

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Research Associate, Tver State Technical University, Tver. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

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

УДК 691.587

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ СУХИЕ СМЕСИ ДЛЯ ПЕНОБЕТОНА

Д.С. Паньшин, М.А. Смирнов, В.И. Трофимов, В.В. Белов

© Паньшин Д.С., Смирнов М.А.,
Трофимов В.И., Белов В.В., 2024

Аннотация. В данной работе проанализированы современные перспективы использования теплоизоляционных сухих смесей для пенобетона, а также приведены данные исследования об изменении свойств пенобетона в зависимости от его состава и добавок.

Ключевые слова: эффективные пенобетоны, теплоизоляционные пенобетоны, пенобетоны на различных вяжущих.

Введение

На сегодняшний день в России растут темпы и объемы строительства, что ведет к увеличению спроса не только на основные строительные материалы, такие как бетон, сталь, древесина и другие, но и на материалы, имеющие специальные свойства. К ним, в частности, относятся теплоизоляционные материалы. Как правило, в настоящее время используют готовые плиты теплоизоляционного материала, но как с финансовой, так и с технологической точки зрения данный вид теплоизоляции не полностью удовлетворяет требованиям современного строительства. Для замены этих плит можно предложить сухие теплоизоляционные смеси, которые дешевле и технологичнее при возведении здания, а также более долговечны и эффективны. Одним из видов таких сухих теплоизоляционных смесей может стать пенобетон, который помимо своих теплоизоляционных свойств обладает улучшенными прочностными и эксплуатационными свойствами и может быть использован для производства готовых изделий на заводах.

Целью работы является изучение возможности улучшения свойств пенобетона путем изменения его состава.

Способ получения сухой смеси для пенобетона

Для приготовления сухой смеси для легких поризованных бетонов (ЛПБ) в работе использовали портландцемент ПЦ500 ДО (ЦЕМ 142.5); в качестве заполнителей – гранулированное пеностекло на основе стекольного боя с насыпной плотностью от 130 до 275 кг/м³, керамзитовый гравий по ГОСТ 324962013 марок D300, D400 и вспененные гранулы полистирола с насыпной плотностью 10 кг/м³. Для вспенивания цементной матрицы применяли пенообразователь «Роатисет» на основе гидролизованного протеина – кератина. В качестве наномодификатора использовали золь поликремниевой кислоты КЗ-ТМ-30. Выполненные ранее исследования показали высокую эффективность кремнезоль, которые также могут быть использованы в технологии получения сухих смесей [1].

Производство легких поризованных бетонов на основе сухих механоактивированных смесей (рис. 1) включает в себя выпуск трех видов товарной продукции: сухой смеси для пенобетона, сухой смеси с легким заполнителем для изготовления ЛПБ (ССЛПБ) и товарной легкобетонной смеси для монолитного строительства и изготовления стеновых блоков заводского изготовления [1].

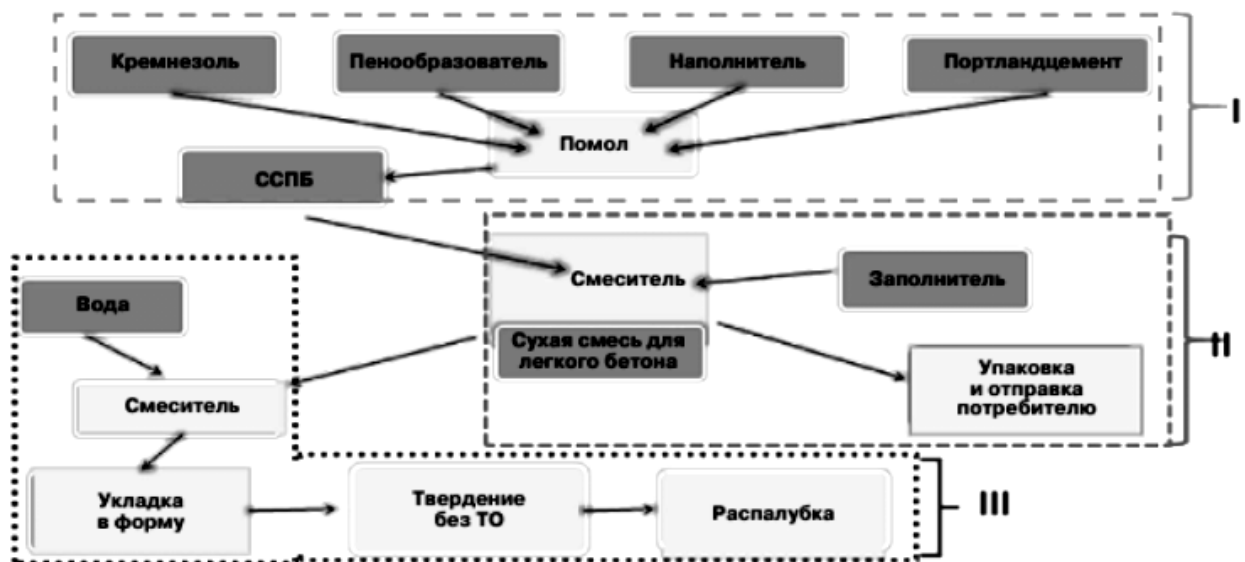


Рис. 1. Принципиальная схема производства ЛПБ с пористым заполнителем [1] (ТО – тепловая обработка)

Затворение ССПБ водой производится в смесителе с образованием бетонной массы. После ее заливки в формы изделия выдерживаются в камере при температуре 25–30 °С в течение восьми часов. Затем блоки из

ЛПБ извлекаются из форм и в течение семи суток дозревают на складе при температуре не ниже +15 °С [2, 3].

Зависимость свойств пенобетона от вяжущего

При производстве любых сухих смесей в первую очередь встает вопрос о составе этой смеси. Сначала нужно определиться с видом вяжущего, так как именно от него в большей степени будут зависеть свойства как самой смеси, так и изделий из нее. На основе обзора научных статей [4–7] была составлена зависимость важных свойств пенобетонной смеси от вида вяжущего, входящего в ее состав.

Выявлено, что максимальное значение средней плотности имеют изделия на основе портландцемента. Средняя плотность пенобетонного образца из смеси, состоящей из 30 % цемента и 70 % песка, равна 970 кг/м³, а при увеличении доли цемента до 70 % средняя плотность изделий уменьшается до 810 кг/м³, т.е. на 20 %. В данном случае это связано с плотностью цемента, значительно меньшей, чем у песка (табл. 1).

Таблица 1

Влияние вида вяжущего на свойства пенобетона [4]

Вид вяжущего	Состав смеси, %	Средняя плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Предел прочности при сжатии, МПа
Портландцемент	Ц – 30 П – 70	970	23,5	2,1
	Ц – 50 П – 50	880	24,5	2,8
	Ц – 70 П – 30	810	26,3	3,2
Строительный гипс	Г – 30 П – 70	780	31,4	1,8
	Г – 50 П – 50	670	33,6	1,5
	Г – 70 П – 30	590	37,4	1,3
Известь	И – 30 П – 70	860	24,7	1,6
	И – 50 П – 50	770	26,4	1,3
	И – 70 П – 30	680	27,1	0,9

В случае использования местного строительного гипса в качестве вяжущего средняя плотность полученного материала уменьшается. Пенобетон, содержащий 30, 50 и 70 % гипса, имеет среднюю плотность 780, 670, 590 кг/м³ соответственно. По сравнению с пенобетоном на основе цементного вяжущего, при применении строительного гипса средняя

плотность изделий снижается на 20–30 %, что связано с малым весом самого строительного гипса и получением более пластичного гипсового теста [5]. Выявлено, что в случае со строительным гипсом количество воды на 25 % больше, чем при использовании цемента. Установлено, что пористость пенобетона на основе строительного гипса значительно выше по сравнению с пенобетоном из цемента. Большая микропористость гипсового камня между твердыми зернами песка обусловлена воздухововлекающей способностью гипса [6].

При использовании извести средняя плотность получаемого материала занимает промежуточное положение между цементным и гипсовым пенобетоном. При содержании 30, 50 и 70 % извести в составе смеси объемная масса получаемого пенобетона равна 860, 770 и 680 кг/м³ соответственно, что значительно больше, чем в случае с гипсопенобетоном [7].

Следует отметить, что по сравнению с гипсопенобетоном и цементным пенобетоном пенобетон на основе извести затвердевает значительно дольше в силу другого механизма твердения. Образование кристаллов гидрооксида кальция и карбонизация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ происходит намного медленнее, чем гидратация гипсовых и цементных частиц [7].

Зависимость свойств пенобетона от количества воды затворения

Для того чтобы сухая смесь была пригодна к использованию, она должна быть затворена определенным количеством воды, но, как известно из опыта обращения с другими смесями, количество воды затворения напрямую влияет на свойства готового изделия, пенобетонная смесь не является исключением из данного правила [8].

Для подбора оптимального количества воды затворения (далее – В/Ц отношение) была проанализирована научная статья [8], где исследовано влияние В/Ц отношения на свойства получаемого пенобетона.

Незначительный объем твердых компонентов и увеличение содержания пенообразователя, снижающего смачиваемость поверхности гидратационных вяжущих, требуют для формирования структуры пенобетона пониженной плотности достаточного количества воды. Согласно исследованиям, при увеличении В/Ц отношения теплоизоляционного пенобетона наблюдаются оптимизация макроструктуры и рост прочности материала [8].

Одной из распространенных технологических мер в решении ряда проблем, имеющих место при получении материала (усадочные трещины, неоднородность характеристик конечного продукта и потеря устойчивости вспениваемой массы), является водоредуцирование. Так, по данным публикации, разработанный способ изготовления пенобетона, основанный на двухстадийном вспенивании, позволяет снизить В/Ц отношение и повысить качество структуры. Проводятся исследования и в области усовершенствования пенобетона за счет применения комплексных

модификаторов из мелкодисперсных наполнителей и пластифицирующих добавок [8].

Между тем назначение количества воды в пенобетонной смеси без учета степени заполнения межпорового пространства чревато недоиспользованием потенциала вяжущего компонента и снижением качества продукции. Особенно это касается пенобетона пониженной плотности, где объем твердых компонентов ничтожно мал [8].

Чтобы правильно сориентироваться в многообразии предложений по модификации пенобетона, необходимо определить оптимальное количество воды в пенобетонной смеси, обозначить и исследовать факторы, влияющие на ее значение (например, параметры макроструктуры материала). Одно из условий проявления вяжущих свойств – наличие хорошо смачиваемой дисперсионной среды. При этом смачиваемость поверхности обеспечивается как особенностями дисперсионной среды – полярной жидкости, так и спецификой смачиваемой поверхности. Межпоровое пространство в пенобетоне ограничено наличием молекул пенообразователя, поэтому при сужении толщины межпоровой перегородки в результате исключения доли воды возможно изменение поверхностных свойств вяжущего компонента. В связи с этим толщина перегородки, размер пор и их упаковка приобретают решающую роль в назначении В/Ц отношения пенобетонной смеси [8].

При планировании состава пенобетона следует исходить как из характеристик сырьевых компонентов, так и из заданных параметров микро- и макроструктуры материала с учетом необходимых условий для их образования. Развитие математического моделирования и решение задач плотной упаковки позволяют осуществить такой подход к проектированию состава пенобетона. Если в области производства тяжелого бетона подбору зернового состава заполнителя уделено достаточно внимания (на предмет сокращения расхода цемента и воды), то применительно к пенобетону эта тема практически не затронута [8].

Зависимость свойств пенобетона от добавок

Для улучшения свойств любых смесей, в том числе и сухих, традиционно используются различные добавки и наполнители, которые могут служить как для улучшения определенных свойств смесей, так и для уменьшения его себестоимости. Рассмотрим возможность и целесообразность введения новейших наполнителей – перлитовых микросфер и целлюлозных волокон.

Влияние наполнителя на основе перлитовых микросфер на свойства пенобетона исследовано авторами статьи [9].

Основными преимуществами использования перлита в строительстве являются отличные звукоизоляционные и высокие теплоизоляционные свойства, огнеупорность, низкая плотность, неограниченный срок годности. Благодаря своим качествам, вспученный перлит нашел широкое

применение в промышленности и строительстве в качестве теплоизоляционных засыпок в температурном диапазоне от -200 до 875 °С. На его основе изготавливают многочисленные теплоизоляционные продукты (стенные блоки и изоляционные панели), применяют в качестве заполнителя при производстве теплоизоляционных и жаростойких бетонов. Кроме того, вспученный перлит служит в качестве легкой добавки для штукатурок, гипса, строительных растворов и стяжек [9].

С развитием современных технологий на рынке строительных материалов появились микросферы перлита, которые представляют собой сферические поликамерные замкнутые полые микрочастицы со средним размером 130 мкм, заполненные разреженным газом. По химическому составу они состоят в основном из оксида кремния и оксида алюминия. Это пожаробезопасный, нетоксичный, радиационно безопасный материал. Микросферы перлита обладают большей прочностью по сравнению с перлитовым песком, который может разрушаться при смешивании его с растворной или бетонной смесью [9].

При введении микросфер в раствор для всех составов наблюдается повышение качественных показателей пены. Наилучшее влияние на пену оказывает совместное введение перлита и золы. При добавлении в пенобетон микросфер перлита вместо золы коэффициент использования пены увеличивается на 18 % и достигает 30 % (для количества микросфер 25 %) [9].

При введении микросфер плотность материала снижается до марки 0350 (что составляет 53 %). При полном замещении золы микросферами плотность соответствует марке $D250$, при этом наблюдается достаточно равномерная пористость. Наибольшая плотность и прочность образцов отмечаются при процентном соотношении перлита и золы $50 : 50$. Результаты исследования приведены в табл. 2 [9].

Таблица 2

Зависимость прочности при сжатии и плотности образцов пенобетона от количества микросфер перлита [9]

№	$\frac{\text{Перлит}}{\text{Зола}}, \%$	Средняя плотность, кг/м^3	Предел прочности при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м}^*\text{°C)}$
1	0/100	547	1,22	0,122
2	25/75	347	0,68	0,074
3	50/50	383	1,04	0,079
4	75/25	313	0,70	0,069
5	100/0	258	0,56	0,062

Влияние волокнистого целлюлозного наполнителя на свойства пенобетона рассмотрено авторами статьи [10].

В целях повышения прочности пенобетонных изделий с уменьшением их плотности и теплопроводности использовался волокнистый целлюлозный наполнитель с размером волокон 10–40 мкм [10].

В результате проведенных исследований способов введения волокнистого целлюлозного наполнителя в пенобетонную смесь отмечено, что при использовании способа сухой минерализации наблюдались неравномерная структура модифицированного пенобетона, повышение средней плотности пенобетонного массива и снижение прочностных характеристик. Данный дефект объясняется разрушением пены при быстром истечении жидкости через каналы Плато [10].

Частицы наполнителей активно участвуют в организации структуры пенобетонной смеси и образцов на ее основе, влияя на формирование средней плотности и пористости пенобетона. Введение технического углерода приводит к снижению сорбционного водопоглощения по сравнению с контрольным образцом, не содержащим технический углерод. Данный эффект объясняют частичной механической коагуляцией внутренней поверхности пор и капилляров гидратирующихся цементных частиц за счет высокой дисперсности и гидрофобности частиц технического углерода [10].

Наиболее качественные образцы получаются при отдельной стабилизации пены техническим углеродом (состав № 4). Стабилизация пены происходит в результате эффекта «бронирования» каналов Плато частицами гидрофобного углерода, который препятствует быстрому истечению жидкости, при этом создавая в пене пространственный каркас, обеспечивающий ее устойчивость при введении цементного раствора, где аналогичным образом работает волокнистый целлюлозный наполнитель. Последний, покрытый тонкой пленкой цементного раствора, при попадании в ячеистую среду пены фиксируется в межпоровых перегородках вместе с частицами технического углерода на протяжении всего процесса гидратации и твердения цементного камня [8]. Тем самым волокнистый целлюлозный наполнитель при концентрации 1,4 % от общей массы компонентов смеси (10–12 кг/м³ конструкционно-теплоизоляционного пенобетона) выполняет роль стабилизатора ячеистой структуры, обеспечивая повышение прочности до 2,9–3,15 МПа, при низких значениях средней плотности (до 530 кг/м³) и коэффициенте теплопроводности до 0,12 Вт/(м*К) [10].

Заключение

С учетом вышеизложенного можно подобрать наиболее эффективные сухие смеси для разных способов применения. Так, для теплоизоляции на объектах и площадках лучше всего подойдут сухие пенобетонные смеси на основе портландцементного вяжущего с высоким

количеством воды затворения (для придачи смеси большей подвижности). В связи с тем, что с увеличением количества воды прочность пенобетона падает, предлагается вводить в состав смеси перлитовые микросферы. Для производства теплоизоляционных изделий можно использовать смеси на основе гипсового вяжущего с низким количеством воды затворения, а для улучшения свойств готового изделия предлагается вводить целлюлозные волокна, которые плохо подходят для сухих смесей, применяемых на стройплощадках. В то же время сухие смеси на основе известкового вяжущего в настоящее время не выдерживают конкуренции с другими наполнителями. В перспективе могут быть получены специальные добавки, которые позволят использовать пенобетоны на основе известкового вяжущего более эффективно, но на данный момент стоит воздержаться от их применения, так как для своего нормального твердения они требуют особых условий, которые невозможно обеспечить на стройплощадке. Таким образом, оптимальным вариантом для получения пенобетона являются сухие смеси.

Библиографический список

1. Хозин В.Г., Красникова Н.М., Ерусланова Э.В. Легкие поризованные бетоны на основе сухих смесей // Строительные материалы. 2018. № 9. С. 40–45.
2. Особенности структурообразования пенобетона в зависимости от некоторых технологических параметров / А.В. Яконовская [и др.] // Вестник евразийской науки. 2019. № 4. С. 1–8.
3. Бруяко М.Г., Баженова С.И., Ву Ким Зиен. Ячеистые бетоны с вариатропной структурой на стадии формирования изделия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 7. С. 8–18.
4. Мухамедбаев Аг.А., Тулаганов А.А. Неавтоклавный пенобетон на основе шлакощелочного вяжущего // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: материалы IV Всероссийской конференции, Кемерово, 27–28 ноября 2018 года. С. 131.1–131.4.
5. Глаголов Е.С., Воронов В.В. Эффективное композитное вяжущее для монолитного пенобетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 6. С. 79–84.
6. Шаталова С.В. Эффективный ячеистый бетон на композиционном гипсовом вяжущем / С.В. Шаталова [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 10. С. 11–18.
7. Хозин В.Г., Красникова Н.М., Ерусланова Э.В. Легкие поризованные бетоны на основе сухих смесей // Строительные материалы. 2018. № 9. С. 40–45.
8. Винокурова О.В., Баранова А.А. К вопросу выбора оптимального водоцементного отношения при производстве теплоизоляционного пенобетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 19–29.

9. Машкин Н.А., Малахов Д.А., Русаков В.Е. Неавтоклавный пенобетон на основе перлитовых микросфер // Вестник Тувинского технического университета. 2017. № 3. С. 65–70.

10. Иващенко Ю.Г., Багапова Д.Ю., Страхов А.В. Конструкционно-теплоизоляционный пенобетон, модифицированный волокнистым наполнителем // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. С. 44–51.

EFFECTIVE THERMAL INSULATION DRY MIXES FOR FOAM CONCRETE

D.S. Panshin, M.A. Smirnov, V.I. Trofimov, V.V. Belov

***Abstract.** This paper analyzes the current prospects for the use of thermal insulation dry mixes for foam concrete, and also provides research data on changes in the properties of foam concrete depending on its composition and additives.*

***Keywords:** effective foam concrete, heat-insulating foam concrete, foam concrete on various binders.*

Об авторах:

ПАНЫШИН Даниил Сергеевич – студент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: psktstu@yandex.ru

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

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

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

About the authors:

PANSHIN Daniil Sergeevich – Student of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: psktstu@yandex.ru

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

BELOV Vladimir Vladimirovich – Advisor to RAACS, 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 658.567.1

МОДИФИКАЦИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО ЗОЛОШЛАКОВЫМИ ОТХОДАМИ

В.Б. Петропавловская, К.С. Петропавловский, Т.Б. Новиченкова

© Петропавловская В.Б., Петропавловский К.С.,
Новиченкова Т.Б., 2024

***Аннотация.** В статье представлены результаты исследования физико-механических характеристик высокопрочного гипса марки Г-16, модифицированного золошлаковыми отходами (ЗШО). Дана сравнительная характеристика применения алюмосиликатного и углеродного компонента отхода. Сделан вывод о целесообразности применения ЗШО для получения строительных материалов с целью снижения их стоимости и экологической нагрузки.*

***Ключевые слова:** высокопрочный гипс, золошлаковые отходы, прочность, эффективность.*

В последние десятилетия усиливается тенденция к экономичности строительных материалов и внедрению вторичных ресурсов. В большинстве случаев речь идет о сокращении расхода вяжущих веществ, так как именно они являются наиболее дорогостоящим компонентом смесей. Введение отходов позволяет уменьшить отрицательное влияние на окружающую среду [1], снизить расход вяжущего с сохранением баланса между различными характеристиками получаемого материала.