустотелых блоков на основе легкого бетона, но стены из таких блоков не всегда отвечают необходимым требованиям к звукоизоляции, что отмечается в статьях [6, 7], в которых исследовались звукоизоляционные свойства ячеистых бетонов (пенобетона, газобетона). Так, в статье [6] для перегородки из пенобетонных блоков толщиной 200 мм с классом плотности D500 индекс изоляции воздушного шума $R_w = 44$ дБ, а в статье [7] для перегородки из газобетонных блоков толщиной 200 мм с классом плотности D500 индекс изоляции воздушного шума $R_w = 43$ дБ. Отдельно стоит обратить внимание на два момента:

1. С повышением класса плотности пенобетонных блоков до D600 (толщина тоже составляет 200 мм) индекс изоляции повысился до $R_w = 47$ дБ, а при D500 и толщине 100 мм снизился до $R_w = 33$ дБ [6]. Следовательно, верно утверждение, что более плотные и массивные (толстые) конструкции лучше отражают звуковую энергию.

2. У блоков из пенобетона индекс изоляции (пусть и незначительный) выше, чем у блоков из газобетона.

Важно заметить, что в отличие от плотных, тяжелых бетонов работа легких бетонов направлена прежде всего на поглощение звуковой энергии. Поглощение звука обусловлено переходом колебательной энергии в тепло вследствие потерь на трение в материале. Потери на трение велики в пористых и рыхлых волокнистых материалах. Конструкции из таких материалов уменьшают интенсивность отраженных от поверхности звуковых волн [3, 4]. Прекрасным подтверждением этого является статья [8], в которой исследовались шумоизоляционные характеристики пенобетона на композитном гипсовом вяжущем (КГВ). Полученные данные свидетельствуют о том, что пенобетон на основе КГВ может быть использован в качестве шумоизолирующего материала. При этом более эффективно воздействие шума снижается на средних частотах.

Причина того, почему у пенобетонных блоков звукоизоляция чуть выше, чем у газобетонных, кроется в структурных особенностях этих материалов. Дело в том, что пенобетон имеет замкнутую пористую

структуру, а газобетон – открытую. Из литературы по строительной акустике известно [2, 3], что закрытая пористость (пустотность) лучше влияет на звукоизоляцию. В подтверждение этого можно привести работы [7, 9, 10] где исследовались звукоизоляционные и звукопоглощающие характеристики газобетона на алюмосиликатном сырье. Индекс изоляции воздушного шума у такого бетона стал выше, также было установлено, что совмещение открытой и закрытой пористости (пустотности) за счет включения пустотелого заполнителя (алюмосиликатных микросфер) позволило получить вид пористости, способствующий комплексному поглощению звуковых волн как в диапазоне слышимых частот, так и при инфразвуковых и ультразвуковых частотах [9]. Недостатком является высокая стоимость микросфер, поэтому газобетон на алюмосиликатном сырье вряд ли найдет широкое применение.

Снижения шума путем модификации бетона добавками можно добиться, в частности, включением в состав бетонной смеси резиновой крошки, которая образуется после переработки изношенных автомобильных покрышек. Такая исследовательская работа была выполнена в Кубанском государственном аграрном университете [11]. Полученные результаты показали, что использование перемолотой автомобильной резины в качестве добавки в бетон улучшает звукоизоляционные свойства последнего.

Недостатками предложенного метода являются большой процент включения резинового наполнителя в состав бетона, что ухудшает его физико-механические свойства, а также сложность достижения его однородной структуры, что сказывается на звукоизоляционных характеристиках.

Известны также работы, в которых исследуется возможность использования в качестве межквартирных или межкомнатных перегородок керамзитобетонных камней. Например, исследование, проведенное авторами статьи [12], было направлено на определение изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями из керамзитобетонных блоков в лабораторных условиях. Суть заключалась в последовательном измерении и сравнении средних уровней звукового давления в помещениях высокого и низкого уровней испытательной камеры в определенных полосах частот с последующим вычислением показателей звукоизоляции изделий. Оказалось, что перегородка из керамзитобетонных камней размером $390 \times 90 \times 190$ мм, плотностью 1200 кг/м^3 имеет индекс изоляции воздушного шума $R_w = 35$ дБ. При этом данная перегородка хорошо поглощает высокочастотные звуки. Несмотря на то, что полученный результат не удовлетворяет требованиям к звукоизоляции для межквартирных перегородок, их вполне можно использовать (если отштукатурить) для межкомнатных перегородок, ведь в отличие от блоков

из пено- и газобетона они при небольшой толщине в 90 мм обеспечивают относительно неплохой результат.

После анализа различных методов снижения шума можно сделать вывод о том, что значительный эффект звукоизолирующих конструкций возможен лишь потому, что в любых помещениях (даже в тех, которые не подвергнуты специальной акустической подготовке) всегда имеется более или менее заметное поглощение звука. Если бы не было этого поглощения, звуковой уровень при постоянной работе источника непрерывно возрастал бы, что в конечном счете свело бы к нулю полезный эффект звукоизолирующих конструкций. Таким образом, эффективная шумозащита требует совместного использования звукоизолирующих и звукопоглощающих конструкций.

Одним из наиболее эффективных методов совмещения звукоизолирующих и звукопоглощающих свойств является применение многослойных ограждающих конструкций. Однако бывают случаи, когда при переселении жильцов в новые дома в первые же месяцы эксплуатации построенных домов выясняется, что условия проживания в них не отвечают требованиям нормального акустического режима. Например, в статье [13] такая проблема была выявлена в одном из регионов России, где в соответствии с государственной программой переселения из ветхого и аварийного жилья граждане, проживающие в аварийном жилище, были переселены в сблокированные 6–8-квартирные жилые дома. Перегородки в этих домах представляли собой многослойные конструкции двух типов:

1) обшивка по деревянному каркасу из двух листов древесно-стружечной плиты (ДСП) толщиной 16 мм каждый с заполнением внутреннего слоя минераловатными плитами толщиной 100 мм;

2) обшивка из двух листов ДСП по 16 мм с внутренним слоем из минераловатной плиты толщиной 50 мм и дополнительными слоями из минераловатной плиты (50 мм), воздушного промежутка (37 мм), гипсокартонного листа толщиной 12,5 мм [13].

Еще одним методом является производство многопустотных плит и перегородок. Пустоты в данном случае нужны для облегчения конструкции, в частности пазогребневых стеновых пустотелых блоков, звукоизоляционные свойства которых исследованы автором статьи [14]. Исследование проводилось для блоков размером $300 \times 198 \times 130$ мм с круглыми пустотами диаметром 36 мм (по восемь отверстий в каждом блоке), $\rho = 1700$ кг/м³, индексом изоляции воздушного шума рассматриваемой конструкцией $R_w = 45$ дБ, что выше, чем у рассмотренных ранее пено- и газобетона при значительно меньшей толщине, но под требования СП 51.13330.2011 данные перегородки все же не попадают (при этом они имеют еще и высокую плотность).

Предполагается, что показатель звукоизоляции силикатных блоков мог бы быть выше, если бы пустоты были закрытые. В подтверждение этого предположения можно привести рассмотренные ранее работы, где сравнивались звукоизоляционные характеристики пенно- и газобетонных блоков.

Одним из современных эффективных способов получения облегченных изделий и конструкций, который активно применяется за рубежом, позволяет уменьшить расход применяемых материалов, уменьшить нагрузку на фундамент и может быть применен в качестве шумозащитных изделий, является использование неизвлекаемых пустотелых вкладышей (сфер, коробок и др.) для изготовления облегченных плит перекрытия по технологиям BubbleDeck, Cobiax, Daliform Group и т. д. [15, 16]. Согласно разработанным технологиям, пустотообразователи на заводе укладываются в ячейки арматурных изделий (сеток, каркасов), после чего собранная конструкция бетонируется на заводе (рис. 2а) и в виде готовой плиты отправляется на стройплощадку либо идет отправка собранной конструкции на стройплощадку для укладки в опалубку и заполнения бетоном (рис. 2б) [17].

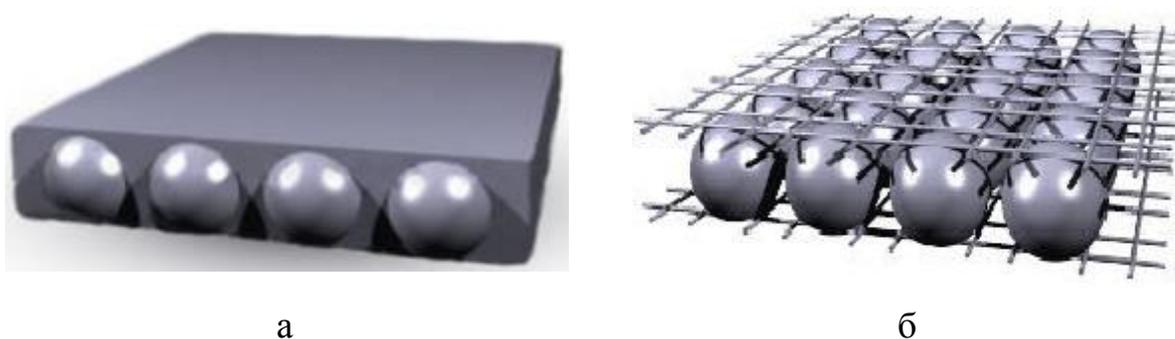


Рис. 2. Типы технологии

с неизвлекаемыми пустотообразователями [18]:

а – готовые панели; б – модули в виде арматурных каркасов, включающих изготовленные сборные сэндвич-элементы «шар – сетка»;

Технологии с применением пустотообразователей похожи друг на друга, основная разница заключается только в форме и размерах пустотообразователей. Так, при технологиях BubbleDeck, Cobiax используются вкладыши в форме сфер и эллипсов, а при Daliform Group – в виде коробок. Имеются также исследования, где рассматриваются вкладыши в форме трубок [19, 20]. Но главное здесь состоит в том, что наличие пустотообразователей улучшает звукоизоляционные свойства плит перекрытия. Это подтверждают исследования [21, 22], согласно которым при толщине плиты 280 мм индекс изоляции составляет $R_w = 66$ дБ. Эффективность подтверждают также и реальные отзывы жильцов [23] квартала «Достоинство» (входит в жилой комплекс «СИМВОЛ»),

расположенного в городе Москве [24]. При строительстве седьмого, восьмого и девятого корпусов квартала использовалась швейцарская технология Sobiax. Явное преимущество технологии для будущих жителей заключается в существенном улучшении звукоизоляции межэтажных перекрытий. В результате использования Sobiax владелец квартиры получает высококачественную звукоизоляцию помещения без уменьшения высоты потолка, которая в «СИМВОЛЕ» составляет 3,2 м. Кроме того, в период эксплуатации сокращаются затраты на отопление, вентиляцию и кондиционирование здания.

Таким образом, если технология с неизвлекаемыми пустотообразователями успешно используется для плит перекрытия, следует рассмотреть возможность использования схожей технологии и для межквартирных перегородок.

Необходимо учитывать, что применение пустотелых элементов (например, сфер) по указанным выше технологиям должно основываться на размерах отверстий в арматурных элементах, что снижает эффективность использования таких технологий. Кроме этого, пустотелые элементы распределены в одной плоскости (плоскости арматурных элементов), а не в объеме, и это уменьшает эффективность работы арматурных элементов и ослабляет эту зону конструкции, снижая звукоизоляцию. В то же время для рассмотренных технологий с использованием пустотелых вкладышей необходимо учитывать физическое состояние смеси, чтобы обеспечить равномерное ее распределение и плотность во всем объеме изделия (конструкции), особенно в труднодоступных зонах контактирования пустотелых вкладышей с арматурными элементами.

При учете отмеченных недостатков, связанных с вынужденной привязкой пустотелых элементов к размерам арматурных изделий, предлагается новая технология их распределения (независимо от размеров и расположения арматурных элементов) [25], которая может найти применение при изготовлении перегородочных плит. Улучшение звукоизоляции достигается путем равномерного распределения максимально закрытых пустот в объеме изделия за счет использования пустотелых, неизвлекаемых вкладышей.

Эффективность решения заключается в том, что в отличие от применяемых в настоящее время перегородочных плит, где обычно открытые, непрерывные пустоты в виде каналов расположены вдоль одной центральной оси, в данном случае пустоты, образованные дискретными трубками, распределены равномерно во всем объеме изделия. Это происходит благодаря тому, что на этапе формования в бетонную матрицу устанавливаются дискретные, неизвлекаемые пустотообразователи согласно заданному расположению (например, через соответствующий шаблон с отверстиями) [26].

Для оценки работоспособности предложенного способа изготовления многопустотных стеновых блоков (перегородок) с равномерным распределением пустот в объеме необходимо определить оптимальную форму вкладышей-пустотообразователей, установить критическое усилие вдавливания пустотелых вкладышей в бетонную смесь с учетом ее реологического состояния и прочности на сжатие вкладышей-пустотообразователей, определить влияние вкладышей на плотность и прочность, а также оценить изоляцию воздушного шума.

Материалы и методы

В качестве сырьевых материалов, используемых для приготовления опытных образцов, применяются портландцемент ЦЕМ II/A-И 42.5Н; песок строительный с зернами крупностью не более 2,5 мм; суперпластификатор «Полипласт СП-1». Вид и форма пустото-образователей обосновываются при помощи анализа литературных источников.

Испытание по определению предела текучести проводится на свежеприготовленной смеси заданного состояния путем погружения конуса Васильева КВБ (в соответствии с ГОСТ 5180-2015) по методике П.А. Ребиндера с расчетом предельного напряжения сдвига.

Испытание вкладышей на сжатие проводится на ручном прессе ПРГ-1-50.

Для испытания образцов на сжатие используется машина для испытания на сжатие МС-500.

Для оценки звукоизоляции был произведен расчет индекса изоляции воздушного шума R_w в соответствии с п. 2.1 и 3.1–3.2 СНиП 23-03-2003.

Результаты исследования

В работе [27] было исследовано влияние напряженно-деформированного состояния ограждающих конструкций на их звукоизолирующие свойства. Получены частотные характеристики звукоизоляции ограждений с учетом их деформирования и прочности при растяжении и сжатии за пределами упругости.

При учете выявленного фактора влияния напряженного состояния на качество звукоизоляции был выполнен анализ влияния формы пустотообразователей на формирование соответствующего вида напряженного состояния бетонной матрицы при изготовлении многопустотного бетонного стенового блока по новой технологии (рис. 3).

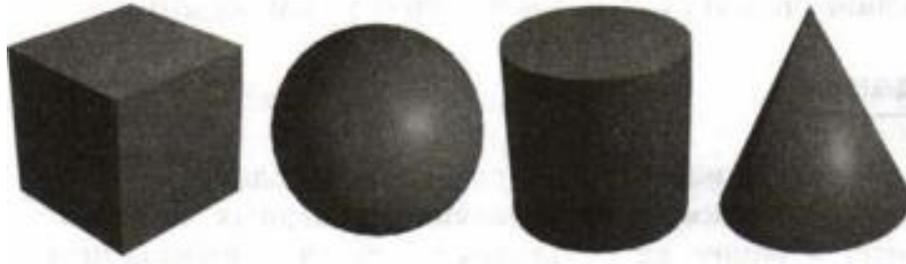


Рис. 3. Основные виды вкладышей-пустотообразователей:
куб, сфера, цилиндр, конус

При анализе влияния фактора формы вкладышей на предмет формирования ими вида напряженного состояния в бетонной матрице при приложении нагрузки было показано, что при допущении равенства главного напряжения σ_1 независимо от их формы остальные главные напряжения σ_2 , σ_3 будут изменяться. При этом для работы сферы вид напряженного состояния будет соответствовать параметру Лоде $\mu_\sigma = -1$ ($\sigma_2 = \sigma_3$), для работы цилиндра при равенстве длины и диаметра ($l_1 = d_{ц}$) вид напряженного состояния будет соответствовать $\mu_\sigma = 0$, но при этом можно с небольшим допущением принять $\sigma_2 \approx \sigma_3$, тогда $\mu_\sigma = -1$, а для работы цилиндра с $l_2 \gg d_{ц}$ вид напряженного состояния будет соответствовать $\mu_\sigma = +1$ ($\sigma_2 > \sigma_3$), а предельное состояние будет соответствовать меньшей прочности системы.

Таким образом, анализ использования пустотелых вкладышей различной формы для образования многопустотной структуры бетонной матрицы показал, что наиболее эффективно применение вкладышей цилиндрической формы с длиной, равной их диаметру, по сравнению со сферическими вкладышами. Это, во-первых, выгодно с точки зрения экономической эффективности, так как цилиндрические вкладыши, в сравнении со сферическими, легче изготовить, а во-вторых, применение цилиндрических вкладышей с длиной, равной их диаметру, позволяет обеспечить их работу в матрице с формированием более равномерного напряженного состояния, близкого к работе сферы и отличающегося более высокой структурной прочностью бетонной матрицы, что в конечном счете улучшает механические свойства бетонного изделия, способствует уменьшению его массы и снижению стоимости изготовления.

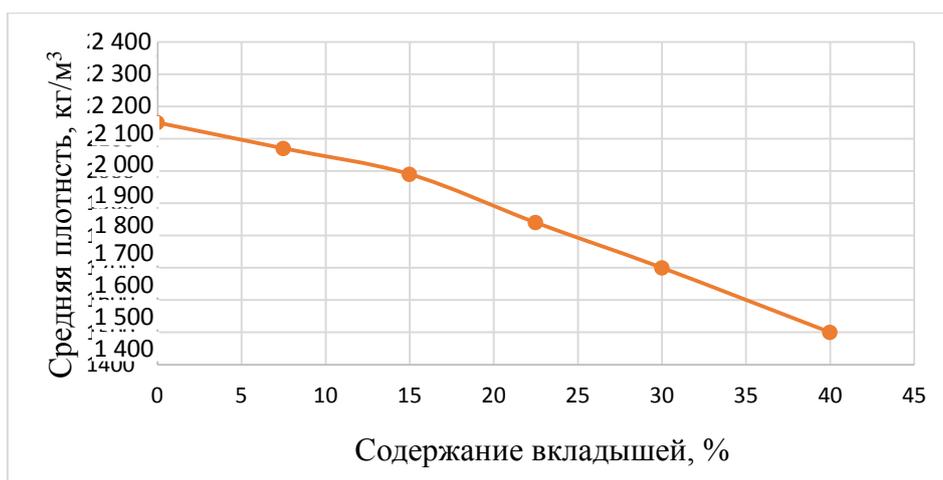
Условие погружения пустотообразователей – полимерных вкладышей в бетонную смесь с учетом ее реологического состояния имеет вид

$$R > P_{\text{мак}},$$

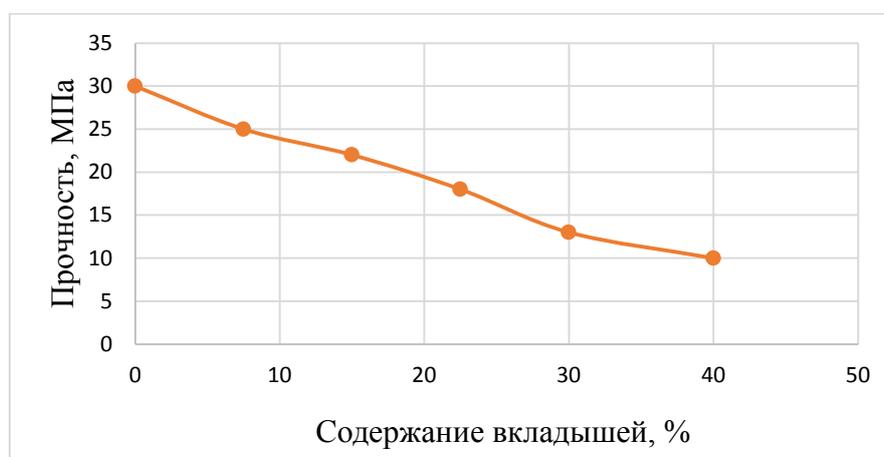
где R – прочность на сжатие вкладыша, МПа; $P_{\text{мак}}$ – предел текучести, МПа.

По результатам испытаний вкладышей с учетом реологического состояния смеси была оценена возможность их свободного погружения в модельную цементно-песчаную смесь с различным водоцементным соотношением (В/Ц), в том числе В/Ц = 0,5. Были получены средние значения: $R = 42,86 \text{ кг/см}^2$ (4,286 МПа), $P_{\text{мак}} = 0,149 \text{ кг/см}^2$ (0,014 9 МПа). Из приведенных значений видно, что прочность используемых вкладышей R значительно больше структурной прочности смеси $P_{\text{мак}}$ заданного реологического состояния. Это значит, что условие работоспособности пустотелых вкладышей соблюдено и можно рекомендовать технологию формования многпустотных стеновых блоков без применения специальных устройств или сложных форм.

Были изготовлены образцы-кубики на цементно-песчаной смеси с различным процентным содержанием трубчатых вкладышей в объеме изделия (0; 7,5; 15; 22,5; 30 и 40 %) для испытаний на прочность при сжатии и определения средней плотности. Результаты испытаний представлены на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Влияние содержания вкладышей: а – на прочность; б – плотность

Помимо вышеуказанного, был выполнен расчет индекса изоляции воздушного шума для перегородки из стеновых блоков нового конструктивного решения на мелкозернистом бетоне с неизвлекаемыми трубчатыми дискретными пустотообразователями. Расчет производился для модельных образцов-кубов на мелкозернистом бетоне размером $100 \times 100 \times 100$ мм с трубчатыми полимерными пустотообразователями ($d = 20$ мм, толщина стенки 3,5 мм, содержание пустотообразователей 40 % от объема изделия, $\rho = 1510$ кг/м³) с последующим испытанием на прочность. Индекс изоляции воздушного шума $R_w = 40$ дБ.

Выводы

По результатам расчетов и в соответствии с п. 2.1 и 3.1–3.2 СНиП 23-03-2003 для модельных образцов-кубов размером $10 \times 10 \times 10$ см индекс изоляции воздушного шума R_w составил 40 дБ, что является неплохим результатом по сравнению с аналогами, если учитывать размеры образцов. Так, например, у пенобетонных блоков при толщине 100 мм $R_w = 33$ дБ, а у керамзитобетонных при толщине 90 мм $R_w = 35$. Однако у полученных образцов плотность значительно выше, чем у сравниваемых аналогов, что, несомненно, является недостатком. Кроме того, при повышении содержания вкладышей значительно падает прочность, но это не является крупным недостатком, поскольку межквартирные перегородки – это самонесущая конструкция. Более того, образцы с 40%-м содержанием вкладышей, где наблюдается наибольшее снижение прочности, имеют прочность на сжатие 10 МПа, что выше, чем у аналогов.

Решить проблему с высокой плотностью в дальнейшем можно путем введения керамзита в состав смеси. Тем самым мы не только снизим плотность, но и, учитывая результаты статьи [12], улучшим поглощаемость конструкцией высокочастотных звуков. Можно также рассмотреть возможность введения воздухововлекающей добавки, что, учитывая результаты работы [8], должно улучшить поглощение звука на средних частотах.

В дальнейшем также необходимо оценить звукоизоляционные и звукопоглощающие свойства с помощью специализированного оборудования, потому как определение звукоизоляции методом ожидаемой шумности или методом нормируемых параметров проводится для сравнительных оценок. Абсолютные оценки даются исключительно в ходе измерений.

Заключение

1. Выполненный анализ существующих методов борьбы с шумом показал, что решение проблемы повышения эффективности звукоизоляции конструкций жилых и гражданских зданий является на сегодняшний день

важным и актуальным направлением научных исследований в области строительной акустики и экологии для защиты людей от вредного воздействия шума.

2. Рассмотрены применяемые в настоящее время практические методы и конструктивные решения для улучшения звукоизоляционных свойств межквартирных перегородок и междуэтажных перекрытий. Выявлено, что наибольший эффект достигается при совместном использовании звукоизолирующих и звукопоглощающих материалов.

3. Выявлено, что особо заметный эффект дают конструкции плит перекрытия с применением неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей. В связи с этим предлагается новое техническое решение, направленное на улучшение звукоизоляционных свойств перегородочных плит за счет внедрения неизвлекаемых пустотелых вкладышей равномерно в объеме изделия.

4. Проведены исследования, в которых оценивалась эффективность предложенного метода. Научно-практически была обоснована оптимальная форма и вид вкладышей – трубки одинакового диаметра и длины. Изготовлены опытные образцы-кубики размером $100 \times 100 \times 100$ мм с различным содержанием вкладышей, исследовано влияние вкладышей на плотность и прочность в соответствии с п. 2.1 и 3.1–3.2 СНиП 23-03-2003. Проведен расчет индекса изоляции воздушного шума R_w .

5. На основании полученных результатов отмечен более высокий индекс изоляции у опытных образцов ($R_w = 40$ дБ) при заданной толщине 100 мм, если сравнивать с ближайшими аналогами. Отмечены и недостатки, в частности высокая плотность. Рассмотрены возможные варианты устранения этого недостатка в дальнейшем за счет введения керамзита и/или воздухововлекающей добавки, что, помимо снижения плотности, также улучшит звукопоглощение на высоких и средних частотах соответственно.

Библиографический список

1. Гречишкин А.В., Литвинова М.А., Праслов М.А. Методы снижения шума в помещениях, смежных с инженерным и технологическим оборудованием // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2018. № 4 (17). С. 198–203.

2. Богатина А.Ю., Моргун В.Н., Ревякин А.А. Архитектурная и строительная акустика: учебное пособие. Ростов н/Д.: РГУПС, 2010. 220 с.

3. Аксенова О.Т. Промышленная акустика: учебное пособие. Благовещенск: АмГУ, 2011. 132 с.

4. Review on Research Process of Sound Reduction Materials / Wei Chen, Sheng Hu, Hao Cao, Tao Huang, Xiaowen Wu, Ling Lu, Jiwen Peng // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 612. Iss. 5.

Yunnan, China. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/612/5/052062/pdf> (дата обращения: 17.11.2021).

5. Пименов И.К., Дементьев Н.А., Кузнецова А.Д. Анализ звукоизолирующих характеристик однопустотных перегородочных камней // Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. СПб.: Институт акустических конструкций, 2019. С. 800–807.

6. Шевцова М.А., Чернеев А.М., Склифос В.О. Оценка звукоизоляционной способности внутренних стен из блоков бетона D600 и D500 // Перспективы науки. 2019. № 11 (122). С. 55–57.

7. Фомина Е.В., Лесовик В.С., Лашина И.В. Газобетон для строительных объектов транспортной инфраструктуры // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15. № 5 (63). С. 774–786.

8. Чернышева Н.В., Шаталова С.В., Лесниченко Е.Н. Пенобетон на композиционном гипсовом вяжущем для шумоизоляции // II Международный онлайн-конгресс, посвященный 30-летию кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 365–369.

9. Баранов А.В. Неавтоклавные ячеистые бетоны с улучшенными звукопоглощающими характеристиками: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Белгород, 2021. 167 с.

10. Гринь О.В. Применение ячеистых бетонов с полыми керамическими микросферами // Устойчивое развитие науки и образования. 2019. № 7. С. 111–114.

11. Никогда В.О., Чмовж А.А., Любарский Н.Н. Исследование влияния добавок на основе полимерных добавок на звукоизоляционные свойства бетона // Сборник статей по материалам X Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 120-летию И.С. Косенко. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2017. С. 1120–1121.

12. Редько Ю.Б. Определение звукоизоляции ограждающей конструкции из керамзитобетона в лабораторных условиях // Кровельные и изоляционные материалы. 2013. № 6. С. 14–15.

13. Гречишкин А.В., Гречишкина В.А. Повышение звукоизоляции межквартирных перегородок сблокированных многоквартирных жилых домов // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2019. № 4 (23). С. 168–172.

14. Головкова Н.В. Расчет индекса изоляции воздушного шума перегородками из блоков // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. № 4. С. 41–49.

15. Mahdi A.S., Mohammed S.D. Experimental and Numerical Analysis of Bubbles Distribution Influence in BubbleDeck Slab under Harmonic Load Effect // Engineering, Technology & Applied Science Research. 2021. V. 11. № 1. P. 6645–6649.

16. The Comparative Study of Lightweight Slab Solutions in Terms of Construction Cost / B. Renata, K. Mária, T. Alena, S. Zuzana // International Journal of Applied Engineering Research. Algeria. 2017. № 24. P. 14279–14286.

17. Топчий Д.В., Болотова А.С., Васильева Ю.А. Технологический процесс устройства монолитных железобетонных перекрытий с вкладышами-пустотообразователями на примере технологии Cobiax // Перспективы науки. 2019. № 2 (113). С. 61–67.

18. Технология BubbleDeck. URL: <http://bubbledeck.ru/produktovaya-linejka.html> (дата обращения: 18.11.2021).

19. Обоснование оптимального вида пустотообразователя в монолитном плоском перекрытии / Е.Л. Буцкая, Д.М. Зезюков, Н.Н. Махинько, О.Г. Зинкевич // Вестник Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. 2019. № 3 (253–254). С. 10–18.

20. Афанасьев Г.А. Технологии замены перекрытий при капитальном ремонте многоэтажных зданий // Строительство и реконструкция. 2019. № 1 (81). С. 131–136.

21. Inkwan Paik, Seunguk Na. Comparison of Sound Insulation Performance on Two Different Types of Voided Slab Systems // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. V. 9. Iss. 5. P. 612–623.

22. Inkwan Paik, Seunguk Na. Evaluation of Noise Insulation Performance for Void Deck Slab System which Combines Deck Plates with a Voided Slab System // International Journal of Applied Engineering Research. 2018. V. 13. № 10. P. 7348–7359.

23. Отзывы о жилом квартале «Символ». URL: https://www.novostroy-m.ru/baza/jiloy_kvartal_simvol/otzyvu (дата обращения: 18.11.2021).

24. Швейцарская инновационная технология Cobiax. URL: <https://simvol.com/news/shveytsarskaya-innovatsionnaya-tehnologiya-prishla-v-simvol> (дата обращения: 18.11.2021).

25. Строительная панель пустотного настила: пат. 2751529. Рос. Федерация. № 2020138061 / Трофимов В.И., Желев Н.А., Ясюкович В.А.; заявл. 19.11.2020; опубл. 14.07.2021, Бюл. № 20. 7 с.

26. Многопустотная панель перекрытия: пат. 2720593 Рос. Федерация № 2019126237 / Трофимов В.И.; заявл. 19.08.2019; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 14. 9 с.

27. Мониц Д.В. Повышение звукоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений без увеличения их массы: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Нижний Новгород, 2002. 241 с.

ON THE ISSUE OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF SOUND INSULATION OF INTER-APARTMENT PARTITIONS

V.A. Yasyukovich, V.I. Trofimov

***Abstract.** The issue of developing practical methods and constructive solutions to improve the sound insulation of inter-apartment partitions is being considered. The analysis of the existing methods of noise control in residential and civil buildings due to the use of sound-insulating and sound-absorbing enclosing structures in the frequency of inter-apartment partitions and inter-floor floors is presented. The effectiveness of these structures was evaluated, it was found that the greatest effect is achieved by combining the sound-insulating and sound-absorbing properties of materials. Separately, the effectiveness of the technology of lightweight floor slabs Cobiax with the use of non-removable voids is noted. A new technical solution is proposed aimed at improving the sound insulation properties of partition plates by introducing hollow, non-removable tubular inserts. Scientific and practical substantiates the technology of manufacturing lightweight partition plates with the use of discrete tubular voids. The results of research confirming the effectiveness of the proposed solutions are presented, and the existing shortcomings are also noted.*

***Keywords:** sound insulation, air noise, air noise insulation index, enclosing structures, voids, partition stone, noise insulation.*

Об авторах:

ЯСЮКОВИЧ Владислав Александрович – магистрант 2-го курса, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: vlad.jasjukovich212@gmail.com

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, Тверь. E-mail: vitrofa@mail.ru

About the authors:

YASYUKOVICH Vladislav Alexandrovich – 2nd year Undergraduate Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vlad.jasjukovich212@gmail.com

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vitrofa@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Балаева А.В., Петропавловская В.Б.</i> Влияние органоминерального комплекса добавок на свойства сухой строительной смеси на основе гипсового вяжущего.....	3
<i>Белов В.В., Али Р.А.</i> Улучшение эксплуатационных свойств газобетона неавтоклавного твердения.....	11
<i>Белов В.В., Смирнов М.А.</i> Регулирование свойств сухих строительных смесей с помощью добавок полимеров.....	48
<i>Васючков К.А., Трофимов В.И.</i> Мелкозернистый фибробетон для водопропускных сооружений в Арктической зоне.....	56
<i>Городничев Д.С., Курятников Ю.Ю.</i> Самоуплотняющийся бетон на основе рециклинга бетонного лома.....	65
<i>Егоров А.Р., Трофимов В.И.</i> Использование фибры для армирования бетона.....	75
<i>Желев Н.А., Смирнов М.А.</i> Базальтовый фибробетон с контролируемым воздухововлечением.....	80
<i>Лебедев А.В., Петропавловская В.Б.</i> Инъекционные составы с использованием алюмосиликатной добавки для цементации грунтов.....	92
<i>Орлов Д.М., Смирнов М.А.</i> Теоретические предпосылки использования в реставрационных составах пылеватых отходов производства силикатного кирпича и добавки поливинилового спирта.....	102
<i>Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Завадько М.Ю.</i> Формирование структуры гипсовых дисперсных систем контактно-конденсационного твердения.....	109

<i>Тихомиров Д.И., Белов В.В.</i> Бетон с заполнителем из стекольного боя.....	115
<i>Трофимов В.И.</i> Арктический ответ: новая стратегия освоения Арктики.....	124
<i>Хитрич Г.А., Трофимов В.И., Васильев Д.И.</i> Анализ современного оборудования для производства железобетонных колец.....	135
<i>Ясюкович В.А., Трофимов В.И.</i> К вопросу повышения эффективности звукоизоляции межквартирных перегородок.....	139

Инновации и моделирование в строительном материаловедении

Сборник научных трудов

Редактор С.В. Борисов
Корректор Я.А. Петрова

Подписано в печать

Формат 60×84/16

Физ. печ. л. 9,75

Тираж 50 экз.

Усл. печ. л. 9,07

Заказ №

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 8,48

С –

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22