

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.12737/article_59a93b0800bbc7.91485565

Пучка О.В., канд. техн. наук, проф.,
 Вайсера С.С., магистрант,
 Лесовик В.С., член-корр. РААСН д-р техн. наук, проф.
 Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
 Сергеев С.В., канд. техн. наук
 ОАО «Дорожное эксплуатационное предприятие №96» обл. Белгородская, с Стрелецкое

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СТЕКЛОКОМПОЗИТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

vaisera_sergei@mail.ru

Свойства стеклокомпози́тов на основе пеностекла во многом зависят от его макро- и микро-структуры, изменять которую можно путем введения модифицирующих добавок в состав пенообразующей смеси, а также на стадии подготовки стеклогранулята. Актуальность исследования управления процессом формирования структуры материала с заданными свойствами обусловлена новыми возможностями получения многофункционального стеклокомпози́та, сочетающего тепло- и звукоизоляционные свойства с высокими прочностными характеристиками, либо эффективное поглощение акустических волн на средних и высоких частотах.

Ключевые слова: пеностекло, пористость, стеклокомпозит, прочность, звукопоглощение, комплексный газообразователь.

Введение. В настоящее время наблюдается интерес к материалам многофункционального назначения, которые за счет своей структуры используются как тепло и звукоизоляционные. Также материалы должны быть экологичными, пожаробезопасными и простыми при монтаже.

Одним из наиболее подходящих материалов, способный удовлетворить указанные требования, является пеностекло. Этот материал отличается низкой теплопроводностью, сравнительно большой прочностью (по отношению к его плотности) и неорганическим составом. Все вышеперечисленные характеристики обусловлены равномерным распределением закрытых мелких пор

в объеме материала. За счет этого теплоизоляционное пеностекло обладает высоким коэффициентом отражения звука β . Пеностекло материал двойного назначения: его используют как для теплоизоляции, так и для изоляции от воздушного шума при наружной отделке ограждающей конструкции [1–4]. Однако, для отделки внутренних помещений, как правило, высокая отражающая способность материала вредна, так как отраженные звуковые волны будут усиливать шум в помещении, создавая зоны стоячих волн. В данном случае необходимо, чтобы структура материала поглощала большую часть энергии, падающей на него звуковой волны.

Таблица 1

Эксплуатационные характеристики пеностекла различных производителей и современные акустические материалы

Наименование продукции	Плотность, $\rho_{ср}$, кг/м ³	Прочность, МПа	Теплопроводность, Вт/м·°С
НеопормСтэс	110	0,8	0,055
Неотим Китай	120	0,7	0,048
Foamglas	160	1,6	0,042
НеопормСтэс	180	2,5	0,65
Гомель	200	1,9	0,06
Пеноситал	200	1	0,068
<i>Звукопоглощающее пеностекло и различные акустические материалы</i>			
Наименование продукции	Плотность, $\rho_{ср}$, кг/м ³	Коэффициент звукопоглощения (α) при 1000 Гц	
Звукопоглощающее пеностекло	250–350	0,3–0,5	
Акустические минераловатные плиты	75–150	0,7–0,9	
Акустический фибролит	300–400	0,45–0,50	
Гипсовые перфорированные листы	650–730	0,4–0,9	

По сравнению с минераловатными или гипсовыми материалами использование пеностекла с открытой пористостью не представляется целесообразным по причине довольно низких значений коэффициента звукопоглощения (табл. 1).

Методология. В БГТУ им. В.Г. Шухова создана теоретическая база проектирования и создания стеклокомпозитов (СК) нового поколения за счет использования результатов, полученных при исследовании объектов неорганического мира. Основой разработки новых высокоэффективных материалов являются теоретические положения геоники (геомиметики) как нового перспективного трансдисциплинарного направления. Это позволяет проектировать новые строительные материалы с заданной структурой и необходимыми техническими характеристиками [5–6].

Результаты, полученные при исследовании горных пород (пемзы и туфа) – природных аналогов пеностекла – позволили спроектировать поризованные конструктивно-теплоизоляционные композиты с высокой способностью поглощения звуковой волны.

В качестве сырьевых компонентов для производства стеклокомпозитов тепло- и звукоизоляционного (СКЗИ) назначения был использован стеклопорошок, сваренный по ранее разработанному рецепту [6]. В роли газообразователя использовали технический углерод, марки П-24. При подборе составов СКЗИ учитывался имеющийся опыт ряда исследований [7–10].

Основная часть. Согласно проведенным исследованиям было определено оптимальное количество технического углерода в смеси, которое составляло – 0,7 мас. % сверх 100. Температурный интервал, в котором наиболее целесообразно использовать углеродсодержащий газообразователь составлял 750–900 °С, поэтому нами были проведены эксперименты при температуре вспенивания 750 °С, с шагом 50 °С. Интервал варьирования удельной поверхности стеклопорошка 750–1150 м²/кг.

Параметрами для подбора оптимального состава СКЗИ были следующие показатели: средняя плотность ($\rho_{\text{ср}}$, кг/м³), коэффициент вспенивания ($K_{\text{всп}}$), предел прочности при сжатии ($R_{\text{сж}}$, МПа) и объемное водопоглощение (W , %).

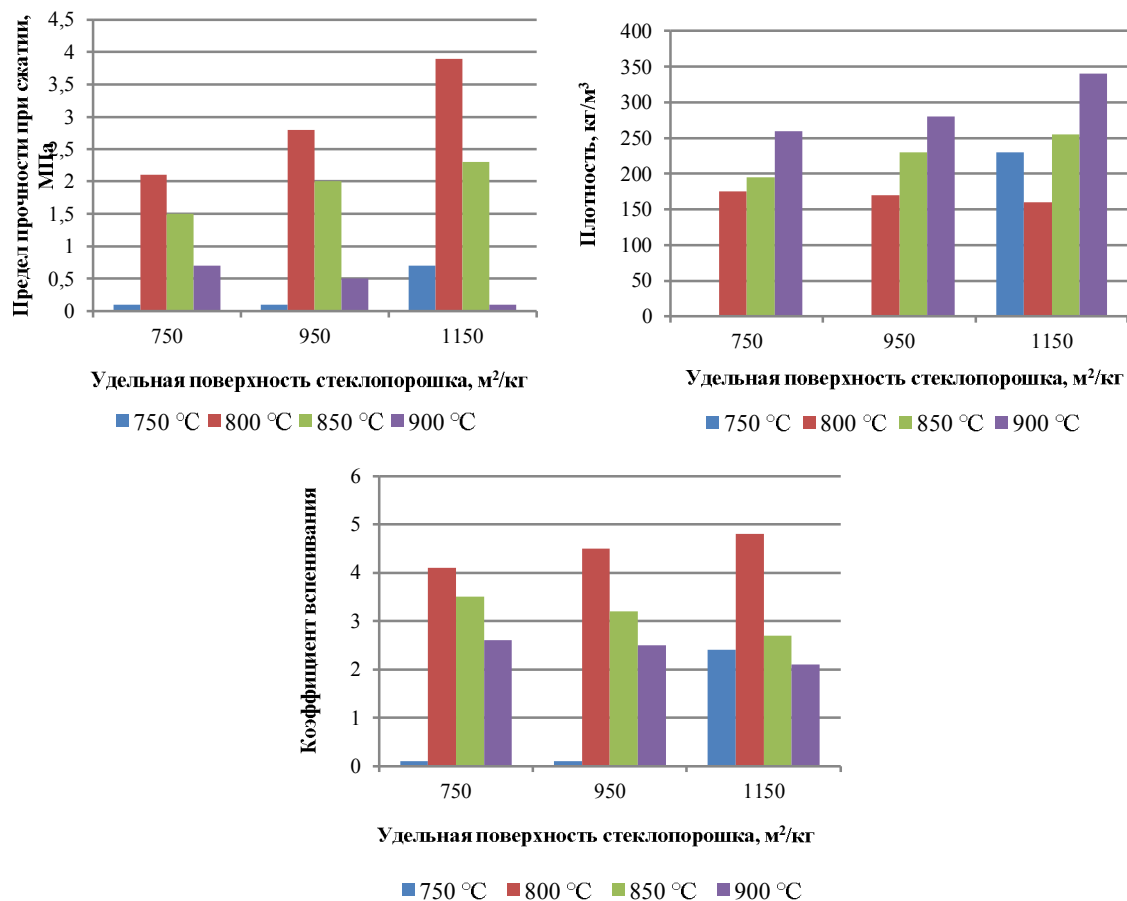


Рис. 1. Зависимости выходных параметров материалов от удельной поверхности стеклопорошка при различных температурах вспенивания

При различных температурах наблюдался нелинейный характер изменения эксплуатационных характеристик образцов (рис. 1). При темпе-

ратуре 750 °С получение материалов с удовлетворительными эксплуатационными характеристиками возможно только при условии максимальной удельной поверхности стеклопорошка

(1150 м²/кг).

Следует отметить, что уже при 800 °С, смесь вспенивается при различных значениях удельной поверхности стеклопорошка, что связано со снижением вязкости в температурном интервале вспенивания. При этом прочность при сжатии СКЗИ увеличивается до 3,9 МПа. Для установления причин роста прочности в дальнейшем были

проведены исследования микроструктуры образцов. Однако при увеличении температуры, эксплуатационные характеристики ухудшаются, что связано предположительно с изменениями в реологических свойствах пенообразующей смеси в процессе вспенивания.

С помощью рентгенофазового анализа были исследованы полученные СКЗИ (рис. 2 и табл.2).

Таблица 2

Технологические данные вспенивания пеностекла

S _{уд.} , м ² /кг	T вспенивания, °С	R _{сж.} МПа	ρ _{ср.} кг/м ³	K _{всп.}	W, %
1150	800–820	3,9	160	4,8	<5
1150	850–870	2,3	255	2,7	8–10

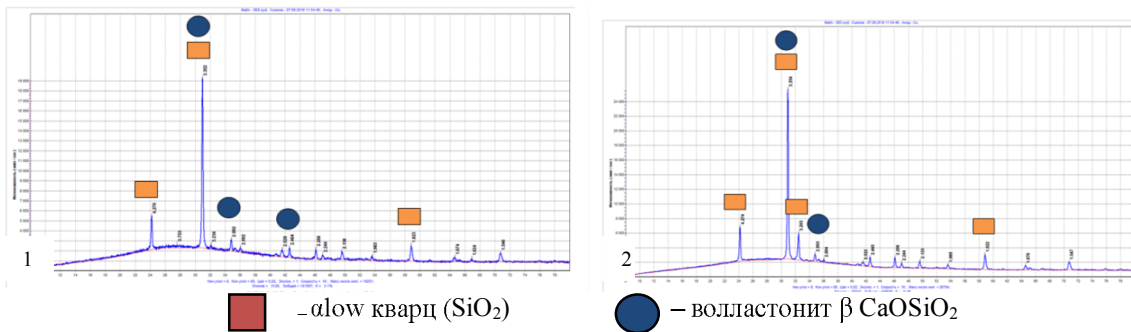


Рис.2. Рентгенофазовый анализ полученных СКЗИ
1 – температура вспенивания 800–820 °С, 2 – температура вспенивания 850–870 °С,

Образец, вспененный при температуре 850–870 °С, отличается от образца, полученного при 800–820 °С, повышенным содержанием кристаллической фазы, представленной оксидом кремния α-SiO₂ (d/n, A: 4,25; 3,35; 2,45; 1,8; 1,62) и полевыми шпатами в виде β волластонита CaO

SiO₂(d/n, A: 3,31; 2,95; 2,46; 1,81). Интенсивность пиков кристаллов кварца (24000 против 19000 имп/сек на рис. 2).

Данные составы также были исследованы методом РЭМ (рис. 3–4).

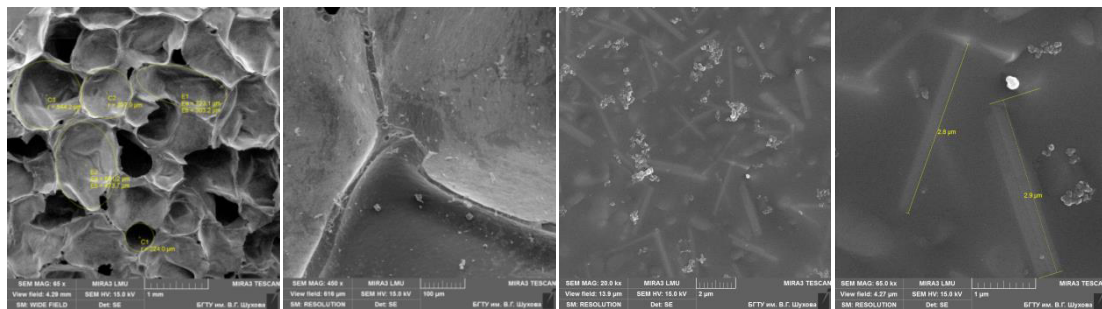


Рис. 3. Образец полученные при температуре вспенивания 800–820 °С,
Количество кристаллической фазы 3,1 %

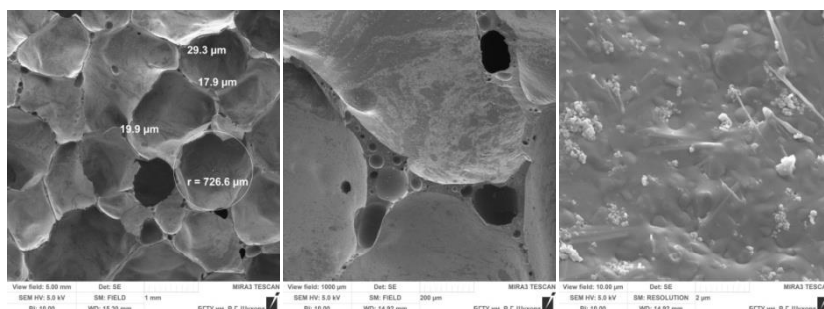


Рис. 4. Образец полученные при температуре вспенивания 850–870 °С,
Количество кристаллической фазы 9,4 %

Образец полученный при 800–820 °С содержит кристаллы вытянутой формы, которые представляют собой армирующую сетку, что, предположительно, и является причиной увеличения прочности пеностекла (рис. 3, 4). При повышении температуры вспенивания до 850–870 °С процент кристаллической фазы увеличивается с 3,1 до 9,4 % в результате чего растет плотность распределения кристаллов, однако прочность образца снижается несмотря на увеличение плотности (рис. 4). Снижение прочности очевидно связано с разрушением межпорových перегородок и объединением пор в более крупные неравномерные образования с большим количеством дефектов.

Результаты данного исследования позволили определить, значения технологических параметров, необходимых для получения стеклокомпозитов с заданным комплексом свойств.

Экспериментальная работа по повышению звукопоглощения стеклокомпозита. Для получения пеностекла с открытой (сообщающейся) пористостью, используют газообразователи из группы «карбонатных» газообразователей, что неотъемлемо связано с рядом недостатков. Образцы, получаемые «карбонатным» способом, имеют недостаточно высокие звукопоглощающие характеристики, повышенное водопоглощение и плотность изделий. Изменять характер пористой структуры пеностекла можно путем введения в пенообразующую смесь модифицирующих добавок различного рода. Так, в работах авторов [11] изучали влияние добавки в виде наноструктурного диоксида циркония на акустические свойства, размеры пор и макроструктуру готового пеностекла. Шутовым А.И. и др. [12] для увеличения звукопоглощения предложен способ применения газообразователя неоднородного гранулометрического состава, что в итоге способствовало созданию в массиве пеностекла дополнительной системы эллипсных пор.

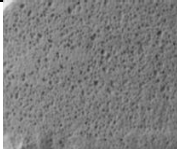
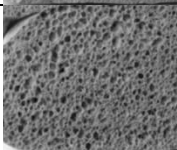
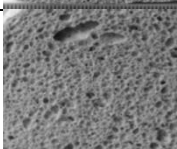

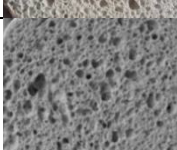
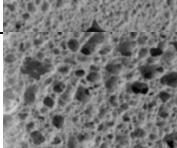

Для решения данной задачи на первом этапе исследований было изучено влияние использования колеманита на физико-механические свойства стеклокомпозита (табл.3). В качестве компонентов использовали ранее сваренный и измельченный стеклопорошок с удельной поверхностью 1150 м²/кг и различное количество колеманита, выступающего в роли газообразователя. Вспенивание осуществлялось при температуре 750±10 °С.

Благодаря экспериментальным исследованиям установлено, что при введении колеманита 1-2 % в смесь образцы не вспениваются. При увеличении вводимого колеманита (3–3,5 %) полученные образцы имеют коэффициент вспенивая

равным 3,5 при средней плотности 400 кг/м³. Образец с равномерным распределением пор был получен при содержании колеманита в пенообразующей смеси в интервале 4–5 %. При таком содержании средняя плотность стеклокомпозита составила 310 кг/м³, водопоглощение – до 25 %.

Таблица 3

Условия эксперимента и эксплуатационные свойства полученных материалов

Газообразователь (колеманит,%)	K _{всп}	ρ _{ср.} , кг/м ³	W, %	Фотография
1	Образец не вспенился			
2	Образец не вспенился			
3	3,2	420	14	
3,5	3,5	360	18	
4	3,7	330	20	
4,5	3,9	310	23	
5	3,9	305	38	
6	3,9	280	60	
7	3,9	265	75	

При введении колеманита в смесь в количестве более 5 % в образцах стеклокомпозита наблюдалась неравномерная крупнопористая структура, что связано с разрывом межпорových перегородок за счет излишнего увеличения давления газовой фазы и водяных паров при относительно высокой вязкости стекла.

Образцы, составы которых приведены в табл. 3, были исследованы методом РЭМ (рис. 5).

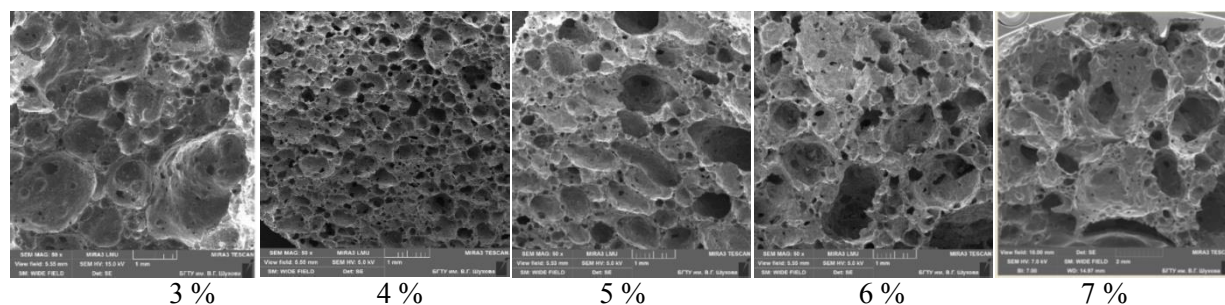


Рис. 5. Микрофотография образцов, полученных с использованием колеманита

Образец, полученный на основе 3 % газообразователя (колеманита), характеризуется плотной структурой и низким коэффициентом вспенивания, что объясняется недостаточным для полноценного процесса порообразования количеством газообразователя. Увеличение количества, вводимого газообразователя до 4–5 % позволяет получать образцы с равномерным распределением пор в объеме материала, плотность при этом уменьшилась, а водопоглощение увеличилось. При дальнейшем возрастании количества

газообразователя образуются крупные поры, за счет избыточного давления мелкие поры схлопываются неравномерно, образуя каналы в объеме материала, что способствует значительному увеличению водопоглощения образцов (рис. 5 и табл. 3).

Экспериментальным методом с помощью акустического интерферометра определили звукопоглощение образцов с различным процентным соотношением газообразователя (рис. 6).

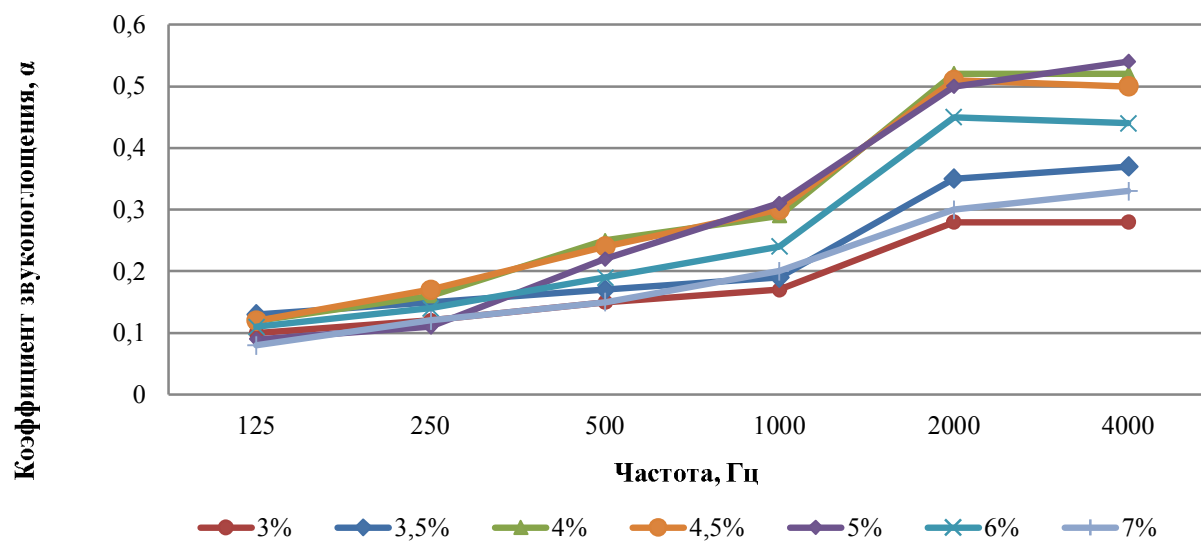


Рис.6. Звукопоглощение образцов, полученных с использованием колеманита





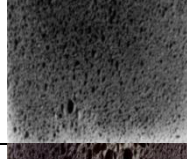

Наиболее выраженным коэффициентом звукопоглощения обладают образцы, полученные при введении колеманита в пенообразующую смесь в интервале от 4 до 5 % (рис. 6). В дальнейших экспериментах нами был использован образец, полученный при содержании колеманита 4,5 мас. %.

Исследования на комплексном газообразователе. Как уже отмечалось ранее для создания материала с полимодальной открытой пористостью, необходимо использовать несколько видов

газообразователей одновременно. Поэтому следующий этап исследования заключался в исследовании возможности использования, комбинированного (комплексного) газообразователя. К установленному ранее оптимальному количеству вводимого колеманита (4,5 мас. %) в смесь добавляли технический углерод марки П-24. Вспенивание осуществлялось при температуре 800 ± 10 °С.

Таблица 4

Условия эксперимента и основные эксплуатационные свойства СКЗП

№ образца	$K_{всп.}$	$\rho_{пер},$ кг/м ³	W, %	Фотография
СКЗП 1	3,7	285	24	
СКЗП 2	4,0	255	27	
СКЗП 2,5	4,2	230	28-30	
СКЗП 3	4,7	205	35	
СКЗП 3,5	4,7	180	45	
СКЗП 4	4,9	160	75	

В результате использования комплексного газообразователя (разное соотношение колеманит // технический углерод) можно сделать следующие выводы (табл.4). При введении 0,1 % технического углерода поры образца уменьшаются, по сравнению с образцом, полученным только на колеманите. При добавлении от 0,1 до 0,3 % водопоглощение образцов изменяется линейно, а свыше 0,3 % наблюдается скачкообразное его увеличение. Наилучшие значения были получены при соотношении, % – колеманит: 4,5 // 0,25 технический углерод. Данный стеклокомпозит обладает более равномерной структурой со средней плотностью 230 кг/м³ при объемном водопоглощении до 30 %. Значительное увеличение водопоглощения при повышении в смеси технического углерода (с 0,3 до 0,4 %).

Было выявлено, что добавление технического углерода в пенообразующую смесь с колеманитом, способствовало созданию более равномерной структуры в объеме материала, при этом наблюдается наличие различных пор по размерам (макропоры), пронизанных порами меньшего размера (микропоры).

Экспериментальным методом с помощью акустического интерферометра определили звукопоглощение образцов, приведенных в табл.4. (рис. 7).

Наиболее выраженным коэффициентом звукопоглощения обладают звукопоглощающие стеклокомпозиты СКЗП (2,5) и (3), полученные при соотношении комплексного газообразователя, % – колеманит: 4,5 // 0,25 и 0,3 технический углерод.

Полученные звукопоглощающие стеклокомпозиты (СКЗП) были исследованы методом РЭМ (рис. 8).

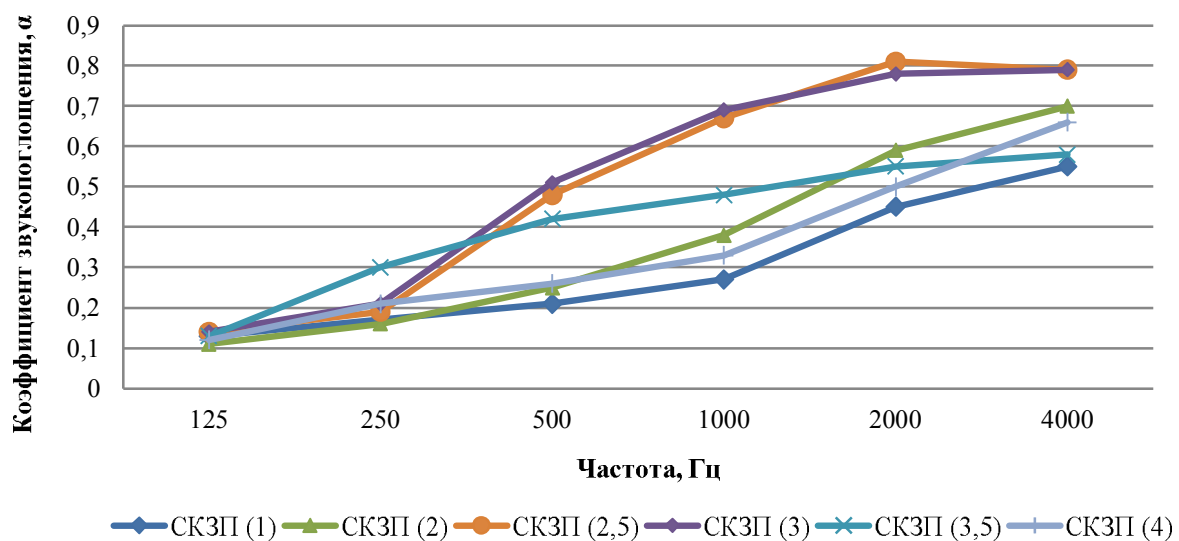


Рис. 7. Звукопоглощение образцов, полученных на основе комплексного газообразователя

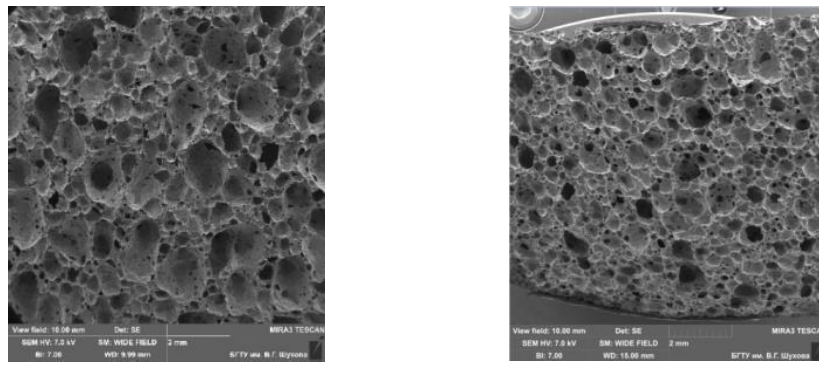


Рис. 8. Микрофотография СКЗП, полученных на комплексном газообразователе (колеманит // технический углерод, %: 4,5 // 0,25) (колеманит // технический углерод, %: 4,5 // 0,3)

Был проведен сравнительный анализ характеристик разработанного стеклокомпозита с акустическими материалами, представленными на российском рынке (рис. 9).

Анализ звукопоглощающих характеристик подтвердил конкурентоспособность разработан-

ного стеклокомпозита по части обеспечения акустического комфорта в помещении, а его неорганический состав, долговечность и стабильность свойств делает его наиболее предпочтительным при выборе акустических материалов.

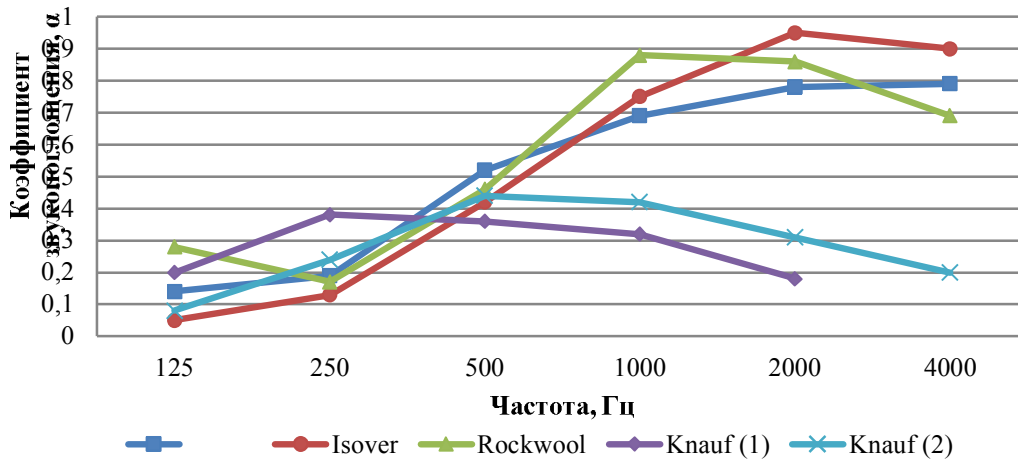


Рис. 9. Сравнительный анализ звукопоглощающих характеристик

Таблица 5

Итоговая таблица результатов исследования

Наименование продукции	Плотность, $\rho_{ср}$, кг/м ³	Прочность, МПа	Теплопроводность, Вт/м·°С
НеопормСтэс	110	0,8	0,055
Неотим Китай	120	0,7	0,048
Разработанный звукоизоляционный стеклокомпозит (СКЗИ)	160	3,9	0,058
Foamglas	160	1,6	0,042
Неотим Китай	160	2	0,062
НеопормСтэс	180	2,5	0,065
Гомель	200	1,9	0,06
Пеноситал	200	1	0,068
Пеноситал	300	1,5	-
<i>Звукопоглощающее пеностекло и различные акустические материалы</i>			
Наименование продукции	Плотность, $\rho_{ср}$, кг/м ³	Коэффициент звукопоглощения (α) при 1000 Гц	
Звукопоглощающее пеностекло	250–350	0,3–0,5	
Акустические минераловатные плиты	75–150	0,7–0,9	
Акустический фибролит	300–400	0,45–0,50	
Гипсовые перфорированные листы	650–730	0,4–0,9	
Разработанный звукопоглощающий стеклокомпозит (СКЗП)	250–280	0,65–0,70	

Выводы. Таким образом, с учетом теоретических положений нового трансдисциплинарного направления геоники (геомиметики) разработаны новые теплоизоляционно-конструкционные и эффективные в широком диапазоне звуковых частот звукопоглощающие стеклокомпозиты на основе пеностекла с измененной макро- и микроструктурой (см. табл. 5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комкова А.В., Рачинская М.П. Пеностекло и его применение в России // Современные научные исследования и инновации. 2012. № 5 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2012/05/12937> (дата обращения: 02.06.2017).
2. Осипов А.Н. Энергоэффективный, пожаробезопасный теплоизоляционный материал – пеностекло // Кровельные и изоляционные материалы. 2013. №2. С. 17–18.
3. Радоуцкий В.Ю., Шульженко В.Н., Степанова М.Н. Современные звукопоглощающие материалы и конструкции // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 76–79.
4. Сапачева Л.В., Горегляд С.Ю. Пеностекло для экологичного строительства в России // Строительные материалы. 2015. №1. С. 30–31.
5. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород: Изд-во БГТУ. 2016. 287 с.
6. Минько Н.И., Пучка О.В., Степанова М.Н., Вайсера С.С. Неорганические теплоизоляционные материалы. Пеностекло. Белгород: Изд-во БГТУ. 2016. 263 с.
7. «Шихта для изготовления стеклогранулята для получения пеностекла» Авторы: Лесовик В.С., Пучка О.В., Вайсера С.С., Орхан Йыльмаз, Хлыстов С.П. Заявка № 2014153456/03(085464) Решение о выдаче патента на изобретение от 14.01.2016
8. Лесовик В.С., Пучка О.В., Вайсера С.С., Елистраткин М.Ю. Новое поколение строительных композитов на основе пеностекла // Журнал Строительство и реконструкция, «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс» (УНПК). Орел. 2015. С. 146–154.
9. Вайсера С.С., Пучка О.В., Лесовик В.С., Бессонов И.В., Сергеев С.В. Эффективные акустические стеклокомпозиты // Строительные материалы. 2016. № 6. С. 28–31.
10. Радоуцкий В.Ю., Ветрова Ю.В. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизолирующей способности теплоизоляционных плит на основе пеностекла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 5. С. 45–49.
11. Семухин Б.С., Вотинов А.В., Казьмина О.В., Ковалев Г.И. Влияние малых добавок диоксида циркония на акустические свойства пеностекляных материалов // Вестник ТГАСУ. 2014. № 6 (47). С. 123–131.
12. Патент РФ 2266874 Шихта для изготовления пеностекла / Балясников В.И., Кириченко С.Э., Шутов А.И., Мосьпан В.И., Воля П.А. Заявл. 30.04.2002. Оpubл. 10.11.2003 Бюл. №2.

Puchka O.V., Vajsera S.S., Lesovik V.S., Sergeev S.V.

MANAGING THE PROCESS OF STRUCTURAL FORMATION AS THE FACTOR OF FORMATION OF GLASS COMPOSITE OF FUNCTIONAL DESTINATION

Properties of glass composite on the basis of a foam glass largely depend on its macro- and microstructure, which can be changed by introducing modifying additives into the composition of the foaming mixture, and also at the stage of preparation of the glass granulate. The relevance of a research of process control of structure formation of material with the desired properties is caused by new opportunities multifunctional glass composite, combining heat and sound insulation properties with high strength characteristics, or effective absorption of acoustic waves at medium and high frequencies.

Keywords: foam glass, porosity, glass composite, strength, sound absorption, integrated gas-forming agent.

Пучка Олег Владимирович, кандидат технических наук, профессор кафедры стандартизации и управления качеством.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

E-mail: oleg8a@mail.ru

Вайсера Сергей Сергеевич, магистрант кафедры энергетики теплотехнологии.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: vaisera_sergei@mail.ru

Лесовик Валерий Станиславович, член-корр. РААСН, доктор технических наук, зав. кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: naukavs@mail.ru

Сергеев Сергей Викторович, начальник лаборатории.

ОАО «Дорожное эксплуатационное предприятие №96» Шебекинского района г. Белгорода,

Адрес: Россия, 308511, Белгородская обл, Белгородский р-н, Стрелецкое с, Строительная, 17.