Получение заливочных пенофенопластов пониженной токсичности

Нгуен Вьет Кыонг¹, Н.Ю. Сосновский², В.П. Янчук²,
А.М. Смирнова², Л.С. Григорьева²

¹ Ханойский архитектурный институт; г. Ханой, Вьетнам;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Газонаполненные полимеры являются высокоэффективными строительными теплоизоляционными материалами, в связи с чем, проведение исследований с целью развития технологий их создания — актуальная задача. Фенолформальдегидные пенопласты могут оказаться перспективным материалом, который обладает рядом значительных преимуществ, однако высокая токсичность выделяемых им соединений фенола и формальдегида служит существенным сдерживающим их применение фактором. Цель данного исследования — поиски путей снижения токсичности пенофенопластов. Рассмотрен метод использования катионов железа в качестве комплексообразователя, связывающего фенол, при одновременном применении гексафторосиликата натрия с целью снижения материалоемкости.

Материалы и методы. Исследования проведены на фенолформальдегидной смоле ФРВ-1А (ТУ 6-05-1104-78 «Смола фенолформальдегидная вспенивающаяся марки ФРВ-1А») и отверждающем агенте ВАГ-3 (ТУ 6-55-1116-88 «Продукт ВАГ-3»). Количество свободных мономеров фенола определено методом газовой хроматографии в соответствии с ГОСТ 11235-2017 «Смолы фенолоформальдегидные. Методы определения свободного фенола». Испытания осуществлены с использованием хроматографа «Цвет-4». Испытания по определению кратности вспенивания проведены согласно ТУ 6-05-1104-78 «Смола фенолформальдегидная вспенивающаяся марки ФРВ-1А». Плотность образцов измеряли исходя из соотношения масс образцов к их объему. Прочность определена при применении образцов размерами 50 × 50 × 50 мм при 10-процентном сжатии на испытательном прессе.

Результаты. Проведенные исследования показали снижение содержания свободных мономеров фенола в образцах, модифицированных хлоридом железа (III), использование гексафторосиликата натрия позволяет значительно понизить плотность готового материала и, как следствие, понизить токсичность пенофенопласта на единицу массы материала.

Выводы. Согласно полученным результатам, наиболее эффективным для детоксикации заливочного пенофенопласта было принято использование хлорида железа (III) в количестве 2 % от массы олигомера ФРВ-1А при добавлении 0,5 масс. % гексафторосиликата натрия. Использование данного метода модификации резольного фенолформальдегидного пенопласта в перспективе может позволить получать значительно более безопасный материал и расширить область его применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мономер, фенол, формальдегид, пенопласт, заливочный пенопласт, пенофенопласт, токсичность, смола, токсичность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Нгуен Вьет Кыонг, Сосновский Н.Ю., Янчук В.П., Смирнова А.М., Григорьева Л.С. Получение заливочных пенофенопластов пониженной токсичности // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 9. С. 1132–1139. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1132-1139

Preparation of low-toxicity cast foamed phenolic plastics

Nguyen Viet Cong¹, Nikolay Y. Sosnovskiy², Valentin P. Yanchuk²,
Anastasia M. Smirnova², Larisa S. Grigorieva²

¹ Hanoi Architectural University; Hanoi City, Vietnam;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Gas-filled polymers are highly efficient building thermal insulation materials, and therefore, researching to develop technologies to create them is a promising task. Phenol-formaldehyde foamed plastic can be a high-potential material with many significant advantages. However, the high toxicity of the phenol and formaldehyde compounds it releases is a significant deterrent to its usage. Therefore, the purpose of this study was to search for ways to reduce the toxicity of

foamed plastic. The research considered the method of using ferric chloride as a complexing agent that binds phenol, with simultaneous use of sodium hexafluorosilicate to reduce material consumption.

Materials and methods. The studies were carried out on phenol-formaldehyde resin FRV-1A (TU 6-05-1104-78 "Resin, phenol-formaldehyde, foaming, brand FRV-1A") and curing agent VAG-3 (TU 6-55-1116-88 "Product VAG-3"). The number of free phenol monomers was determined through gas chromatography method following GOST 11235-2017 "Phenol-formaldehyde resins. Methods for determination of free phenol". The tests were carried out using a Tsvet-4 chromatograph. Tests on determining the foaming rate were carried out according to TU 6-05-1104-78 "Resin, phenol-formaldehyde, foaming, brand FRV-1A". The density of the samples was measured basing on the mass-to-volume ratio of the samples. Strength was determined using samples of size 50 × 50 × 50 mm at 10 % compression on a test press.

Results. The conducted studies showed a decrease in the content of free phenol monomers in samples modified with ferric chloride. The use of sodium hexafluorosilicate allows significantly reducing the density of the finished material and, consequently, reducing the toxicity of foamed phenolic plastic per material mass unit.

Conclusions. According to the obtained results, the most effective for detoxifying a cast foamed phenolic plastic is the use of ferric chloride in an amount of 2 % of the FRV-1A oligomer mass with the addition of 0.5 % of the sodium hexafluorosilicate mass. The use of this method for modifying phenol-formaldehyde resin foam in the future may make it possible to obtain a much safer material and expand its areas of application.

KEYWORDS: monomer, phenol, formaldehyde, foamed plastic, cast foamed plastic, foamed phenolic plastic, resin, toxicity

FOR CITATION: Nguyen Viet Cong, Sosnovskiy N.Y., Yanchuk V.P., Smirnova A.M., Grigorieva L.S. Preparation of low-toxicity cast foamed phenolic plastics. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14:9:1132-1139. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1132-1139 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение соответствия современным требованиям по энергоэффективности к возводимым зданиям, сооружениям, требованиям в отношении теплопотерь при транзите теплоносителей по трубопроводам сегодня уже почти невозможно представить без привлечения соответствующих материалов теплоизолирующего назначения.

Наиболее эффективными при эксплуатации строительными теплоизоляционными материалами являются газонаполненные полимеры. Область их применения во многом обуславливается характеристиками самой полимерной матрицы, такими как: температурный интервал эксплуатации, химическая стойкость, водостойкость. Строительным материалам на основе органических полимеров присущи высокая склонность к горению с выделением токсичных продуктов, высокая дымообразующая способность, относительно низкие положительные температуры эксплуатации, что в значительной степени ограничивает их области применения.

Для устройства теплоизоляции в строительстве широкое применение получил пенополистирол (ППС) и изделия на его основе. Это объясняется его высокими теплоизолирующими характеристиками и водостойкостью, низким предельным отрицательным значением температуры эксплуатации и дешевой. Основными сдерживающими факторами применения ППС являются его высокая пожароопасность и низкая положительная температура экс-

плуатации. В источнике [1] установлено, что как для ППС плотностью $d = 40\text{--}100 \text{ кг/м}^3$, так и для самого исходного полимера значения кислородного индекса не превышают 18 %.

Значимое место в строительстве занимают пенополиуретаны (ППУ), материалы и изделия на их основе. Среди отличительных характеристик можно выделить высокую теплоизолирующую способность, технологичность при устройстве теплоизоляции в условиях стройплощадки при использовании метода напыления, а также сравнительную простоту изготовления изделий и конструкций в заводских условиях [2, 3].

Ограничение применения ППУ на территории России связано с высокой конечной стоимостью изделий на их основе, которое обуславливается отсутствием отечественной производственной базы одного из основных компонентов ППУ — изоцианатов, потребность в которых на сегодняшний день удовлетворяется только импортом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С точки зрения технологичности процесса получения пенофенопластов наиболее эффективным промышленным методом признан заливочный метод. Технология производства ФРП-1 базируется на смешении двух компонентов (ФРВ-1А и ВАГ-3) с дальнейшей заливкой смеси в полость форм и последующим отверждением, сопровождающимся повышением температуры системы до 100 °С.

ФРВ-1А (ТУ 6-05-1104-78) — резольный форполимер, гомогенная смесь форполимера ФРВ-1 с пластификатором и алюминиевой пудрой (ФРВ-1 — полидисперсная смесь первичных продуктов поликонденсации фенола с формальдегидом в присутствии катализатора в виде сильного основания (NaOH)).

ВАГ-3 (ТУ-6-05-1116-88) представляет собой продукт конденсации сульфофенолмочевины с формальдегидом, а также ортофосфорной кислотой.

В результате проходящих процессов поликонденсации и единовременного вспенивания водородом отверждающейся массы происходит образование развитой пористо-ячеистой структуры с диаметром ячеек 0,1–0,3 мм. Остаточные же количества несвязанных мономеров фенола (II-й класс опасности) и формальдегида (II-й класс опасности) при эмиссии могут попадать в окружающую среду, оказывая значительное токсическое воздействие на человека, накапливаясь в организме [11]. Для уменьшения концентрации несвязанного фенола и формальдегида авторами работ [9, 10, 12, 13] предложены такие подходы, как использование модифицирующих добавок, связывающих мономеры фенола, добавление сорбентов (цеолиты), а также разработка методов синтеза смол с уменьшением или замещением части фенола в составе сырья.

Свойства фенолформальдегидного пенопласта напрямую зависят от характеристик исходного сырья и вводимых в его состав модификаторов [14–17]. В связи с особой природой пенофенопласта высокой эффективности при модификации свойств можно достичь путем изготовления композитов на основе фенолформальдегидного олигомера [13–15, 18–21].

Снижение выделяемых мономеров фенола можно получить введением в фенолформальдегидные смолы добавок комплексообразователей, способных связывать свободные мономеры фенола в тяжелые, менее летучие комплексные соединения. Известны способы образования подобных связей, понижающих концентрацию выделяемых мономеров фенола, введением в сырье фтористых соединений алюминия или хлоридов олова [9, 10].

Добиться сокращения высвобождающихся из изделий токсичных веществ возможно путем уменьшения массовой доли твердой полимерной матрицы в материале и замещением ее большим количеством газообразной фазы. Такой эффект может быть возможен благодаря добавлению в исходную компонентную смесь катализаторов поликонденсации, интенсифицирующих реакции образования полимерной цепи и позволяющих получать изделия меньшей плотности. Для этих целей в сырье могут вводиться фториды металлов.

Снижение материалоемкости изделий может быть достигнуто введением дополнительного газообразующего компонента, способствующего повышению пористости изготавливаемого изделия и снижению плотности материала. Повышение выделения газовой фазы в процессе изготовления материала или изделия можно получить как изменением содержания находящейся в ФРП-1А алюминиевой пудры, так и добавлением дополнительного газообразователя, например, легкокипящих жидкостей (пентан, трихлорфторметан и др.).

В данном исследовании решение проблемы было предложено с позиции разностороннего подхода — связыванием мономеров фенола в нелетучие комплексные соединения таким соединением как трихлорид железа (FeCl_3 — трехвалентная соль железа и соляной кислоты) при единовременном понижении материалоемкости изделий, которое достигается введением в состав заливочной смеси гексафторосиликата натрия (Na_2SiF_6).

Трихлорид железа, вступая в реакцию с фенолом, способен связывать его в нелетучие комплексы фенолята железа, таким образом снижая его опасность для окружающей среды.

В ходе исследования были проведены испытания по определению эффективности использования различных концентраций гексафторосиликата натрия на кратность вспенивания изделий и их среднюю плотность. Измерения кратности вспенивания изделий проводились по стандартной методике в соответствии с ТУ 6-05-1104-78 «Смола фенолоформальдегидная вспенивающаяся марки ФРВ-1А». При осуществлении вспенивания бездобавочных контрольных образцов и образцов с эффективной концентрацией гексафторосиликата натрия 0,5 % от массы ФРВ-1А проводились измерения динамики вспенивания путем замера показателей температуры и кратности вспенивающейся массы во времени. Показатели фиксировались каждые 20 с во время процесса, и каждые 10 с после его окончания. Измерение температуры на поверхности вспенивающихся образцов осуществлялось при помощи ручного оптического пирометра ADA TemPro 300 A00222.

Прочность образцов определялась при 10-процентном сжатии гидравлическим прессом AS-102 (Венгрия) на образцах кубической формы размерами $50 \times 50 \times 50$ мм.

Далее с применением наиболее эффективного состава были изготовлены образцы, во вспениваемую массу которых вводился хлорид железа (III) в различных количествах. Образцы были исследованы на содержание остаточного фенола методом определения газовой хроматографии в соответствии с ГОСТ 11235-2017 «Смолы фенолоформальдегидные. Методы определения свободного фенола».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные в ходе исследования результаты влияния гексафторосиликата натрия на плотность и прочность образцов представлены в табл. 1. Данные по единовременному влиянию кремнефтористого натрия и трихлористого железа на плотность образцов и содержание в них фенола показаны в табл. 2. Динамика процессов вспенивания контрольной бездобавочной массы приведена в табл. 3.

Согласно полученным результатам, введение хлорида железа (III) в олигомерную массу ФРВ-1А непосредственно перед началом вспенивания приводит к снижению массы содержания свободного фенола в отвержденных образцах. При использовании хлорида железа (III) в количестве до 2 масс. % в образцах отмечалось значительное падение содержания фенола. При использовании добавки в ко-

личестве 2 масс. % и более содержание свободного фенола в изделии приближалось к нулю и находилось ниже предела обнаружения согласно методике выполнения измерений.

При добавлении трихлористого железа и повышении его содержания плотность образцов пенофенопласта и кратность вспенивания олигомерной композиции менялась незначительно, введение соединения в больших, избыточных количествах является нецелесообразным.

Введение трихлорида железа не оказало заметного влияния на сами процессы вспенивания резольной вспениваемой олигомерной массы. Длительность индукционного периода и общая продолжительность отверждения фенолформальдегидного пенопласта с добавлением 2 % хлорида железа (III) от массы ФРВ-1А совпадает с соответствующими параметрами у контрольного бездобавочного образца.

Табл. 1. Результаты влияния гексафторосиликата натрия

Table 1. Effects of sodium hexafluorosilicate

Номер / Number	Na_2SiF_6 , % масс. / Na_2SiF_6 , mass %	Кратность вспенивания / Foaming rate	Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	Прочность на сжатие, МПа / Compressive strength, MPa
1	0	22,1	54,4	0,109
2	0,25	25,1	48,4	0,094
3	0,5	31,5	38,6	0,076
4	0,75	22,6	53,6	0,102
5	1	15,6	79,4	0,117
6	1,25	12,9	96,3	0,132

Табл. 2. Результаты влияния хлорида железа (III)

Table 2. Effects of ferric chloride

Номер / Number	FeCl_3 , % масс. / FeCl_3 , mass %	Na_2SiF_6 , % масс. / Na_2SiF_6 , mass %	Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	Содержание свободного фенола в готовом пенопласте, % масс. / Content of free phenol in finished foam, mass %
1	0	0,5	39,1	1,92
2	0,8	0,5	39,7	1,06
3	1,2	0,5	38,8	0,68
4	1,6	0,5	40,1	0,33
5	2	0,5	39,8	0
6	2,4	0,5	40,8	0

Табл. 3. Динамика вспенивания массы без добавок

Table 3. Dynamics of mass foaming without additives

Время, с / Time, s	Высота образца, см / Sample height, cm	Кратность вспенивания / Foaming rate	Температура, °C / Temperature, °C
0	1,4	1,0	22
130	1,5	1,1	31,5
230	31,7	22,4	91

Табл. 4. Динамика вспенивания массы при введении Na_2SiF_6 0,5 % масс.Table 4. Dynamics of mass foaming with Na_2SiF_6 0.5 mass %

Время, с / Time, s	Высота образца, см / Sample height, cm	Кратность вспенивания / Foaming rate	Температура, °C / Temperature, °C /
0	1,4	1,0	22
80	1,6	1,1	31
150	44,1	31,2	94

Табл. 5. Динамика вспенивания массы при введении Na_2SiF_6 0,25 % масс.Table 5. Dynamics of mass foaming with Na_2SiF_6 0.25 mass %

Время, с / Time, s	Высота образца, см / Sample height, cm	Кратность вспенивания / Foaming rate	Температура, °C / Temperature, °C /
0	1,4	1,0	22
110	1,6	1,1	31
190	35,5	25,2	91

Табл. 6. Динамика вспенивания массы при введении Na_2SiF_6 0,5 % масс. и FeCl_3 2 % масс.Table 6. Dynamics of mass foaming with Na_2SiF_6 0.5 mass % and FeCl_3 2 mass %

Время, с / Time, s	Высота образца, см / Sample height, cm	Кратность вспенивания / Foaming rate	Температура, °C / Temperature, °C /
0	1,4	1,0	22
80	1,6	1,1	31,5
150	43,0	30,7	90

Значительный эффект на вспенивание и отверждение отмечается от введения гексафторосиликата натрия. Использование добавки до 0,75 % от массы фенолформальдегидной смолы ФРВ-1А показало прирост кратности вспенивания и, соответственно, снижение плотности образцов. При использовании гексафторосиликата натрия в количестве 0,5 масс. % был отмечен максимально оказываемый эффект повышения плотности, дальнейшее повышение содержания модифицирующего соединения приводило к понижению плотности. Также введение избыточных количеств гексафторосиликата натрия приводило к значительному ускорению процессов газообразования во вспениваемой смеси, при этом не оказывая столь значительного влияния на процессы отверждения. Из-за такого расхождения в скорости процессов газообразования и отверждения масса не успевала набирать необходимую вязкость для оптимального расширения, что выражалось в снижении конечной кратности вспенивания.

Образцы, полученные с введением гексафторосиликата натрия в количествах от 0,25 до 0,5 масс. %, из-за меньшей плотности содержат в себе меньшее содержание токсичных мономеров фенола и формальдегида на единицу объема материала, чем бездобавочные образцы. Закономерно

более низкую прочность показали образцы с меньшей плотностью из-за большего количества более тонких стенок ячеек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что введение хлорида железа (III) в сырьевую смесь фенолформальдегидного олигомера позволяет достигнуть снижения токсичности пенофенопласта, что объясняется реакцией модификатора с фенолом, который связывается в нелетучие комплексные соединения. Наиболее эффективным для детоксикации пенофенопласта можно считать введение трихлористого железа в количестве 2–2,4 % от массы олигомера ФРВ-1А. Использование в качестве катализатора процессов вспенивания и отверждения гексафторосиликата натрия продемонстрировало значительный прирост скорости процессов поликонденсации. Сократить сроки отверждения вспениваемой массы с 230 до 150 с (на 35 %) удалось благодаря введению 0,5 % гексафторосиликата натрия от массы ФРВ-1А. Сроки индукционного периода снизились на 38 %. Процессы газообразования начинались быстрее и протекали значительно интенсивнее, что способствовало

увеличению конечной кратности вспенивания и, как следствие, меньшей плотности готовых изделий.

Получаемый при введении гексафторосиликата натрия материал во время процесса и на протяжении нескольких минут после завершения процессов вспенивания обладал значительно менее жесткой структурой, способной к изменению формы. Наблюдаемый эффект теоретически может быть использован при изготовлении изделий сложной формы для наиболее полного заполнения форм. Однако при введении избытка химического модификатора (0,75 % от массы олигомера ФРВ-1А и более) данное явление приводило к сильной усадке материала по завершению процессов газообразования.

Наблюдаемая при введении катализатора интенсификация процессов поликонденсации и газообразования приводила к получению образцов мень-

шей плотности (уменьшение плотности до 28 % при введении гексафторосиликата натрия 0,5 % от массы ФРВ-1А). Такие данные позволяют сделать предположение о потенциальном экономически выгодном снижении материалоемкости получаемых материалов и изделий на основе резольных пенофенопластов. Снижение количества привлекаемого сырья, затрачиваемого на единицу объема изделий из пенофенопласта, может способствовать уменьшению количества мономеров фенола и формальдегида, попадающих вместе с олигомерной массой в изделия.

Совместное использование в качестве добавок хлорида железа (III) и гексафторосиликата натрия может оказаться эффективным методом детоксикации фенолформальдегидного пенопласта, позволяющего значительно расширить область применения данного материала, повысив к нему интерес производителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушков В.А. Горючесть газонаполненных полимеров // *Строительство: наука и образование*. 2017. Т. 7. № 3 (24). С. 60–68. DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.5
2. Ушков В.А., Сокорева Е.В., Славин А.М., Орлова А.М. Пожарная опасность резольных пенофенопластов и жестких пенополиуретанов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 5. С. 65–68.
3. Ушков В.А., Сокорева Е.В., Горюнова А.В., Демьяненко С.А. Пожарная опасность фосфорсодержащих жестких заливочных пенополиуретанов // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 12 (123). С. 1524–1532. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1524-1532
4. Xiao W., Huang Z., Ding J. The mechanical and thermal characteristics of phenolic foam reinforced with kaolin powder and glass fiber fabric // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 274. P. 012013. DOI: 10.1088/1757-899x/274/1/012013
5. Ma Y., Wang J., Xu Y., Wang C., Chu F. Preparation and characterization of phenolic foams with eco-friendly halogen-free flame retardant // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2013. Vol. 114. Issue 3. Pp. 1143–1151. DOI: 10.1007/s10973-013-3180-6
6. Deng D.Q., Xu L. Measurements of thermal expansion coefficient of phenolic foam at low temperatures // *Cryogenics*. 2003. Vol. 43. Issue 8. Pp. 465–468. DOI: 10.1016/S0011-2275(03)00122-X
7. Tseng C.J., Kuo K.T. Thermal radiative properties of phenolic foam insulation // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2002. Vol. 72. Issue 4. Pp. 349–359. DOI: 10.1016/S0022-4073(01)00129-7
8. Gao M., Wu W., Wang Y., Wang Y. Phenolic foam modified with dicyandiamide as toughening agent // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016. Vol. 124. Issue 1. Pp. 189–195. DOI: 10.1007/s10973-015-5156-1
9. Львов С.А., Филиппова В.В. Пенопласт пониженной токсичности. Методы снижения содержания свободного фенола в пенофенопластах // *Дни студенческой науки : сб. док. науч.-техн. конф. по итогам науч.-исследов. работ студентов института строительства и архитектуры*, Москва, 12–16 марта 2018 г. 2018. С. 1175–1177.
10. Бруйко М.Г., Григорьева Л.С., Васильева М.А., Киселева О.В. Способы снижения содержания свободного фенола в пенофенопласте // *Вестник МГСУ*. 2012. Т. 7. № 12. С. 134–138. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.12
11. Мельников С.Ф., Ахмадиева Л.В., Мусеенко В.А., Шаповалов В.М. Экологические аспекты изготовления машиностроительных материалов на основе фенольных смол // *Горная механика и машиностроение*. 2012. № 2. С. 101–106.
12. Бруйко М.Г. Эффективные теплоизоляционные материалы на основе модифицированных резольных пенофенопластов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 19 с.
13. Del Saz-Orozco B., Oliet M., Alonso M.V., Rojo E., Rodríguez F. Formulation optimization of unreinforced and lignin nanoparticle-reinforced phenolic foams using an analysis of variance approach // *Composites Science and Technology*. 2012. Vol. 72. Issue 6. Pp. 667–674. DOI: 10.1016/j.compscitech.2012.01.013
14. Парахин И.В., Туманов А.С. Фенольно-каучуковый пенопласт марки ВПП-4 // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 1 (30). С. 42–46.

15. Саматадзе А.И., Парахин И.В., Поросова Н.Ф., Туманов А.С. Выбор пластификатора для фенольно-каучукового пенопласта // Композиты и наноструктуры. 2014. Т. 6. № 2 (22). С. 117–124.

16. Саматадзе А.И., Парахин И.В., Поросова Н.Ф., Туманов А.С. Получение фенольно-каучуковых пенопластов методом «бессерной» вулканизации // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 3 (28). С. 49–52.

17. Коваленко А.В., Тундайкин К.О., Парахин И.В., Лукина А.И. Фенолкаучуковые пенопласты, некоррозионно-активные к цветным металлам // Новости материаловедения. Наука и техника. 2017. № 3–4 (27). С. 5.

18. Qian Xu, Rui Gong, Meng-ya Cui, Chuan Liu, Rui-hai Li. Preparation of high-strength microporous phenolic open-cell foams with physical foaming meth-

od // High Performance Polymers. 2015. Vol. 27. Issue 7. Pp. 852–867. DOI: 10.1177/0954008314564197

19. Li Q., Chen L., Ding J., Zhang J., Li X., Zheng K. et al. Open-cell phenolic carbon foam and electromagnetic interference shielding properties // Carbon. 2016. Vol. 104. Pp. 90–105. DOI: 10.1016/j.carbon.2016.03.055

20. Wang B., Li H.-J., Guo L.-J., Zhang Y.-L., Li Y.-Y., Xu J.-X. Preparation and properties of precursor of phenolic-based carbon foams // Gutu Huojian Jishu. 2014. Vol. 37. No. 1. Pp. 113–117. DOI: 10.7673/j.issn.1006-2793.2014.01.022

21. Rangari V.K., Hassan T.A., Zhou Y., Mahfuz H., Jeelani S., Prorok B.C. Cloisite clay-infused phenolic foam nanocomposites // Journal of Applied Polymer Science. 2007. Vol. 103. Issue 1. Pp. 308–314. DOI: 10.1002/app.25287

Поступила в редакцию 16 мая 2019 г.

Принята в доработанном виде 9 августа 2019 г.

Одобрена для публикации 29 августа 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: **Нгуен Вьет Кыонг** — кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии строительных материалов факультета ПГС; **Ханойский архитектурный институт**; Инг Нгуен Трай, район Тхань Сюань, г. Ханой, Вьетнам; cong.vlxdkt@gmail.com;

Николай Юрьевич Сосновский — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; isa@mgsu.ru;

Валентин Петрович Янчук — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; isa@mgsu.ru;

Анастасия Максимовна Смирнова — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; isa@mgsu.ru;

Лариса Станиславовна Григорьева — кандидат химических наук, доцент кафедры строительных материалов и материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0003-1826-9481; grigoryevals@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Ushkov V.A. Flammability of gas-filled polymers. *Construction: Science and Education*. 2017; 7:3(24):60–68. DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.5. (rus.).

2. Ushkov V.A., Sokoreva E.V., Slavin A.M., Orlova A.M. Fire hazard of resole phenolic foams and rigid polyurethane foams. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 5:65–68. (rus.).

3. Ushkov V.A., Sokoreva E.V., Goryunova A.V., Demjanenko S.A. Fire hazard of phosphorus-containing hard casting polyurethane foams. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil

Engineering]. 2018; 13:12(123):1524–1532. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.12.1524–1532 (rus.).

4. Xiao W., Huang Z., Ding J. The mechanical and thermal characteristics of phenolic foam reinforced with kaolin powder and glass fiber fabric. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 274:012013. DOI: 10.1088/1757-899x/274/1/012013

5. Ma Y., Wang J., Xu Y., Wang C., Chu F. Preparation and characterization of phenolic foams with eco-friendly halogen-free flame retardant. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2013; 114(3):1143–1151. DOI: 10.1007/s10973-013-3180-6

6. Deng D.Q., Xu L. Measurements of thermal expansion coefficient of phenolic foam at low temperatures. *Cryogenics*. 2003; 43(8):465-468. DOI: 10.1016/S0011-2275(03)00122-X
7. Tseng C.J., Kuo K.T. Thermal radiative properties of phenolic foam insulation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2002; 72(4):349-359. DOI: 10.1016/S0022-4073(01)00129-7
8. Gao M., Wu W., Wang Y., Wang Y. Phenolic foam modified with dicyandiamide as toughening agent. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2016; 124(1):189-195. DOI: 10.1007/s10973-015-5156-1
9. L'vov S.A., Filippova V.V. Polyfoam of low toxicity. Methods for reducing the content of free phenol in foamed plastics. *Student Science Days : collection of reports of a scientific and technical conference based on the results of research work by students of the Institute of Construction and Architecture, Moscow, 12-16 March 2018*. 2018; 1175-1177. (rus.).
10. Bruyako M.G., Grigor'eva L.S., Vasil'eva M.A., Kiseleva O.V. Methods of reduction of free phenol content in phenolic foam. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 7(12):134-138. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.12 (rus.).
11. Melnikov S.F., Akhmadieva L.V., Moiseenko V.A., Shapovalov V.M. Ecology aspects of manufacturing of engineering materials on the base of phenol resins. *Mining Mechanics and Mechanical Engineering*. 2012; 2:101-106. (rus.).
12. Bruyako M.G. *Effective heat-insulating materials based on modified rezol foam foams: abstract diss. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 2009; 19. (rus.).
13. Del Saz-Orozco B., Oliet M., Alonso M.V., Rojo E., Rodríguez F. Formulation optimization of unreinforced and lignin nanoparticle-reinforced phenolic foams using an analysis of variance approach. *Composites Science and Technology*. 2012; 72(6):667-674. DOI: 10.1016/j.compscitech.2012.01.013
14. Parahin I.V., Tumanov A.S. Phenolic-rubber foam the grade of VPP-4. *Aviation Materials and Technologies*. 2014; 1(30):42-46. (rus.).
15. Samatadze A.I., Parahin I.V., Porosova N.F., Tumanov A.S. A choice of the plasticizer for phenolic-rubber foam. *Composites and Nanostructures*. 2014; 6:2(22):117-124. (rus.).
16. Samatadze A.I., Parakhin I.V., Porosova N.F., Tumanov A.S. Obtaining phenol-rubber foams by the method of "sulfurless" vulcanization. *Aviation Materials and Technologies*. 2013; 3(28):49-52. (rus.).
17. Kovalenko A.V., Tundajkin K.O., Parahin I.V., Lukina A.I. The phenolic-rubber foam is not corrosive to non-ferrous metals. *Material Science and Technology News*. 2017; 3-4(27):5. (rus.).
18. Qian Xu, Rui Gong, Meng-ya Cui, Chuan Liu, Rui-hai Li. Preparation of high-strength microporous phenolic open-cell foams with physical foaming method. *High Performance Polymers*. 2015; 27(7):852-867. DOI: 10.1177/0954008314564197
19. Li Q., Chen L., Ding J., Zhang J., Li X., Zheng K. et al. Open-cell phenolic carbon foam and electromagnetic interference shielding properties. *Carbon*. 2016; 104:90-105. DOI: 10.1016/j.carbon.2016.03.055
20. Wang B., Li H.-J., Guo L.-J., Zhang Y.-L., Li Y.-Y., Xu J.-X. Preparation and properties of precursor of phenolic-based carbon foams. *Guti Huojian Jishu*. 2014; 37(1):113-117. DOI: 10.7673/j.issn.1006-2793.2014.01.022
21. Rangari V.K., Hassan T.A., Zhou Y., Mahfuz H., Jeelani S., Prorok B.C. Cloisite clay-infused phenolic foam nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2007; 103(1):308-314. DOI: 10.1002/app.25287

Received May 16, 2019.

Adopted on August 9, 2019.

Approved for publication on August 29, 2019.

BIONOTES: **Nguyen Viet Cong** — Ph.D. of Technical Sciences, Head of the Department of Building Materials Technology, Faculty of Industrial and Civil Engineering; **Hanoi Architectural University**; Thanh Xuan District, Hanoi City, Vietnam; cong.vlxdkt@gmail.com;

Nikolay Y. Sosnovskiy — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; isa@mgsu.ru;

Valentin P. Yanchuk — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; isa@mgsu.ru;

Anastasia M. Smirnova — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; isa@mgsu.ru;

Larisa S. Grigorieva — Ph.D. in Chemistry, Associate Professor of the Department of Technology of Binders and Concretes; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1826-9481; grigoryevals@mgsu.ru.